

Шумахер У.

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

**Техническая информация,
технологии
и
характеристики**

2004

Шумахер У.

Полупроводниковая
электроника

2004

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	11
1. Полупроводники, основные сведения и исторический обзор	12
1.1. Введение	12
1.2. Исторический обзор	12
1.2.1. Полупроводниковые диоды	12
1.2.2. Биполярные транзисторы	12
1.2.3. Победное шествие кремния	13
1.2.4. Другие полупроводниковые материалы и компоненты	14
1.2.5. Полевые транзисторы	15
1.2.6. Интегральные полупроводниковые схемы	15
1.2.7. Классификация полупроводниковых компонентов	20
1.3. Конструкция и принцип действия интегральных схем	21
1.3.1. Биполярные интегральные микросхемы	21
1.3.2. Интегральные МОП-микросхемы	27
1.4. Другие полупроводниковые приборы	34
1.4.1. Полупроводниковые приборы без специальной структуры	34
1.4.2. Полупроводниковые диоды	35
1.4.3. Транзисторы	38
1.4.4. Другие интегральные полупроводниковые приборы	39
2. Диоды и транзисторы	40
2.1. Высокочастотные диоды	40
2.2. Время жизни носителей заряда и последовательное сопротивление ВЧ <i>p-i-n</i> -диодов	41
2.2.1. Измерение электрических параметров <i>p-i-n</i> -диодов	42
2.3. Определение ёмкостей биполярных транзисторов	43
2.3.1. Измерение ёмкостей C_{CB} , C_{CE} и C_{EB}	44
2.4. Определение параметров малосигнального ВЧ транзистора путём измерения трёх параметров	44
2.4.1. Измерение <i>S</i> -параметров транзисторов	45
2.4.2. Установка для измерения коэффициента шума транзистора	46
2.4.3. Установка для измерения коэффициента шума смесителя	46
2.4.4. Измерение значения точки интермодуляции третьего порядка (IP3)	47
2.5. Биполярные ВЧ транзисторы	48
2.5.1. SIEGET	49
2.5.2. Применение	51
2.5.3. Кремний-германиевые транзисторы	52
2.6. Кремниевые монокристаллические СВЧ интегральные схемы (MMIC) упрощают разработку	53
2.6.1. Три схемы устройств	56
2.6.2. Мобильные телефоны — не единственная область применения MMIC ...	57
2.7. Стабилизация тока при помощи стабилизатора рабочей точки BCR 400	57
2.7.1. Принцип действия	58
2.7.2. Зависимость от внешних факторов	58
3. Силовые полупроводниковые приборы	60
3.1. Классификация	60
3.1.1. Классификация силовых полупроводниковых приборов по их параметрам	62

3.2.	Разработка продукции.	63
3.2.1.	Различия процессов разработки продукции.	64
3.3.	Группы продукции.	65
3.4.	Технология изготовления полупроводниковых пластин (начальный этап проекта).	66
3.4.1.	Базовые технологии	66
3.4.2.	Силовые MOSFET	68
3.4.3.	Интеллектуальные МОП-транзисторы (SmartFET)	69
3.4.4.	Интеллектуальные силовые ИС	72
3.4.5.	Перспективы и тенденции.	76
3.5.	Технологии корпусирования	78
3.5.1.	Классификация корпусов полупроводниковых приборов	78
3.5.2.	Статические характеристики корпусов силовых приборов.	79
3.5.3.	Динамические характеристики мощных корпусов	81
3.5.4.	Анализ тепловых процессов в корпусах полупроводниковых приборов методом конечных элементов.	85
3.5.5.	Спецификация на тепловые характеристики и тип корпуса	89
3.5.6.	Специальные параметры корпусов силовых полупроводниковых приборов для автомобильной электроники	89
3.5.7.	Многокристалльные корпуса и тенденции развития	93
3.6.	Мощные приборы для автомобильной электроники.	95
3.6.1.	MOSFET и IGBT.	95
3.6.2.	Транзисторы SmartFET и SmartIGBT	97
3.6.3.	Многоканальные ключи	103
3.6.4.	Мостовые схемы	105
3.6.5.	Микросхемы источников питания.	111
3.6.6.	Трансиверы	117
3.6.7.	ИС интеллектуальных систем питания.	120
3.6.8.	Тенденции развития автомобильной электроники.	126
3.7.	Источники питания и устройства электропривода	128
3.7.1.	Типы импульсных источников питания	128
3.7.2.	Основные типы импульсных источников питания.	130
3.7.3.	Критерий выбора импульсного источника питания.	135
3.7.4.	ИС для импульсных источников питания	140
3.7.5.	Коэффициент мощности.	142
3.7.6.	Электроприводы — регулирование скорости вращения и силовая электроника	147
3.7.7.	Низковольтные силовые транзисторы OptiMOS™	148
3.7.8.	Высоковольтные транзисторы CoolMOS™	156
3.7.9.	Карбид кремния — основа мощных приборов.	162
3.7.10.	Высоковольтные мощные IGBT	170
4.	Оптоэлектронные приборы	177
4.1.	Физика оптического излучения.	177
4.1.1.	Основы и терминология	177
4.1.2.	Фотодиоды	179
4.1.3.	Кремниевые фотодиоды	180
4.1.4.	Фототранзисторы	180
4.1.5.	Светоизлучающие диоды.	181
4.2.	Полупроводниковые лазеры.	184
4.2.1.	Основы функционирования полупроводникового лазера.	185

4.2.2.	Структура полоскового лазера с оксидной изоляцией	186
4.2.3.	Лазерные матрицы	187
4.2.4.	Другие применения полупроводниковых лазеров	190
4.3.	Оптроны и твердотельные реле	191
4.4.	Оптические волноводы	193
4.4.1.	Оптические волокна как среда для передачи информации	193
4.4.2.	Передающие и приёмные модули для оптоволоконных применений.	194
4.4.3.	Ретрансляторы для волоконно-оптических применений	197
4.4.4.	Подсоединение к стеклянным волокнам	197
4.4.5.	Оптические разъёмы для пластиковых волокон	199
4.4.6.	Типичные применения пластиковых волокон	199
4.4.7.	Использование технологий оптической передачи данных по пластиковым волоконкам в транспортных средствах	200
4.5.	IrDA — передача данных с использованием инфракрасного излучения	204
4.5.1.	IrDA — один стандарт для всех приборов.	204
4.5.2.	Полный IrDA-стандарт	205
5.	Датчики	207
5.1.	Общий обзор	207
5.2.	Датчики магнитного поля	207
5.2.1.	Дискретные датчики Холла	207
5.2.2.	Интегральные датчики Холла с заказными ИС (ASIC)	210
5.2.3.	Датчики на основе гигантского магниторезистивного эффекта (GMR).	213
5.3.	Датчики давления	219
5.3.1.	Микромеханика поверхности, датчики давления с цифровым выходом (KP 100)	219
5.3.2.	Датчик давления с аналоговым выходом (KP 120)	221
5.3.3.	Пьезорезистивный датчик давления в SMD-корпусе (KP 200)	223
5.4.	Датчики температуры	224
6.	Память	226
6.1.	Типы запоминающих устройств	226
6.1.1.	Механическая память	227
6.1.2.	Магнитные устройства хранения данных	227
6.1.3.	Оптические устройства хранения данных	227
6.1.4.	Полупроводниковые устройства хранения данных (микросхемы памяти)	227
6.2.	Принцип работы и область применения DRAM	228
6.2.1.	Чем SRAM отличается от DRAM?	228
6.2.2.	Виды памяти DRAM	229
6.2.3.	Спецификация	230
6.2.4.	Механическая конструкция микросхем памяти DRAM	230
6.2.5.	Описание работы DRAM на примере SDR SDRAM	232
6.2.6.	Технология производства микросхем DRAM	234
6.2.7.	Внутренняя структура и принципы работы DRAM	238
6.2.8.	Разработка и производство микросхем DRAM	247
6.2.9.	Контроль качества	249
6.3.	Совершенствование микросхем DRAM с точки зрения их быстродействия.	251
6.3.1.	EDO DRAM с повышенной скоростью доступа к памяти.	251
6.3.2.	Синхронная DRAM	252
6.3.3.	Микросхемы памяти с удвоенной скоростью передачи данных.	253
6.3.4.	Стандартизированные модули памяти для ПК	253

7. Микроконтроллеры	256
7.1. Введение	256
7.2. Восьмибитные микроконтроллеры	256
7.2.1. Введение	256
7.2.2. Организация памяти	256
7.2.3. Область регистров специальных функций	259
7.2.4. Архитектура ЦПУ	260
7.2.5. Основные принципы обработки прерываний	262
7.2.6. Структура портов ввода/вывода	264
7.2.7. Тактовые сигналы ЦПУ	266
7.2.8. Обращение к внешней памяти	267
7.2.9. Обзор команд микроконтроллера C500	269
7.2.10. Функциональные схемы микроконтроллеров семейства C500	274
7.3. Шестнадцатититные микроконтроллеры	274
7.3.1. Введение	274
7.3.2. Состав семейства 16-битных микроконтроллеров	277
7.3.3. Обзор архитектуры микроконтроллеров семейства C166	280
7.3.4. Организация памяти	280
7.3.5. Основные концепции построения ЦПУ и средства их оптимизации	280
7.3.6. Встроенные ресурсы микроконтроллера	286
7.3.7. Интерфейс внешней шины	288
7.3.8. Встроенные периферийные модули	288
7.3.9. Характеристики системы управления электропитанием	296
7.3.10. Особенности микроконтроллеров семейства XC166	297
7.3.11. Система команд микроконтроллеров семейства C166	297
7.3.12. Функциональные схемы 16-битных микроконтроллеров	299
7.4. Архитектура 32-битных микроконтроллеров TriCore	308
7.4.1. Отличительные особенности архитектуры TriCore	309
7.4.2. Регистры состояния программы	310
7.4.3. Типы данных	311
7.4.4. Режимы адресации	311
7.4.5. Форматы команд	311
7.4.6. Задачи и контекст	311
7.4.7. Система обработки прерываний	312
7.4.8. Система обработки ошибок	313
7.4.9. Система защиты	313
7.4.10. Сброс системы	314
7.4.11. Система отладки	314
7.4.12. Модель программирования	314
7.4.13. Организация памяти	316
7.4.14. Режимы адресации	317
7.4.15. Регистры процессорного ядра	319
7.4.16. Регистры общего назначения (GPR)	320
7.4.17. Функциональные схемы 32-битных микроконтроллеров	323
8. Смарт-карты	327
8.1. Обзор	327
8.2. Введение	327
8.3. Состояние рынка	327
8.3.1. Структура рынка микросхем для смарт-карт в зависимости от области применения	327

8.3.2. Требования рынка	328
8.4. Области применения	328
8.4.1. Цифровая подпись — подпись будущего	328
8.4.2. Электронная торговля в сети Интернет	330
8.4.3. Банковское обслуживание на дому	330
8.5. Сеть деловых взаимоотношений	331
8.6. Продукция	331
8.6.1. «Чип на карте» — современное положение дел	331
8.6.2. «Система на карте» — вызов будущего	332
8.7. Криптографическая экспертиза	333
8.8. Чипы для многофункциональных карт	334
8.8.1. Поддержка интерпретаторов в микроконтроллерах Infineon	335
8.9. Интерфейс «человек-машина» как новый класс периферийных устройств	335
8.10. Технологии и производство	336
8.10.1. Передовые технологии	336
8.10.2. Требования к технологии, продукции и схемным решениям	337
8.10.3. Требования, предъявляемые к готовой продукции	337
8.11. Информационная безопасность	338
8.11.1. Смарт-карта как система безопасности	338
8.11.2. Аппаратная безопасность	338
8.11.3. Пирамида безопасности	338
8.11.4. Безопасность как совокупность технических и организационных мер	339
8.12. Перспективы	339
9. Полупроводниковые устройства для автомобилей	341
9.1. Автомобильная электроника	341
9.2. Кузовная электроника и системы обеспечения комфорта	342
9.2.1. Системы управления электропитанием и осветительным оборудованием автомобиля	343
9.2.2. Дверные модули	346
9.2.3. Системы кондиционирования воздуха	350
9.3. Системы безопасности автомобиля	353
9.3.1. Системы активной безопасности автомобиля	355
9.3.2. Системы пассивной безопасности автомобиля	360
9.4. Трансмиссия автомобиля	370
9.4.1. Полупроводниковые технологии для систем управления трансмиссией автомобиля	370
9.4.2. Применение полупроводниковых приборов в трансмиссии автомобиля — системный обзор	371
9.4.3. Перспективы развития систем управления трансмиссией автомобиля	378
9.5. Электроника для автомобильных информационно-развлекательных систем	379
9.5.1. Приборная панель	379
9.5.2. Автомобильные аудиосистемы	379
9.5.3. Системы телематики	380
9.5.4. Навигационные автомобильные системы	381
9.5.5. Автомобильные мультимедийные системы	382
9.5.6. Технологии совместного использования	382
9.6. Новые 42-В системы электропитания автомобиля	384
9.6.1. Уточнение терминов: 12 В и 42 В	384
9.6.2. Перспективы использования бортовой электросети 42 В (PowerNet) в рамках новых решений и концепций	385

9.6.3. Силовые полупроводниковые компоненты и напряжение питания 42 В . . .	387
9.7. Достоинства и проблемы технологий электронного управления оборудованием	395
9.7.1. Системные требования	396
9.7.2. Возможности технологии x-by-wire	396
9.7.3. Полупроводниковые решения для систем x-by-wire	399
9.8. Перспективы развития автомобильной электроники	400
10. Развлекательная бытовая электроника	402
10.1. Виды широкополосной связи	402
10.1.1. Цифровизация кабельного телевидения	403
10.1.2. Развитие цифрового наземного ТВ вещания	404
10.1.3. Улучшенная модель обратной связи в системе цифрового спутникового ТВ вещания	407
10.2. MultiMediaCard — идеальное устройство хранения данных для мобильных пользовательских устройств	408
10.2.1. Широкий диапазон применений	409
10.2.2. Упор на стандартизацию	410
10.2.3. Гибкий интерфейс	410
10.2.4. 128 Мбайт в 2001 году	411
11. Коммуникационные модули.	413
11.1. Общий обзор коммуникационных устройств и тенденции их развития	413
11.1.1. Стратегические ориентиры	414
11.1.2. Высокие темпы инноваций	414
11.1.3. Коммутационные ИС	414
11.1.4. Сетевые интегральные микросхемы	414
11.1.5. Интегральные микросхемы оконечных устройств связи	415
11.2. ISDN: от телефонной станции к абоненту	416
11.2.1. Функциональная структура ISDN	417
11.2.2. Цифровые линейные карты	419
11.2.3. Контроллер расширенной линейной карты (ELIC)	419
11.2.4. Контроллер ISDN-станции с D-каналом (IDEC)	419
11.2.5. U-трансивер для аналогового интерфейса	420
11.2.6. Контроллер высоковольтного источника питания ISDN (IHPC)	420
11.2.7. Сетевое окончание	421
11.2.8. Контроллер интеллектуального сетевого окончания (INTC)	421
11.2.9. DC/DC-преобразователь для сети ISDN (IDDC)	422
11.2.10. Схема фидера S-интерфейса ISDN (ISFC)	422
11.2.11. Двухканальный кодек-фильтр с цифровой обработкой сигнала	424
11.3. Оконечное оборудование ISDN: абонентское окончание	424
11.3.1. Телефон	424
11.3.2. Сменные PC-карты	426
11.3.3. Абонентский адаптер (TA) и USB-адаптер S0-интерфейса	427
11.3.4. Комбинированная схема NT1 и TA	427
11.3.5. Телефон высшего класса с USB-S0-адаптером и функцией абонентского адаптера (TA)	427
11.4. Образцы разработки для ISDN	428
11.4.1. Комплексные решения — основа успешного маркетинга	428
11.4.2. Аппаратное обеспечение	429
11.4.3. Программное обеспечение	429
11.4.4. Доступ к сети ISDN	429
11.4.5. ISDN-телефоны	430

11.5. Анализ качества телефонной сети.....	430
11.5.1. Система TIQUS для контроля телефонных сетей	431
11.5.2. Проверка методом установления вызова: тестовое соединение	431
11.5.3. Технологии доступа к сети ISDN, предлагаемые компанией Infineon. ...	432
11.6. Снижение стоимости офисных АТС за счёт гибкого использования интегральных технологий.	432
11.6.1. Экономически эффективные системные решения	433
11.6.2. Тенденция к миниатюризации	433
11.6.3. Специализированные ИС для цифровых офисных АТС	433
11.6.4. Решения для PCM-коммутаторов.	435
11.6.5. Использование ИС семейства SWIT1 для подключения к шинам H.100/H.110	436
11.7. Архитектура нового поколения мобильного оконечного оборудования — GOLDenfuture для GSM	437
11.7.1. E-GOLD — расширение стандартной платформы GOLD	437
11.7.2. Поддержка приложений	438
11.7.3. Новая платформа для разработки — первый шаг в будущее	439
11.7.4. Полнофункциональный GSM-модуль	439
11.8. Цифровые автоответчики	440
11.8.1. Использование DSP-процессора для сжатия потока данных	440
11.8.2. Одноканальный кодек	440
11.8.3. Оптимизация стоимости автоответчиков за счёт использования чипсета SAM	441
11.8.4. Упрощение процесса разработки	445
11.9. Алгоритмы hands-free	445
11.9.1. Системы hands-free	445
11.9.2. Дуплексные системы	445
11.9.3. Полудуплексные системы	446
11.9.4. Реализация эхоподавления в дуплексных системах	446
11.9.5. Рекомендации ITU-T	449
11.10. Архитектуры DSL	450
11.10.1. Основные понятия	450
11.10.2. Использование оборудования ADSL	452
12. Заказные интегральные схемы	459
12.1. Полузаказные ИС	459
12.1.1. Вентильные матрицы	459
12.1.2. ИС на основе готовых ячеек	460
12.1.3. Вентильная матрица или набор готовых ячеек?	460
12.2. Используемые технологии	461
12.2.1. Биполярные полузаказные ИС	461
12.2.2. Полузаказные КМОП ИС	462
12.2.3. Биполярные вентильные матрицы	462
12.2.4. Биполярные транзисторные матрицы (линейные матрицы)	463
12.3. Варианты используемых корпусов	463
12.4. Сотрудничество между производителями ИС и заказчиками	464
13. Электромагнитная совместимость	466
13.1. Основные понятия	466
13.1.1. Природа электромагнитных помех	466
13.1.2. Нормы и стандарты электромагнитной совместимости	469
13.1.3. Методы измерения электромагнитной совместимости для интегральных схем	470

13.1.4. Модели, используемые при оценке устойчивости ИС к электростатическим разрядам (ESD)	477
13.2. Электромагнитная совместимость автомобильных силовых ИС	480
13.2.1. Мощные ключевые ИС	481
13.2.2. Помехи, создаваемые DC/DC-преобразователями	484
13.2.3. Помехи, создаваемые коммуникационными ИС (CAN-трансиверами) ..	485
13.2.4. Помехоустойчивость автомобильных мощных ключевых ИС	486
13.2.5. Помехоустойчивость коммуникационных ИС (CAN-трансиверов)	487
13.2.6. Меры по обеспечению электромагнитной совместимости ИС в прикладных схемах с использованием внешних компонентов	488
13.3. Электромагнитная совместимость микроконтроллеров	489
13.3.1. Автомобильные микроконтроллерные системы и тенденции развития их технологий	489
13.3.2. Проектирование печатной платы, оптимизированной с точки зрения электромагнитной совместимости	491
13.3.3. Измерение уровня помех, излучаемых микроконтроллерами	495
13.3.4. Помехоустойчивость микроконтроллеров	500
13.4. Обеспечение ЕМС в проводных системах связи	500
13.4.1. Системы, компоненты и основные понятия	502
13.4.2. Проектирование печатных плат для высокоскоростных систем и меры по обеспечению целостности сигнала	502
13.5. Защита компонентов от электростатических разрядов	511
13.5.1. Меры по защите ИС при контакте с электрически заряженными объектами	512
13.5.2. Защитные меры по предотвращению электростатического заряда ИС в процессе их производства	512
14. Корпуса ИС	513
14.1. Разработка корпусов ИС: от физики — к инновациям	513
14.2. Обзор корпусов полупроводниковых ИС	514
14.3. Движущие силы процесса разработки новых технологий корпусирования ИС ..	516
14.4. Состояние дел на мировом рынке корпусов ИС	517
14.4.1. Стандартизация	517
14.4.2. Мировые тенденции: корпуса микросхем памяти	517
14.4.3. Мировые тенденции: корпуса ИС	518
14.4.4. Общемировые тенденции развития пассивных модулей	521
14.5. Корпуса с уплотнённым расположением выводов: оценка с точки зрения пользователя и альтернативные решения	521
14.6. Куда приведёт нас процесс совершенствования корпусов ИС?	522
14.7. Материалы, используемые при производстве корпусов	524
14.7.1. Бессвинцовые и безгалогенные корпуса	524
14.7.2. Требования к содержанию различных веществ в устройствах и материалах	525
14.7.3. Сбои в работе программного обеспечения вследствие повышенной радиоактивности материалов корпусов компонентов	525
15. Контроль качества полупроводниковых компонентов	527
15.1. Критерии, определяющие качество продукции	527
15.2. Меры по обеспечению качества бизнес-процессов	528
15.3. Технологичность с точки зрения пользователя	529
16. Глоссарий	535
16.1. Глоссарий	535

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дорогой читатель, я хотел бы предварить эту книгу азбучной истиной: не всякая новинка несёт в себе новизну. Что я хочу этим сказать? Новое (третье) издание справочника «Полупроводниковая электроника» было действительно необходимым по двум причинам. Во-первых, будущим инженерам-электронщикам и электротехникам, а также преподавателям и пользователям всегда нужно иметь под рукой сборник справочных материалов по микроэлектронике. И наше издание, которое быстро завоевывает популярность среди специалистов, подходит для данной цели как нельзя лучше — это и классический учебник, и надёжный краткий справочник, и просто увлекательная книга.

Во-вторых, сборник «Полупроводниковая электроника» содержит проверенные временем фундаментальные знания от А (АЦП) до Z (эффект Зенера), с которыми вы сможете ознакомиться подробно в соответствующих главах или кратко в глоссарии (в конце книги). Но всё же реальная новизна книги состоит в том, что мы сумели изложить в ней все современные тенденции, веяния и достижения в области полупроводниковых технологий. А это было не так-то просто. Возьмём, к примеру, закон Мура. Гордон Мур (Gordon Moore), один из основателей корпорации Intel, в 1965 году предсказал, что количество транзисторов в интегральной схеме (ИС) будет удваиваться каждые 18 месяцев. Как подтверждает современное состояние дел, он оказался прав: сегодня в интегральной схеме в 40 миллионов раз больше компонентов, чем 40 лет назад. А что если экстраполировать эти расчёты до 2085 года, до самых границ постижимого? Будет ли тогда компонент в самом деле состоять всего лишь из половины атома?

Оставим эти догадки футурологам. Сегодня совершенно ясно, что полупроводниковая отрасль развивается самыми быстрыми темпами в мире, будь то приложения для систем связи, автомобилестроения, широкополосного и обычного доступа, мобильной связи или для запоминающих устройств. Поэтому мы, авторы сборника «Полупроводниковая электроника», пристально следим за достижениями всех, кто будет продвигать инновации в информационно-коммуникационной отрасли в ближайшие годы и десятилетия. Значимость этих инноваций подтверждается хотя бы тем фактом, что уже сегодня микросхемы Infineon обеспечивают работу каждой третьей подушки безопасности, нашими компонентами оснащён каждый второй мобильный телефон стандарта GSM, а поставляемые нами модули системной памяти используются в каждом шестом новом ПК и в каждом пятом новом сервере.

Я буду рад, если наш справочник поможет вам в профессиональном развитии. **Никогда не прекращайте думать!** Книга «Полупроводниковая электроника» поможет сделать первые шаги в этом направлении, станет авторитетным помощником на весь период обучения и послужит ориентиром при выборе специализации. Желаю вам всяческих успехов!

Мюнхен, февраль 2004 г.

Доктор Ульрих Шумахер
(Ulrich Schumacher)

Председатель правления компании
Infineon Technologies AG

1. ПОЛУПРОВОДНИКИ, ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ И ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1. Введение

Термином полупроводник описываются твёрдые материалы, которые по своей природе (из-за особенностей строения кристаллической решетки) и в зависимости от температуры могут иметь различное количество свободных электронов или дырок. В зависимости от количества свободных носителей заряда материалы будут иметь высокую или низкую проводимость, а величина, обратная проводимости — удельное электрическое сопротивление — для полупроводников при комнатной температуре будет лежать в диапазоне от 10^{-2} Ом·см (например, для арсенида индия и арсенида галлия) до 10^6 Ом·см (для селена). Материалы, не имеющие свободных носителей заряда и вследствие этого обладающие высоким внутренним сопротивлением, называются диэлектриками (например, стекло (SiO_2), слюда, янтарь, фарфор, поливинилхлорид (ПВХ)). Материалы, сохраняющие свою проводимость даже при низких температурах и имеющие в нормальных условиях чрезвычайно малое сопротивление, называются проводниками (алюминий, медь, серебро, золото). В отличие от твёрдых металлов, проводимость газов и жидкостей зависит от подвижности ионов этих веществ, а значит, и от подвижности самого вещества.

В следующих разделах мы будем говорить о полупроводниковых приборах, металлических проводниках, использующихся для создания межсоединений, и диэлектриках, служащих для разделения соседних компонентов. Способность объединить все эти элементы и наладить их экономически эффективное производство привела к успеху полупроводниковой промышленности и в результате позволила получить высокую степень интеграции компонентов (до 1 миллиарда элементов в одном приборе).

1.2. Исторический обзор

1.2.1. Полупроводниковые диоды

В 1939 году физики Вальтер Шоттки (Walter Schottky) и Эберхард Спенке (Eberhard Spenke), работавшие в компании Siemens&Halske, опубликовали научную ра-

боту «Zur quantitativen Durchführung der Raumladungs- und Randschichttheorie der Kristallgleichrichter» (Количественное выражение поверхностного заряда и теория поверхностных слоёв полупроводниковых диодов), в которой описывался принцип действия полупроводниковых диодов с переходом металл — полупроводник. Их работа основывалась на глубоких фундаментальных исследованиях, как теоретических, так и экспериментальных, подтверждающих, что описываемые переходы обладают выпрямительными свойствами, т.е. различным электрическим сопротивлением в зависимости от направления протекания тока. Вклад Шоттки в развитие полупроводниковой техники почитается и по сей день, полупроводниковые диоды со структурой металл — полупроводник называются диодами Шоттки.

Первые выпрямительные диоды изготавливались из селена и германия. Например, в СВЧ технике, в особенности в радиолокации, германиевые диоды с точечным контактом стали использоваться с 1942 года. Для простых радиоприёмников диод успешно использовался в качестве детекторного элемента. С другой стороны, кремниевые диоды с самых первых этапов развития применялись в качестве выпрямителей.

1.2.2. Биполярные транзисторы

Значимым достижением была разработка транзистора, начавшаяся в 1945 году в лаборатории Белла под руководством Уильяма Шокли (William Shockley). В 1947 году, совместно с Вальтером Браттэйном (Walter Brattain) и Джоном Бардином (John Bardeen), Шокли создал на подложке из поликристаллического германия два диода с точечными контактами. 16 декабря 1947 года команда разработчиков случайно обнаружила, что изменение прямого напряжения, приложенного к одному диоду, приводит к изменению обратного тока второго диода. Они назвали этот эффект «транзисторным эффектом», а прибор — транзистором (от англ. transit — пропускать и resistor — резистор). Промышленное производство изначально оказалось слишком сложным,

поскольку параметры приборов имели очень большой разброс. Первые улучшения стали появляться с разработкой плоскостного транзистора. Они были результатом революционной идеи Шокли — не использовать для создания переходов контакты, а изготавливать их на кристалле путём выборочного легирования четырёхвалентного германия трёхвалентными (индий) или пятивалентными (мышьяк) материалами, таким образом изменяя проводимость и свойства кристалла (структуру энергетических уровней). Он описал эту идею в 1949 году, а в 1950 году создал первый германиевый *p-n-p*-транзистор. Такой принцип изготовления транзистора относится к сплавным плоскостным транзисторам, поскольку капля индия вплавляется в германий.

Первые транзисторы всё ещё изготавливались из поликристаллического германия. Этот материал имел недостаток, заключавшийся в том, что дефекты кристаллической решётки и посторонние примеси уменьшали проводимость. На практике от указанного недостатка удалось избавиться только когда стало возможным получать сверхчистые монокристаллические материалы методом зонной плавки.

Другим новшеством стала диффузионная технология, разработанная лабораторией Белла и компанией General Electric. Она была представлена на симпозиуме в 1955 году. Преимущество данной технологии заключалось в том, что она позволяла точно изготавливать слои заданной толщины с заданным количеством примесей. За свои новаторские изобретения и связанные с ними исследования и разработки Шокли, Бардин и Браттэйн в 1956 году были награждены Нобелевской премией по физике.

Описание принципа работы биполярного транзистора можно найти в подразделе 1.3.1, где также рассматриваются биполярные интегральные схемы.

1.2.3. Победное шествие кремния

Преимуществом германия является его высокая проводимость, поэтому он особенно подходит для использования на высоких частотах. С другой стороны, кристаллическая решетка германия не может выдерживать без повреждения температуру выше $+75^{\circ}\text{C}$. Кроме того, обратный ток вызывает появление помех даже при комнатной температуре. В отличие от германия, кристал-

лы кремния выдерживают температуру до $+150^{\circ}\text{C}$, а большая ширина запрещённой энергетической зоны и более высокое внутреннее сопротивление приводят к меньшим значениям обратного тока. В дополнение к этому, кремний существует в природе практически в неограниченных количествах. В 1952 году Г. Тил (G. Teal) и Э. Бухлер (E. Buchler) представили второй метод (помимо зонной плавки) получения монокристаллического кремния из расплава поликристаллического кремния. Сегодня этот процесс более известен как метод Чохральского. В 1953...1956 годах компания Siemens разработала альтернативный процесс получения кристаллического кремния. При помощи этого процесса, так называемого химического парового осаждения (ХПО), из газовой среды осаждаются брусочки почти чистого, но поликристаллического кремния. После этого производится зонная плавка данных брусков методом, предложенным В. Дж. Пфанном (W.G. Pfann), в результате чего они не только очищаются, но и становятся монокристаллическими. Претерпев огромное количество усовершенствований, данный процесс обработки кремния используется и по сей день.

В 1954 году Гордону Тилу удалось изготовить первый кремниевый биполярный транзистор в лаборатории Белла. В 1956 году он организовал промышленное производство транзисторов в компании Texas Instruments. Очень скоро эти приборы продемонстрировали своё превосходство при работе в низкочастотных схемах.

В июне 1958 года работник лаборатории Белла М. Аталла (M. Atalla) описал великолепные изоляционные свойства полученного термическим путем диоксида кремния, (который встречается в природе в виде кварцевого песка). Используя этот материал, стало возможным изготавливать планарные полупроводниковые структуры, т.е. полупроводниковые структуры, которые могут быть организованы слоями. Отдельные проводящие слои разделяются чрезвычайно тонким слоем диоксида кремния. Основным преимуществом такой конструкции является то, что слой оксида можно протравить в определенных местах, обеспечивая соединение между наложенными друг на друга слоями. Кроме того, поверхность кристалла остается плоской, что позволяет избежать влияния поверхностных эффектов. Такая планарная

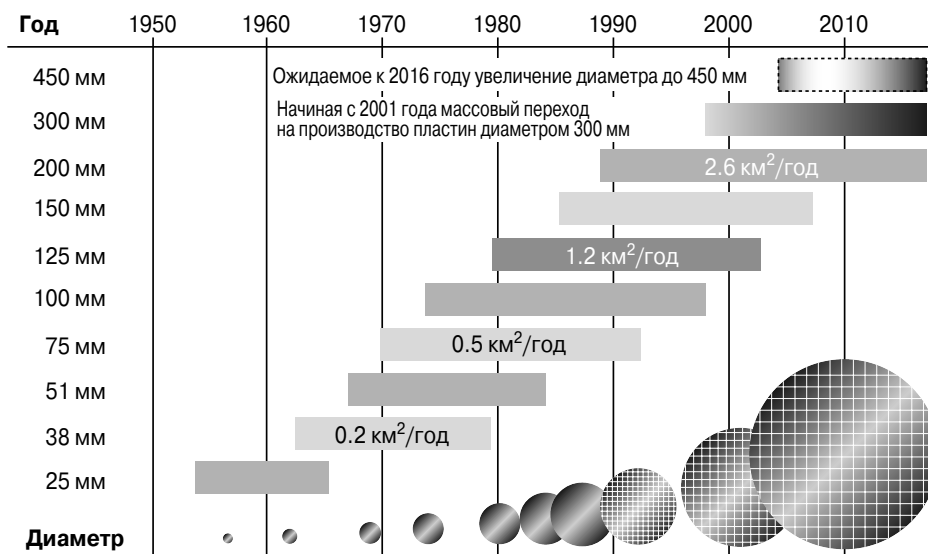


Рис. 1.1. Развитие производства полупроводниковых пластин.

технология позволила, используя процессы фотолитографии и диффузии из газовой фазы, в одном процессе получить на одной кремниевой пластине большое количество одинаковых транзисторов. В 1959 году компания Fairchild Semiconductors начала промышленное использование данной технологии. Помимо этого, планарная технология открыла путь для интеграции различных типов компонентов на одном полупроводниковом кристалле.

С развитием кремниевой технологии площадь пластин удваивалась каждые 10 лет (Рис. 1.1). Если в 60-х годах прошлого века диаметр пластин составлял 25 мм, то в 70-х годах их диаметр уже достигал 51 мм, в 80-е — 100 и 150 мм, в 90-е — 200 мм, а в 2002 году была выпущена полупроводниковая пластина диаметром 300 мм. Одновременно происходило сокращение плотности дефектов, как поверхностных, так и дефектов исходного материала и дефектов легирования. На сегодняшний день существует множество модификаций данной технологии, такие как эпитаксиальная технология, технология кремний-на-изоляторе (SOI) и технология напряжённого кремния. Целью всех этих разработок является удовлетворение требований к производительности и стоимости полупроводниковых приборов.

1.2.4. Другие полупроводниковые материалы и компоненты

В 1953 году Генрих Велкер (Heinrich Welker), проводя исследования в лаборато-

рии Siemens & Halske, обнаружил, что некоторые соединения трёх- и пятивалентных материалов, например арсенид галлия, обладают полупроводниковыми свойствами. С тех пор данные полупроводниковые материалы стали играть большую роль в области оптоэлектроники. Это произошло главным образом из-за того, что в указанных материалах во время рекомбинации электронов и дырок (в гораздо больших количествах, чем в кремнии или германии) высвобождающаяся энергия излучается в виде фотонов. Ещё с 1956 года было известно, что при работе *p-n*-перехода в прямом направлении он излучает фотоны. Однако промышленное производство красных светодиодов началось только в середине 60-х годов XX-го века. Основная проблема заключалась и заключается в получении света, излучаемого с поверхности кристалла, до того, как он будет поглощен. Это оказалось чрезвычайно трудным в случае с коротковолновым синим излучением и оставалось невозможным, пока в середине 80-х годов XX-го века сотрудники лаборатории Siemens не разработали синий светодиод (из карбида кремния).

Было разработано множество оригинальных технологий для изготовления компонентов и схем на основе полупроводников $A^{III}B^V$. Важную роль в процессах производства данных материалов играет молекулярно-лучевая эпитаксия.

Областью применения приборов на основе полупроводников $A^{III}B^V$ являются оп-

тические системы передачи данных и оптические устройства отображения информации. С этой целью проводились разработки полупроводниковых лазеров с большим количеством слоев, некоторые из которых являются мономолекулярными (имеют толщину в одну молекулу), а также интеграция оптоключей и фильтров. Проводимые сегодня исследования направлены на использование нитрида галлия (GaN) в качестве основы люминофора для различных длин волн при изготовлении осветительных приборов и основного материала компонентов, работающих на высоких частотах.

Карбид кремния (SiC) является основным перспективным материалом, используемым для изготовления силовых ключей. Главные требования, предъявляемые к силовым ключам, — это высокая теплоустойчивость, малое сопротивление в проводящем состоянии и высокая частота переключения.

1.2.5. Полевые транзисторы

В 1928 году Дж. Э. Лелейнфилд (J.E. Lilienfeld) и О. Хейл (O. Neil) описали идею создания прибора, управляемого полем, но использующего в качестве рабочей среды не вакуум, а твёрдые материалы. Их идеи подготовили почву для создания полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом (Junction Field-Effect Transistor — JFET) и полевых транзисторов со структурой металл—оксид—полупроводник (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor — MOSFET), или, сокращенно, МОП-транзисторов. Однако в то время, из-за недостаточного развития физики твёрдых тел, эти приборы не могли быть ни экспериментально исследованы, ни изготовлены. Шокли был первым из тех, кто вернулся к этой идее снова в 1952 году. Но прошло ещё несколько лет, прежде чем был изготовлен первый полевой транзистор с управляющим p - n -переходом, а в 1959 году Аталла и Канг (Kahng), работавшие в лаборатории Белла, представили транзистор с ёмкостным управлением со структурой металл—оксид—полупроводник (т.е. МОП-транзистор). Долгое время МОП-транзисторы с каналами n -типа и p -типа развивались наравне друг с другом. Однако со временем n -канальная технология оказалась более развитой, и технология изготовления p -канальных транзисторов постепенно отошла

на второй план. В 1964 году компания RCA начинает применение технологии КМОП (комплементарный металл-оксидный полупроводник, *англ.* Complementary Metal-Oxide Semiconductor — CMOS), при которой на одном кристалле размещаются транзисторы с разными типами проводимости. Эти транзисторы включены последовательно, но открыт всегда только один из них, поэтому такая схема имеет очень низкий ток потребления. КМОП-технология и по сей день применяется, когда требуется низкое энергопотребление. Тем не менее, с увеличением тактовых частот растёт ток потребления, с уменьшением размеров транзисторов возрастают токи утечки, снижение напряжения питания требует меньших значений пороговых напряжений, и сегодня КМОП-технология приблизилась к своим пределам. Идёт постоянный поиск возможностей совершенствования компонентов и схемных решений, особенно в области портативных приборов. Более подробное описание принципа действия полевых транзисторов вы найдете в подразделе 1.3.2.

1.2.6. Интегральные полупроводниковые схемы

Главными движущими силами развития полупроводниковой промышленности являются:

- снижение стоимости приблизительно на 25% ежегодно;
- удвоение плотности размещения элементов примерно каждые 18 месяцев;
- увеличение сложности схем из-за интеграции на кристалле функций периферийных устройств;
- скорость (сравни, тактовые частоты микропроцессоров);
- **потребляемая мощность(!)**, в особенности это касается устройств с батарейным питанием;
- интеграция дополнительных функциональных возможностей, например памяти, и интерфейсов — датчиков и исполнительных устройств.

На сегодняшний день количество транзисторов и других полупроводниковых приборов, которые могут быть интегрированы на одном кристалле, достигает нескольких миллиардов. Изготовление интегральных микросхем основывается на сложной последовательности процессов легирования,

Таблица 1.1. Упрощённая последовательность изготовления интегральных микросхем

Этап	Описание
Подложка	Изготовление подложки
Карманы	Основное легирование для <i>n</i> - и <i>p</i> -канальных транзисторов в случае КМОП-технологии
Изоляция	Создание диэлектрической изоляции соседних приборов, в основном при помощи диоксида кремния SiO ₂
Прибор	Задание характеристик прибора путём изменения степени легирования канала, толщины подзатворного диэлектрика и подбора материала затвора
Межсоединения	Создание легирующего профиля для соединения области канала с уровнями соединительной разводки. Создание низкоомных соединений с уровнями разводки
Локальные соединения	Создание коротких высокоомных соединений внутри схемы (более высокие сопротивления не оказывают вредных воздействий на схему)
Металлизация	Основная разводка в зависимости от сложности схемы может насчитывать до 10 слоёв
Глобальные монтажные соединения	Создание низкоомной разводки с гибкими требованиями в отношении размера структуры для длинных соединений и организации электропитания блоков
Пассивирование	Изолирование (герметизация) схемы от внешних воздействий и, следовательно, обеспечение длительного срока службы
Корпусирование на уровне 0	Для современных технологий — подготовка неразделённой на кристаллы пластины к корпусированию: формирование столбиковых выводов, корпусирование на уровне пластины, технология chip-on-board (кристалл на плате)

осаждения проводящих и изолирующих слоёв, а также создания горизонтальной структуры при помощи литографии и травления (см. Табл. 1.1). Развитие полупроводниковой промышленности связано с разработкой подходящих материалов с соответствующими свойствами (однородность, избирательность, чистота, технологическая совместимость) и специального технологического оборудования. В частности, процесс фотолитографии совершенствовался в течении многих лет, в результате теперь можно изготавливать структуры с размером, меньшим чем длина волны света. Для процесса осаждения существует оборудование, позволяющее осаждать слои толщиной в один атом, а толщина слоёв, использующихся в современных компонентах, лежит в диапазоне от 3 до 4 атомов. Значительные трудности пришлось преодолеть для достижения однородности пластины (например, размером 300 мм), воспроизводимости и получения бездефектных слоёв. Для малых фокусных расстояний, связанных с высокой разрешающей способностью, были разработаны специальные процессы сглаживания поверхности (химико-механическая полировка).

Изготовление отдельной законченной пластины часто состоит из сотен этапов. В процессе производства следует уделять

внимание точности изготовления и чистоте материала, поскольку для микроскопических структур даже незначительные отклонения имеют большие последствия. Выход за требуемые пределы точности на отдельных этапах производства может значительно уменьшить процент выхода годных микросхем.

Из-за требований по тактовой частоте, энергопотреблению и габаритным размерам, накладываемых на компоненты конечными приборами, классическая цепочка процессов изготовления приборов «Разработка — Топология — Шаблоны — Пластина — Измерения — Корпусирование — Завершающие испытания» не имеет такого чёткого разделения на отдельные этапы. Современные методы предусматривают комплексные решения пластина-корпус, использование концепций «система-в-корпусе» и модульных концепций. С увеличением объёма производства для современных специализированных корпусов можно добиться оптимизации стоимости за счёт использования трёхмерной (3D) интеграции нескольких чипов (ASIC + память + аналоговый интерфейс + MEMS).

Биполярные микросхемы

Первый патент на интеграцию нескольких компонентов был независимо получен

в 1959 году Джеком Килби (Jack S. Kilby) из Texas Instruments и Робертом Нойсом (Robert N. Noyce), коллегой Уильяма Шокли по Fairchild Semiconductors. Возникший в результате этого спор о правах на изобретение был решён апелляционным судом США таким образом, что обе стороны обладали одинаково равными правами. Первая интегральная схема (ИС) состояла из биполярного транзистора, трёх резисторов и конденсатора (Килби использовал германий). Большой интерес к новой технологии пришёл со стороны компьютерной индустрии, где до появления ИС приходилось изготавливать большое количество отдельных схем, которые часто были идентичными. В скором времени, между 1961 и 1963 годами появились микросхемы, использующие резисторно-транзисторную логику (РТЛ) (Fairchild), диодно-транзисторную логику (ДТЛ) (Signetics), транзисторно-транзисторную логику (ТТЛ) (Pacific Semiconductors) и эмиттерно-связанную логику (ЭСЛ) (Motorola). ТТЛ-логика (особенно серия 7400 производства Texas Instruments) и ЭСЛ-логика очень быстро нашли широкое применение в цифровых устройствах. Вскоре, несмотря на большие трудности, удалось добиться успеха и в производстве аналоговых интегральных микросхем. Особо отметим компании Fairchild и National Semiconductor, которые приступили к производству интегральных операционных усилителей.

МОП-микросхемы

Развивающаяся с 1964 года МОП-технология также становилась интегральной и стремилась к ещё большей степени интеграции компонентов. Одним из шагов на этом пути было появление технологии локального окисления кремния (LOCAL Oxidation of Silicon — LOCOS), которая была доведена до рыночной реализации компанией Philips в 1966 году. В данной технологии островки транзисторов были разделены кольцом из диоксида кремния, что позволяло сделать зазоры между транзисторами значительно меньше, чем раньше, при этом отсутствовали паразитные транзисторы. Дальнейшие усовершенствования были получены путём использования ионной имплантации, которая позволила селективно легировать небольшие области. Несмотря на то что этот процесс уже был описан в

1952 году С. Олом (S. Ohl), который был сотрудником лаборатории Белла, и запатентован Уильямом Шокли в 1954 году, его техническая реализация до 1970 года оставалась невозможной.

В устройствах, сочетающих аналоговую и цифровую обработку сигналов и использующих аналого-цифровые преобразователи, требуется высокая скорость обработки информации, высокая нагрузочная способность, высокая линейность и хорошее отношение сигнал/шум, в то же время для них требуется высокая плотность размещения компонентов цифровых схем. В связи с этим стала быстро развиваться БиКМОП-технология, при которой совместно используются КМОП- и биполярные приборы. В последние годы активно развивается кремний-германиевая (SiGe) технология, которая позволяет получать высокие скорости передачи данных и/или высокие максимальные рабочие частоты. Важными областями её использования являются трансиверы (приёмопередатчики), параллельно-последовательные и последовательно-параллельные преобразователи, драйверы для лазерных диодов и малошумящие усилители (LNA).

Микросхемы памяти

Начиная с 1966 года даже использующаяся в компьютерах память на магнитных сердечниках стала вытесняться полупроводниковыми микросхемами памяти. Первая ИС такого типа была выпущена компанией International Business Machines (IBM). Она содержала 16 триггеров на биполярных транзисторах и могла хранить 16 бит информации. В 1968 году IBM выпустила 64-битную ИС памяти на триггерах, но она состояла из 664 компонентов (это больше, чем 10 компонентов на один бит памяти). В этом же году создатель интегральных схем Роберт Нойс (Robert Noyce) совместно с двумя сотрудниками компании Fairchild, Гордоном Муром (Gordon Moore) и Эндрю Грувом (Andrew Grove), основывает компанию Integrated Electronics, позже переименованную в Intel. К началу 1969 года Intel выпустила на рынок ИС статического ОЗУ объёмом 64 бит (изготовленную по биполярной технологии Шокли). Три месяца спустя на рынке появилась 256-битная ИС памяти, изготовленная по той же технологии. Обе микросхемы были неудачными с финансовой точки зрения: они были слишком доро-

гими по сравнению с памятью на магнитных сердечниках. Но компания Intel была на верном пути. В этом случае решающим фактором было снижение стоимости путём использования меньшего количества транзисторов на бит памяти. На самом деле, компания IBM уже изобрела в 1966 году однотранзисторную память (динамическое ОЗУ), но компания Intel была первым производителем, который превратил эту разработку в коммерчески выгодный проект. В конце 1970 года появилась ИС 1103 — 1024-битное динамическое ОЗУ, изготовленное по технологии NMOS (*n*-канальная МОП-технология). Она была дороже памяти на магнитных сердечниках, но в 1972 году стала самой продаваемой микросхемой памяти благодаря своему техническому превосходству. Она была заменена в 1975 году микросхемой динамического ОЗУ объёмом 4 Кбит, которая в дальнейшем вытеснила с рынка память на магнитных сердечниках. Затем, с интервалом в 3—4 года, появились ИС памяти объёмом 16, 64 и 256 Кбит. Сегодня выпускаются ИС динамического ОЗУ объёмом свыше 1 Гбит. Гордон Мур, один из основателей компании Intel, в 1964 году предсказал, что каждые 18 месяцев число транзисторов в ИС будет удваиваться. По существу, эта гипотеза верна и по сей день и известна как закон Мура. Более подробное описание технологии изготовления динамической памяти вы можете найти в главе 6.

Простая транзисторная память имела и имеет только один недостаток: она энергозависима, т.е. может хранить информацию только тогда, когда на неё подано напряжение питания. В отличие от неё, данные, записанные в энергонезависимую память, не изменяются при исчезновении напряжения питания, и такая память может быть запрограммирована как производителем (массочное ПЗУ), так и пользователем (ППЗУ, ЭПЗУ, СППЗУ, ЭСППЗУ, флэш-память, параметрическое ОЗУ, NROM, нанокристаллическая память). Начиная с 1970 года, одновременно с ОЗУ на рынке появились микросхемы ПЗУ и СППЗУ. Также вскоре после них появилась и ЭСППЗУ. Хотя ИС ПЗУ со временем и увеличивались по объёму, они не могли держаться наравне с ИС динамического ОЗУ. В 1987 году компания Intel выпустила на рынок первую ИС флэш-памяти. За последующие десять лет этот дешёвый аналог ЭСППЗУ завоевал большую

часть рынка энергонезависимой памяти, и на сегодняшний день без неё невозможно представить многие современные устройства (карманные компьютеры, портативные радиостанции, мобильные телефоны, цифровые фотокамеры и т.д.). Более подробную информацию об этом типе памяти вы сможете найти в разделах 1.3 и 1.4 данной главы.

В стремлении получить более высокие плотности записи информации в сочетании с более низкими напряжениями питания был разработан и изучен ряд новых методов хранения данных:

- NROM — флэш-память, использующая в качестве носителя информации диэлектрик;
- FeRAM — ферроэлектрическая память;
- MRAM — магниторезистивная память;
- PRAM — память на основе фазового перехода.

Важную роль в развитии памяти играют два требования: удобство в использовании и энергонезависимость.

Микропроцессоры

В 1969 году японский концерн Busicom захотел создать карманный электронный калькулятор на основе 5 интегральных схем. Сама компания была не в состоянии изготовить эти чипы и запросила их у компании Intel. Когда спецификация на данное устройство поступила к разработчику Марсиану Хоффу (Marcian E. (Ted) Hoff), ему пришла в голову мысль, почему бы не попробовать создать это устройство, используя только одну ИС. После некоторых сомнений концерн Busicom согласился и сделал заказ. Впоследствии разработанный компанией Intel чип стал первым микропроцессором. Он имел разрядность 4 бита, содержал 2300 транзисторов и удовлетворял всем требованиям спецификации. В дальнейшем Intel выкупила права на этот микропроцессор у концерна Busicom и представила его на рынке под кодовым обозначением 4004. Через небольшой промежуток времени появился 8-битный микропроцессор 8008. Последующая разработка, микропроцессор 8080, был представлен компанией Intel в 1974 году. К этому времени компании Texas Instruments, Motorola, National Semiconductor, Fairchild, Signetics и Toshiba также представили на рынке свои микропроцессоры. Компания RCA даже выпустила микропроцессор с малым энергопотреблением, вы-

полненный по КМОП-технологии, а Федерико Фэггин (Frederico Faggin), один из разработчиков 4004, основал компанию Zilog Company, представившую на рынке микропроцессор Z80. Компания Intel оставалась лидером на рынке микропроцессоров, но под давлением конкурентов, в особенности компании Motorola, которая сделала ответный ход, выпустив семейство микропроцессоров 68000, в 1974 году компания Intel представила 16-битный микропроцессор 8086. Вскоре компания Motorola получила лицензии на выпуск и продажу своих микропроцессоров, и, как следствие, вскоре заняла значительную долю этого рынка. Компания даже добилась, чтобы первый производитель микрокомпьютеров, компания Apple, стала использовать микропроцессоры серии 68000. С 1976 года, когда компания, основанная Стивеном Джобсом (Steven Jobs) и Стивеном Возняком (Steven Wozniak) представила компьютер Apple I (с 8-битным процессором компании Motorola), и по сей день она использует микропроцессоры Motorola. Однако компании Intel удалось привлечь внимание производителя компьютеров IBM, которая выбрала 8-битный вариант микропроцессора 8086 для создания первого микрокомпьютера, так называемого персонального компьютера (ПК). Первый ПК появился в 1981 году и обеспечил Intel долгосрочный успех на рынке благодаря серии 8086 и её преемникам — 286, 386, 486, Pentium, Itanium, Xscale, Centrino, Opetron и т.д. На сегодняшний день компания Intel доминирует на рынке микропроцессоров с долей 85%, в то время как AMD занимает только 15%.

Микроконтроллеры

В конце 70-х годов прошлого века компания Intel выпустила 8-битный микропроцессор 8048 со встроенной периферией. Он имел ПЗУ, ОЗУ, таймер и различные порты ввода/вывода. Кроме того, в качестве опции, ПЗУ могло быть заменено на ППЗУ (серия 8748). Поскольку данное устройство применялось, главным образом, для задач управления, оно получило название «микроконтроллер». В 1980 году появилась следующая разработка, микроконтроллер 8051, который и по сей день остаётся стандартом де-факто для 8-битных микроконтроллеров. Покорение рынка 16- и 32-битных

микроконтроллеров шло параллельно с разработкой микропроцессоров.

В 1975 году компания IBM доказала, что правило 80/20, которое гласит, что в течение 80% времени используется только 20% доступных команд, применимо и к процессорам. Вскоре стало ясно, что более выгодной, в особенности для осуществления управляющих функций, будет разработка микропроцессора с сокращенным набором команд (Reduced Instruction Set Computer — RISC), который появился на рынке в середине 80-х годов прошлого века благодаря компании MIPS Computing. С этого момента большинство функций управления и обработки сигналов стало осуществляться RISC-процессорами.

Помимо вычислительных и управляющих функций, чрезвычайно важную роль, особенно в области беспроводной связи, стала играть быстрая цифровая обработка сигналов (Digital Signal Processing — DSP). В этой области прочные позиции с конца 90-х годов прошлого века занимают компании Texas Instruments и ARM.

Специализированные интегральные микросхемы (ASIC)

В начале 80-х годов прошлого века всё более четко вырисовывалась ещё одна дилемма: стандартные ИС стали преградой на пути к интеграции готовых устройств. Тот набор функций, который хотели бы реализовать разработчики, редко является стандартным для ИС. А заказные ИС с высоким уровнем интеграции были и остаются достаточно дорогими, и их изготовление является экономически выгодным только при массовом производстве. Именно поэтому производители разработали ИС, которые могут модифицироваться пользователем. Их можно разделить на два больших класса: программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и специализированные интегральные схемы (Application-Specific Integrated Circuit — ASIC). Компания Monolithic Memories Inc. (MMI) в 1983 году первой выпустила на рынок ПЛИС с использованием программируемой матричной логики (ПМЛ). ПМЛ-технология заключалась в том, что программируемая матрица элементов И управляет входами специальной матрицы элементов ИЛИ. Программирование данных микросхем осуществлялось аналогично программиро-

ванию ППЗУ. В 1985 году компания Xilinx предложила технологию с использованием матрицы логических элементов (Logic Cell Array), при которой программа хранится в ячейках ОЗУ. Каждый раз при включении модуля программа из энергонезависимой памяти загружалась в ОЗУ. Достоинство этой технологии заключается в том, что для программирования и управления более дорогой матрицей логических элементов может использоваться более дешёвый стандартный модуль. Специализированные ИС, напротив, являются микросхемами с большим количеством стандартных блоков, которые могут быть запрограммированы в соответствии с определёнными правилами. В этом случае полупроводниковая пластина изготавливается, по мере возможности, с помощью стандартных технологических процессов. И только некоторые определённые этапы изготовления осуществляются в соответствии с требованиями заказчиков. Такой метод производства сокращает стоимость ИС, но является целесообразным только при больших объёмах производства. При малых и средних объёмах более выгодным является применение ПЛИС или матрицы логических элементов. Более подробную информацию о специализированных ИС вы сможете найти в главе 12.

Технология поверхностного монтажа

Строго говоря, технология поверхностного монтажа на самом деле не является технологией изготовления полупроводниковых приборов. Однако её появление внесло большой вклад в расширение возможностей по комбинированию всё более миниатюрных полупроводниковых структур в виде модулей. В традиционной технологии выводы компонентов, таких как резисторы, конденсаторы, дроссели и транзисторы, устанавливались в отверстия на печатной плате или соединялись при помощи проводов, тогда как в новой технологии монтаж компонентов осуществлялся непосредственно на поверхность печатной платы. В связи с этим была разработана новая миниатюризированная форма корпуса, который стал более компактным и надёжным. Компоненты такого типа называют SMD (от *англ.* Surface Mounted Devices — компоненты для поверхностного монтажа). Однако с появлением технологии поверхностного монтажа стало фактически невозможным осуществление ремонта поврежденных узлов.

1.2.7. Классификация полупроводниковых компонентов

Полупроводниковые компоненты могут быть классифицированы по различным критериям, например:

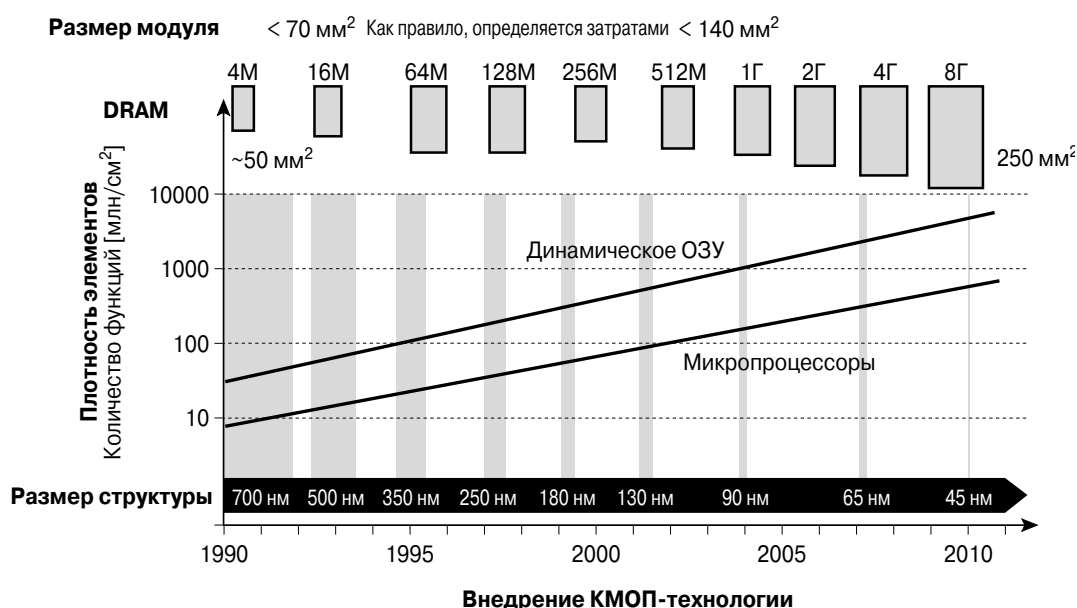


Рис. 1.2. Увеличение плотности размещения компонентов позволило изготавливать кристаллы с миллиардами кристаллов.

- технология изготовления (биполярная, МОП, КМОП, БиКМОП, Шоттки);
- внутреннее устройство, т.е. отдельные полупроводниковые приборы или интегральные схемы;
- область применения (аналоговые устройства, цифровые устройства, силовая электроника, обработка сигналов, оптоэлектроника).

С точки зрения потребителя, последний критерий классификации является наиболее значимым. Именно поэтому мы используем его в последующих разделах, где полупроводниковые приборы будут описываться в соответствии с их областями применения.

1.3. Конструкция и принцип действия интегральных схем

В случае интегральных схем все элементы схемы и соединяющие их провода изготавливаются одновременно в течение одного производственного процесса на одном монокристаллическом полупроводниковом кристалле, или чипе. Элементы схемы, расположенные на кристалле в непосредственной близости, должны быть электрически изолированы друг от друга. Микросхема заключена в корпус, в котором, как правило, контактные площадки кристалла соединяются с выводами корпуса при помощи очень тонкой проволоки.

Кремний является основным полупроводниковым материалом, используемым на сегодняшний день в интегральных схемах, и последующие разъяснения будут относиться к кремнию, поскольку другие материалы (GaAs, GaN, SiC) в обозримом будущем будут играть второстепенную роль в производстве ИС.

Основным преимуществом ИС перед схемами на дискретных компонентах являются низкая стоимость при больших объемах производства, высокая надежность, малые габариты и высокое быстродействие. Поэтому основной тенденцией развития ИС является повышение уровня интеграции, плотности размещения, быстродействия и сложности схем, размещаемых на одном кристалле. В основном, этого удалось добиться путём уменьшения размера структур на кристалле. По финансовым соображениям предпринимаются постоянные попытки увеличения размера кремниевой пластины таким образом, чтобы размес-

тить на ней как можно большее количество кристаллов. На **Рис. 1.2** показано развитие этих тенденций с течением времени.

Как известно, основные типы транзисторов — биполярный и полевой. Аналогично ИС классифицируются как биполярные и МОП-микросхемы. В следующих подразделах описываются технологическая конструкция и принцип действия этих ИС.

1.3.1. Биполярные интегральные микросхемы

p-n-переход

Чистый кремний является полупроводником, электрическая проводимость которого достаточно мала при комнатной температуре. Это происходит главным образом из-за того, что в данном материале почти отсутствуют свободные носители зарядов. Однако, если один из тысячи атомов кремния будет заменён атомом примеси (например, атомом бора, фосфора или мышьяка), значение проводимости вырастет во много раз, потому что атом примеси имеет дополнительный носитель заряда (в зависимости от валентности атома, это может быть электрон или дырка), который может легко разорвать атомную связь и свободно перемещаться. В зависимости от типа примеси, свободный электрон или дырка, перемещаясь, оставляет после себя дырку или электрон соответственно, который, в свою очередь, готов принять другие носители заряда. Этот процесс называется рекомбинацией. Соответственно, легированная область кремния будет являться резистором с большим или меньшим сопротивлением, которое зависит от концентрации примеси (см. **Рис. 1.3**).



Рис. 1.3. Легированная область и её эквивалентная схема замещения.

Вторым важным свойством полупроводниковых материалов является то, что тип свободных носителей заряда, отвечающих за проводимость, — отрицательно заряженные электроны или положительно

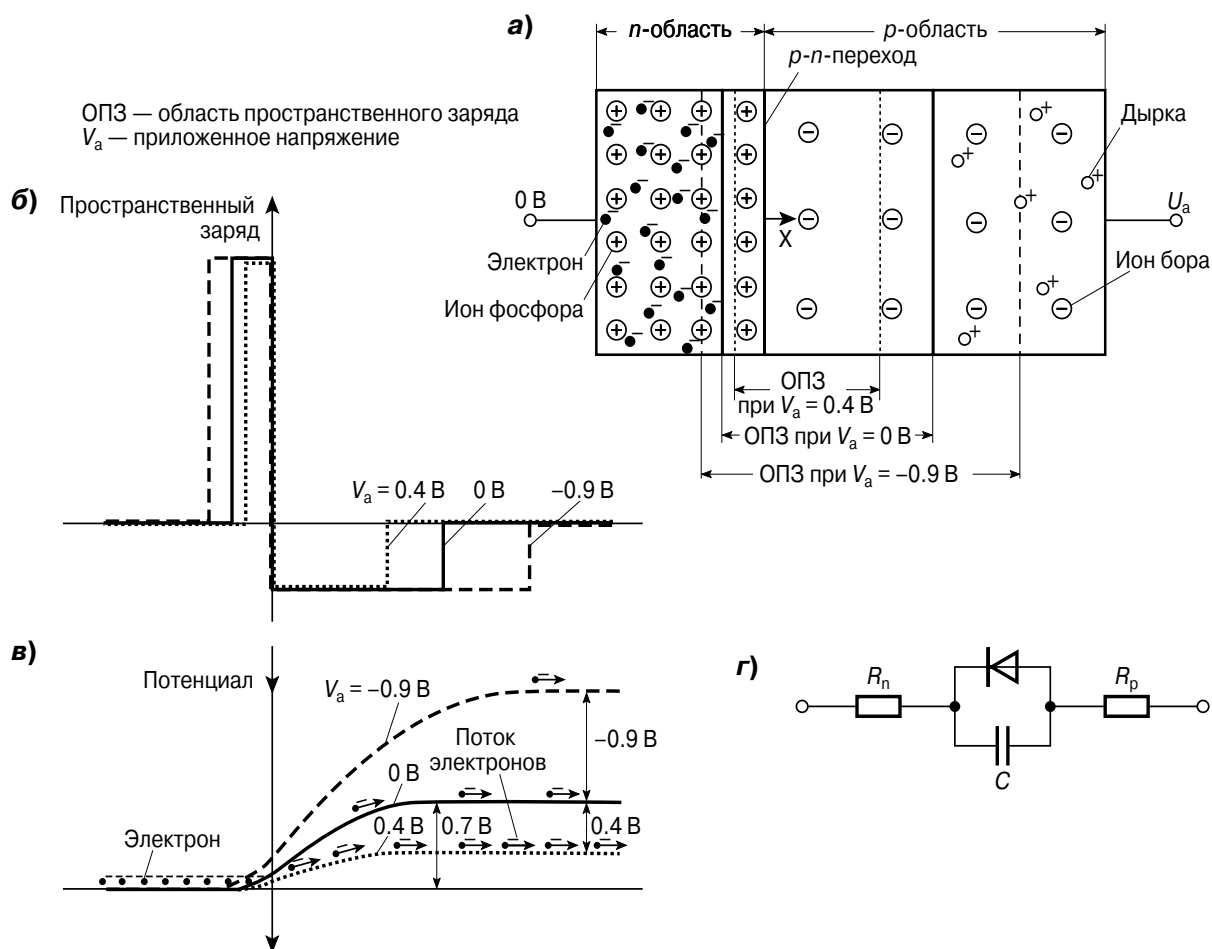


Рис. 1.4. Потенциальный барьер в полупроводнике:

а — структурная схема полупроводникового прибора; б — распределение заряда; в — распределение потенциала; г — эквивалентная схема замещения.

заряженные дырки — зависит от того, легирована ли кремниевая подложка пентавалентными (фосфор, мышьяк, сурьма) или трёхвалентными (бор) атомами примеси. Области, в которых основными носителями заряда являются электроны, называются областями n -типа (n -областями), а области, в которых основным носителями заряда являются дырки, — областями p -типа (p -областями).

n - и p -области изначально являются электрически нейтральными. Например, в областях n -типа свободные электроны, определяющие силу протекающего тока, скомпенсированы таким же количеством положительно заряженных ионов (доноров) фосфора, мышьяка или сурьмы, которые находятся в определённых областях кристаллической решётки кремния. В областях p -типа положительно заряженные подвижные носители заряда уравновешены неподвижными электронами (акцепторами).

В пограничном слое между p - и n -областями (p - n -переход) появляется потенциальный барьер, обусловленный диффузией электронов из n -области в p -область, а также диффузией дырок из p -области в n -область (см. Рис. 1.4). Диффундирующие в p -область электроны оставляют в n -области тонкий слой, обеднённый электронами, заряд которого определяется неподвижными положительно заряженными донорами (см. Рис. 1.4, а). Соответственно, в p -области, в зоне p - n -перехода, появляется отрицательно заряженный слой, обеднённый дырками. Таким образом, n -область получает больший потенциал, чем p -область (Рис. 1.4, в). Теперь для того чтобы диффундировать в p -область, электроны должны преодолеть этот потенциальный барьер. Когда величина потенциального барьера достигает определённого значения (для кремния оно составляет примерно 0.7 В), диффузия электронов или дырок прекращается.

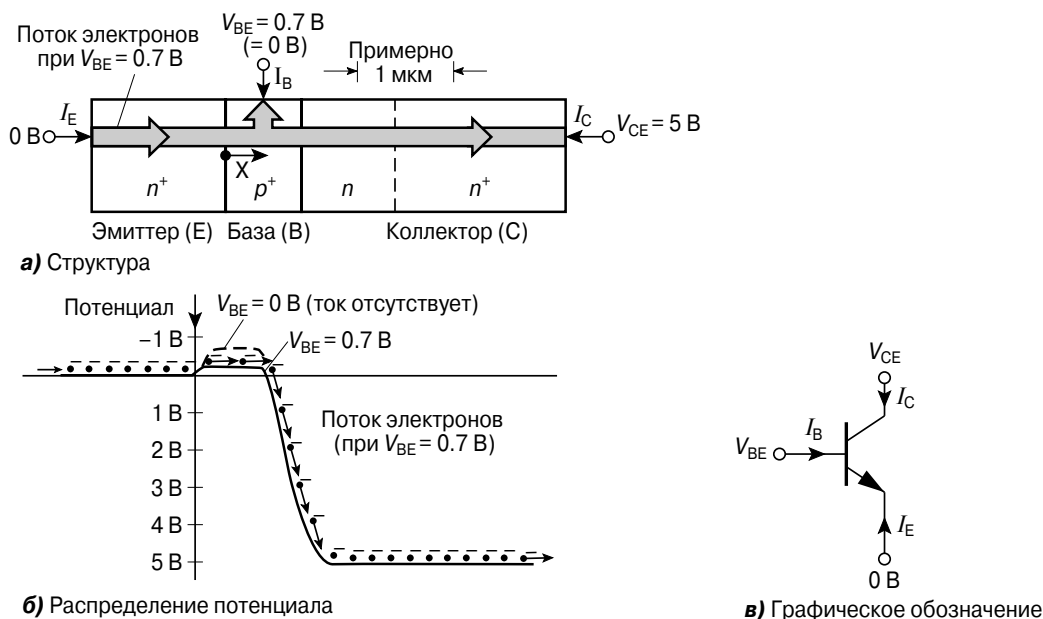


Рис. 1.5. Структура и принцип действия биполярного n - p - n -транзистора.

Если приложить между p - и n -областями отрицательное напряжение, то потенциальный барьер на p - n -переходе возрастёт (пунктирная линия на Рис. 1.4, в). В этом случае только небольшое количество электронов или дырок сможет преодолеть возросший потенциальный барьер (будет протекать малый обратный ток). Соответственно, если приложить положительное напряжение между p - и n -областями, то будет протекать большой ток. Таким образом, p - n -переход работает как диод с прямым падением напряжения 0.7 В. С другой стороны, зона пространственного заряда p - n -перехода, обеднённая свободными носителями заряда, представляет собой ёмкость. Следовательно, эквивалентная схема замещения p - n -перехода состоит из диода и подключённой параллельно ему ёмкости (см. Рис. 1.4, г).

Пробой p - n -диодов происходит при некотором значении обратного напряжения, которое для известных p - n -переходов лежит в пределах от 5 до более чем 100 В. В некоторых биполярных схемах пробивное напряжение диода (стабилитрона) используется для ограничения падения напряжения вне зависимости от протекающего тока.

Помимо p - n -диодов, во многих ИС используются диоды Шоттки. Они образованы алюминием и слабо легированной n -областью. Основное отличие от обычных диодов заключается в том, что они имеют меньшее прямое падение напряжения (примерно 0.4 В) при небольших напряжениях пробоя.

Биполярный транзистор

Биполярный n - p - n -транзистор состоит из двух n -областей — коллектора и эмиттера, и находящейся между ними p -области — базы.

На Рис. 1.5 приведена общая структурная схема такого биполярного транзистора, а также пояснён его принцип действия. Когда напряжение, приложенное к базе транзистора, равно нулю ($V_{BE} = 0$), величина потенциального барьера между эмиттером и базой составляет 0.7 В, и лишь малая часть электронов может преодолеть данный барьер (см. Рис. 1.4). Транзистор находится в закрытом состоянии. При приложении напряжения $V_{BE} = 0.7$ В, величина потенциального барьера уменьшается, и из эмиттера в область базы течёт поток электронов. Если ширина базы, т.е. расстояние между p - n -переходами эмиттер—база и база—коллектор, равняется нескольким десяткам микрона, то почти все электроны диффундируют в переход база—коллектор, на котором они ускоряются и после прохождения области коллектора выводятся через контакт коллектора. И лишь небольшая часть электронов рекомбинирует с дырками, присутствующими в области базы.

Если переход эмиттер—база смещён в прямом направлении, то помимо потока электронов из области эмиттера в область базы, в обратном направлении, из области базы в область эмиттера, течёт поток дырок. Тем не менее, если концентрация примеси в

области эмиттера во много раз превышает концентрацию примеси в области коллектора, то поток дырок будет во много раз меньше электронного. Поток дырок из области базы в область эмиттера затем складывается с потоком, поступающим в базу (Рис. 1.5, а).

На Рис. 1.6 представлено семейство типичных характеристик биполярного транзистора. Важная особенность биполярного транзистора состоит в том, что можно управлять большим током коллектора при помощи малого тока базы. Отношение тока базы к току коллектора называют коэффициентом усиления по току. Его значение обычно составляет 100.

Биполярный транзистор можно включить в обратном направлении, т.е. поменять местами эмиттер и коллектор. Однако в этом случае коэффициент усиления по току значительно меньше (его значение примерно равно 1) из-за более низкой концентрации примеси в области эмиттера.

Структура биполярных ИС

Биполярная ИС состоит из множества биполярных транзисторов, расположенных на кремниевом кристалле недалеко друг от друга и соединенных проводящими дорожками в соответствии с функциональным назначением.

На Рис. 1.7 представлена типовая структура биполярного n - p - n -транзистора с окружающими его элементами в ИС. Предпо-

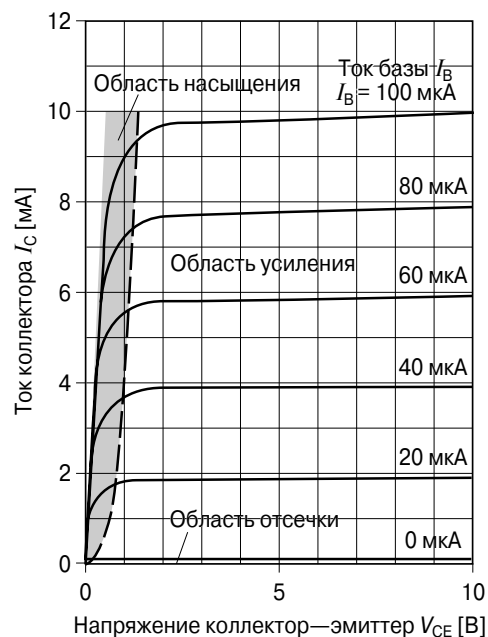


Рис. 1.6. Семейство характеристик биполярного n - p - n -транзистора.

ложим, что в этом примере коллектор транзистора соединён с базой соседнего транзистора алюминиевой перемычкой. Область p^+ , окружающая транзистор, электрически функционирует как два встречно включенных диода, обеспечивая изоляцию соседних транзисторов.

Изолирующая область и кремниевая подложка с проводимостью p -типа, соединенная с данной областью, поддерживаются под самым низким потенциалом в схеме.

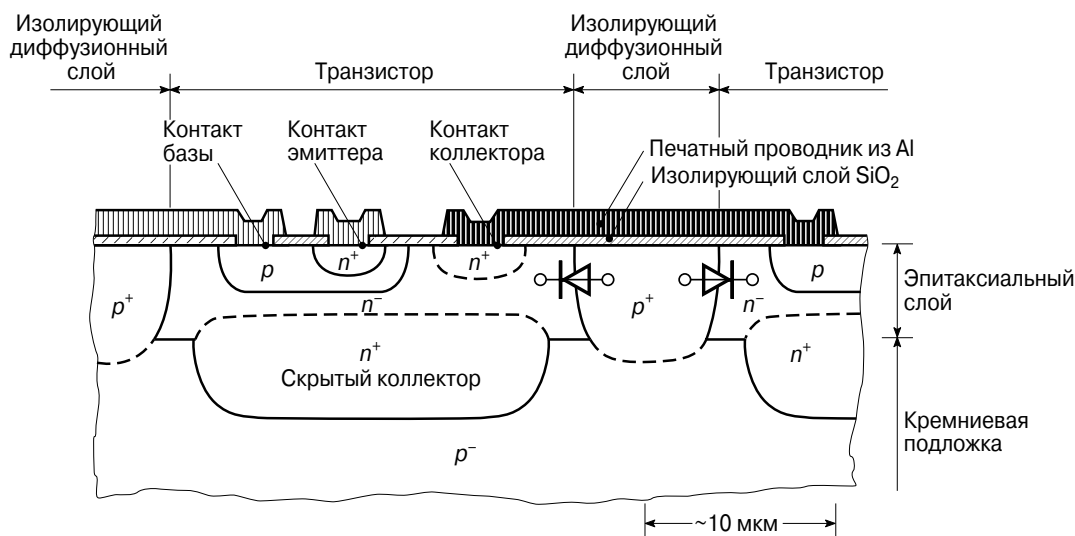


Рис. 1.7. Строение интегрального биполярного n - p - n -транзистора.

На практике, большая часть транзисторов — это *n-p-n*-транзисторы, поскольку они имеют лучшие электрические характеристики и более просты в изготовлении, чем *p-n-p*-транзисторы.

Расположение отдельных легированных областей на **Рис. 1.7** определяется, среди прочих факторов, внешними требованиями, которым должен удовлетворять процесс интеграции: контакты располагаются только на поверхности кремния, а для изоляции коллекторных областей каждый транзистор окружается областью, легированной примесью *p*-типа.

Например, чтобы обеспечить малое значение сопротивления коллектора, требуется скрытый слой *n*-типа с большим содержанием примесей (скрытый коллектор). Это означает, что после создания скрытого слоя, поверх него выращивается эпитаксиальный слой монокристаллического кремния, в котором формируются база и эмиттер. Изолирующая *p*-область, которая проходит через весь эпитаксиальный слой, занимает относительно много места. В связи с этим, транзисторы в ИС, имеющие общий коллектор, располагаются в одном кармане *n*-типа.

Для того чтобы организовать изолирующий слой между поверхностью кремния и проводящей дорожкой, расположенной на его поверхности, используют слой, изготовленный из диоксида кремния SiO_2 толщиной 0.5 мкм, который можно получить путём термического окисления поверхности кремния. В данном случае изготовление контактов требует использования фотолитографических масок для того, чтобы протравливать отверстия в слое SiO_2 . В общем случае от каждого транзистора в ИС требуется вывести три контакта в слой межсоединений (требуется много места). Например, если соседние транзисторы имеют общую базу, то можно уменьшить число контактов до 5.

Соединительные дорожки в основном выполняются из алюминия. Сопротивление R проводящей дорожки толщиной d , шириной b и длиной l равно:

$$R = \rho \cdot l / d \cdot b,$$

где ρ — удельное сопротивление алюминия. Отношение l/b можно представить как количество квадратов ($\square$) со стороной b , составляющих дорожку проводника. Тогда отношение ρ/d — это сопротивление одного такого квадрата. Данное сопротивление на-

зывается поверхностным сопротивлением и измеряется в Ом/ $\square$. Алюминиевая дорожка толщиной 1 мкм имеет поверхностное сопротивление 30 Ом/ $\square$. Это означает, что участок дорожки шириной 5 мкм и длиной 50 мкм (что эквивалентно 10 квадратам) имеет сопротивление 0.3 Ом. Для получения меньшего сопротивления и лучшей устойчивости к электромиграции в передовых технологиях используется медь (Cu) или золото (Au).

Более сложные биполярные ИС, такие как логические матрицы или память не могут обойтись только одним слоем металлизации. Используя изолирующие слои, нанесённые между слоями металлизации, становится возможным реализовать многослойную разводку схемы. Контактные отверстия между слоями металлизации называются сквозными межсоединениями. Они создаются точно так же, как и контактные окна для соединения с кремнием.

В отличие от структуры, приведенной на **Рис. 1.7**, в современных биполярных схемах можно обнаружить два нововведения: это использование оксидной изоляции соседних транзисторов и использование выводов базы и эмиттера из поликремния (**Рис. 1.8**). Обе разработки привели к значительному уменьшению размеров и, как следствие, к уменьшению паразитных ёмкостей и сопротивлений, что сделало возможным изготовление более быстродействующих схем. Кроме того, использование контактов эмиттера из поликремния привело к улучшению характеристик транзистора.

Очевидно, что биполярные ИС должны включать в себя не только транзисторы, но и другие элементы, которые можно реализовать, используя легированные области по отдельности либо в сочетании. В качестве диода можно задействовать переход база—эмиттер (возможно при закороченном переходе база—коллектор для увеличения прямого тока) или контакт алюминия с n^- -областью. Конденсатор можно получить, используя *p-n*-переход в обратном смещении (см. **Рис. 1.4, г**) или слой диоксида кремния в качестве диэлектрика между обкладками из n^+ -области и алюминия. Резисторы можно получить, используя легированные области заданных размеров, электрически изолированные от окружающих элементов обратным смещённым *p-n*-переходом (см. **Рис. 1.3**). При использовании высоко легированных

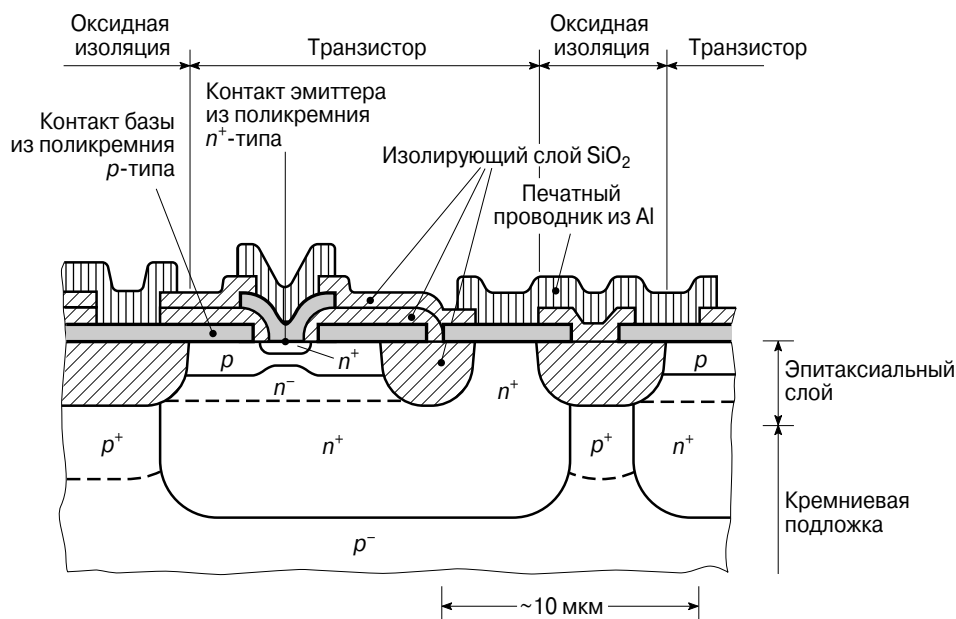


Рис. 1.8. Строение интегрального биполярного n - p - n -транзистора с контактами базы и эмиттера, изготовленными из поликремния.

областей n^+ (см. **Рис. 1.7**) можно получить удельные сопротивления в диапазоне от 2 до 40 Ом/ , в то время как обычное легирование позволяет получить сопротивление в диапазоне от 100 до 300 Ом/ . Из **Рис. 1.7** видно, что если ток протекает горизонтально через узкую зону базы под эмиттером, то этот участок имеет сопротивление порядка 5 Ом/ (пинч-резистор), кроме того, данное сопротивление нелинейно и имеет малое напряжение пробоя (5...8 В). С другой стороны, это предоставляет возможность управлять величиной сопротивления, прикладывая положительное напряжение к n^+ -области эмиттера (полевой транзистор с управляющим p - n -переходом). Большие значения сопротивлений порядка МОм/ могут быть получены путём создания поликремниевых структур с низкой степенью легирования на подложке из диоксида кремния (SiO_2).

В заключение следует отметить, что биполярные p - n - p -транзисторы могут быть изготовлены на том же самом кристалле, но их структура будет отличаться от приведённой на **Рис. 1.7**. Если убрать скрытый слой под коллектором, то мы получим вертикальную структуру p - n - p -транзистора (подложечный p - n - p -транзистор). Ещё одно решение — расположить две легированные области p -типа на расстоянии нескольких микрометров внутри кармана n -типа (латеральный p -

n - p -транзистор). Обе структуры p - n - p -транзисторов, изготовленные на одном кристалле, имеют значительно более низкие значения коэффициента усиления по току и максимальной рабочей частоты, чем изготовленные на том же кристалле n - p - n -транзисторы. Но p - n - p -транзисторы могут изготавливаться без дополнительных этапов производства, что обеспечивает преимущества при их использовании в некоторых приложениях (например в микросхемах интегральной инжекционной логики ($\text{И}^2\text{Л}$)).

Технология изготовления биполярных схем

Биполярные ИС используются как в аналоговых, так и в цифровых схемах. В то время как в аналоговых схемах биполярные транзисторы работают в режиме усиления, в цифровых схемах они функционируют как ключи, находясь в одном из двух состояний: в режиме отсечки и в режиме насыщения.

Биполярные схемы имеют следующие преимущества перед МОП-схемами:

- возможность управления большими токами;
- наличие высокостабильного и воспроизводимого порогового напряжения в виде прямого падения напряжения база—эмиттер, составляющего 0.7 В;
- малое время переключения или высокая рабочая частота биполярных транзисторов.

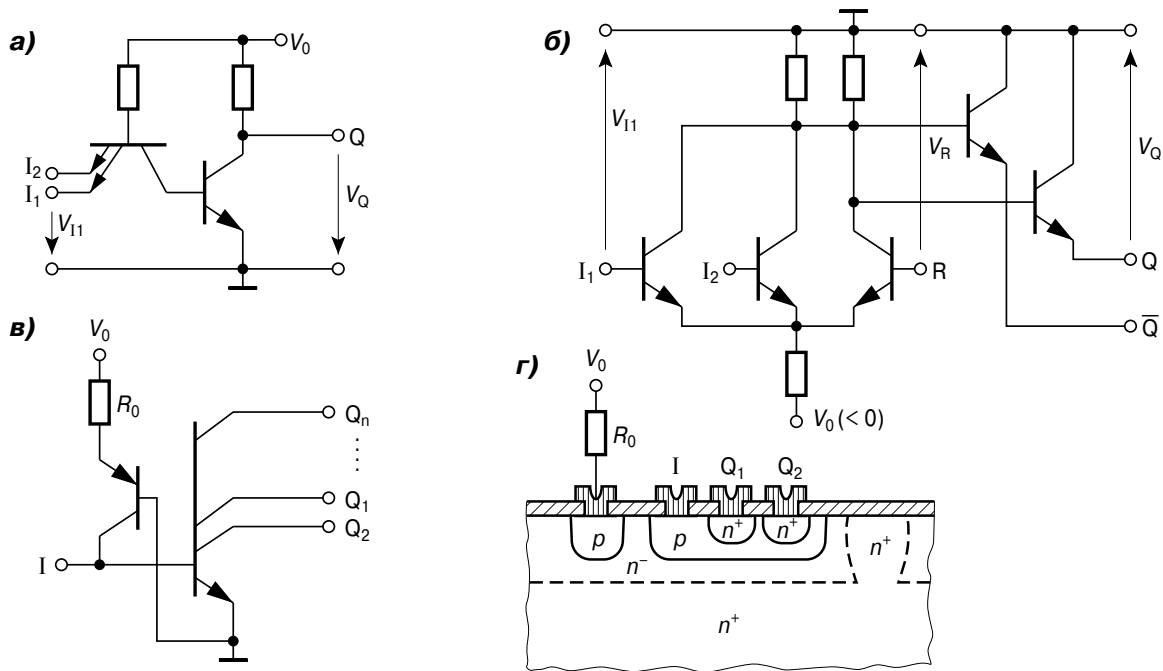


Рис. 1.9. Элементарные вентили, выполненные по технологии ТТЛ (а), ЭСЛ (б) и И²Л (в и г).

Несмотря на большое разнообразие типов и областей применения, аналоговые схемы чаще всего состоят из относительно простых базовых схем, уже знакомых нам по схемам на дискретных компонентах. Вместе с тем, чаще применяются базовые схемы, которые сильнее выигрывают при переходе на интегральную технологию, при которой характеристики элементов схемы и температура кристалла подвержены лишь ограниченному случайным изменениям, а состояние поверхности кристалла и величина сопротивлений поддерживаются с высокой точностью. Здесь необходимо упомянуть токовые зеркала и дифференциальные усилители, а также умножители и операционные усилители. С помощью биполярной технологии наиболее эффективно осуществляется интеграция оконечных усилительных каскадов, которые имеют низкое выходное сопротивление. В случае цифровых схем (логические микросхемы и микросхемы памяти) может быть выделено несколько семейств по типу элементарного вентиля. Наиболее важными семействами логических ИС являются ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика), ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) и И²Л (интегральная инжекционная логика).

На Рис. 1.9 показаны элементарные ТТЛ-, ЭСЛ- и И²Л-вентили. На Рис. 1.9, а приведена схема ТТЛ-элемента И-НЕ,

на Рис. 1.9, б — схема ЭСЛ-элемента ИЛИ/ИЛИ-НЕ, а на Рис. 1.9, в — схема И²Л-инвертора. Микросхемы ЭСЛ характеризуются чрезвычайно высоким быстродействием. Возможная задержка на логическом элементе составляет порядка 100 пс. Необходимо отметить, что технология И²Л характеризуется меньшими размерами и энергопотреблением, но она медленнее, чем ЭСЛ-технология.

1.3.2. Интегральные МОП-микросхемы

МОП-транзисторы

n-канальный МОП-транзистор состоит из двух областей *n*-типа (стока и истока), между которыми находится область канала *p*-типа, а над ней расположен изолированный управляющий электрод — затвор.

На Рис. 1.10 представлена структура МОП-транзистора и принцип его действия. На Рис. 1.10, а показаны процессы, происходящие в транзисторе при приложении к нему напряжения, на Рис. 1.10, б — график распределения потенциала вдоль поверхности кристалла кремния и электронный ток от истока к стоку. На Рис. 1.10, в приведено графическое обозначение МОП-транзистора. Вывод V_{BS} , как правило, не изображается. Буква *n* ставится для *n*-канальной структуры. Аналогично биполярному транзистору, управление током через МОП-

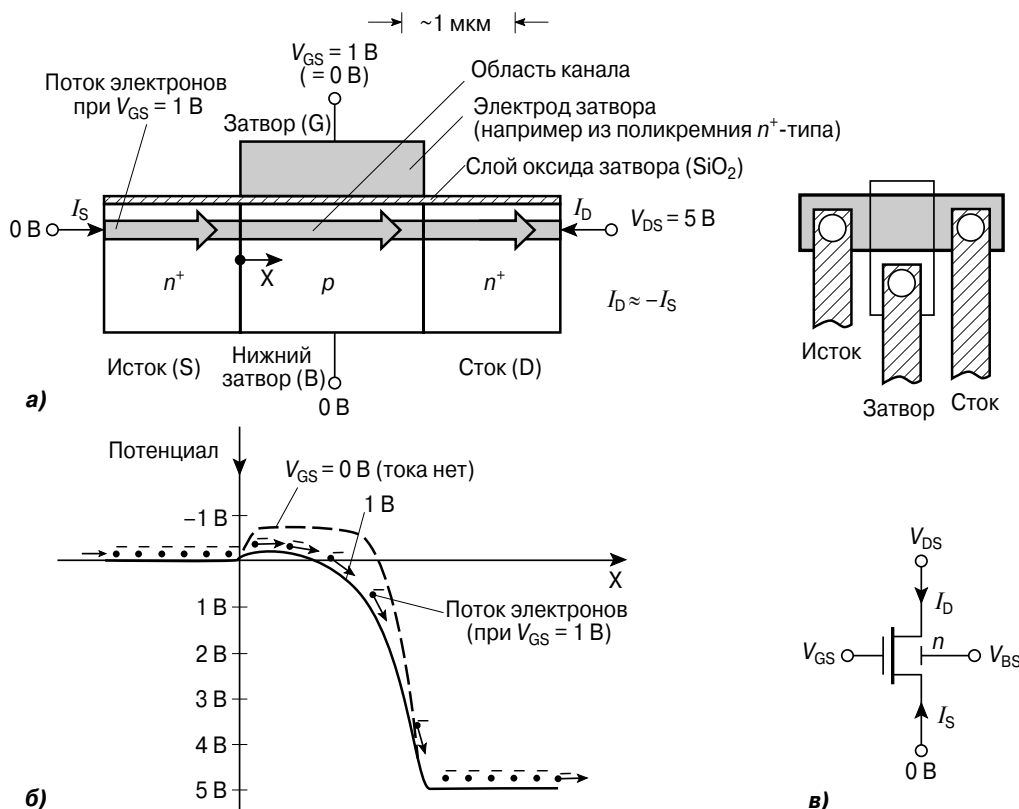


Рис. 1.10. Структура (а), принцип работы (б) и графическое изображение (в) МОП-транзистора.

транзистор осуществляется соответственно увеличением или уменьшением напряжения между затвором и истоком. Однако отличие от биполярного транзистора состоит в том, что управляющее напряжение приложено к изолированному электроду затвора над p -областью, а не к самой p -области. На

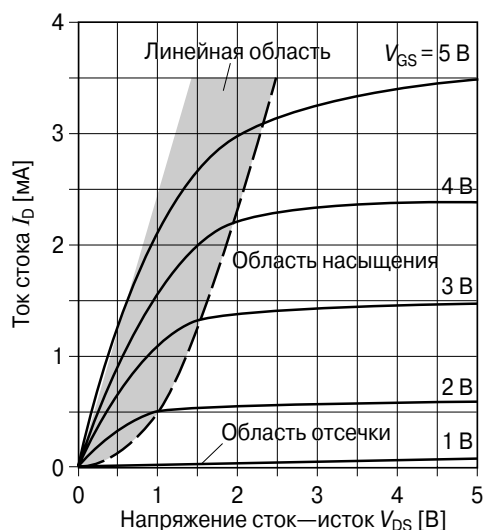


Рис. 1.11. Характеристики n -канального МОП-транзистора.

Рис. 1.11 представлено семейство характеристик. Они построены для транзистора с толщиной оксида затвора 20 нм, длиной канала 1 мкм и шириной канала 10 мкм. Различные механизмы управления также влияют на существенную разницу в поведении МОП-транзистора в сравнении с биполярным:

- Поскольку затвор изолирован, ток через него не течёт. Это означает, что при управлении МОП-транзистором не потребляется мощность. Ток через затвор течёт только при переключениях и заряжает или разряжает ёмкость перехода исток—затвор.
- Поскольку положительное напряжение на затворе притягивает к поверхности кристалла кремния электроны, влияющие на величину тока от истока к стоку, а с другой стороны, дырки, присутствующие в избытке в p -области, отталкиваются от поверхности (зона объёмного заряда), то токовый канал вместе с n^+ -областями истока и стока электрически изолирован от окружающей p -области (снизу и по сторонам — зоной объёмного заряда, а сверху — подзатворным диэлектриком). Так как затвор тоже изолирован, МОП-транзистор представляет со-

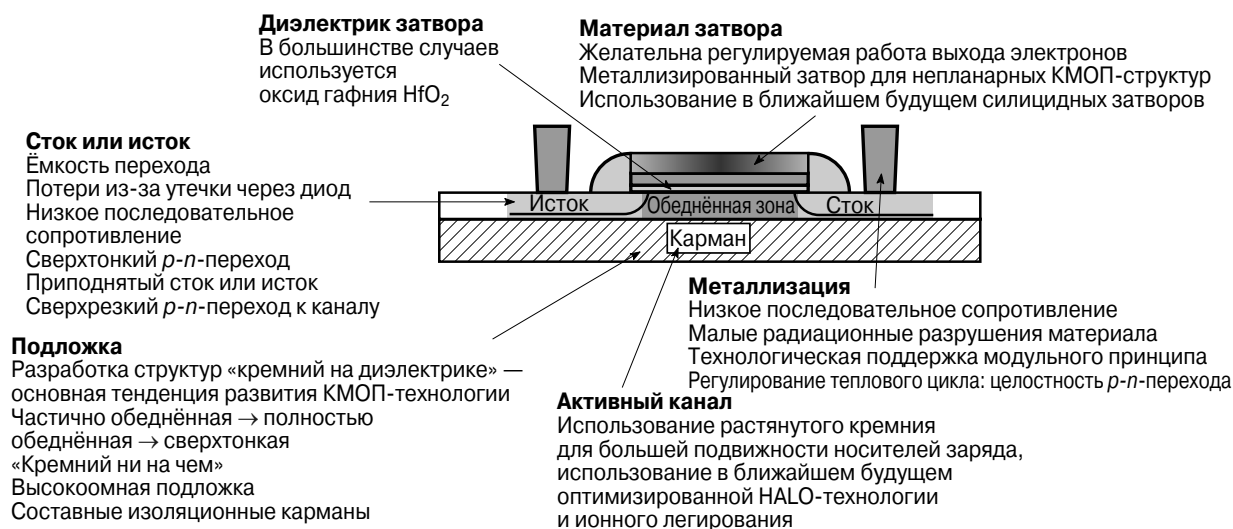


Рис. 1.12. Усовершенствования в критических областях при постоянном уменьшении размеров структуры.

бой самоизолирующийся, а следовательно, компактный компонент, что очень важно для интегральных схем.

- Падение части управляющего напряжения затвора на подзатворном оксиде и области объёмного заряда, расположенной под затвором, сильно зависит от концентрации легирующей примеси. Поэтому напряжение, при котором начинает протекать ток (пороговое напряжение), для биполярного транзистора почти не зависит от технологии производства и составляет около 0.7 В, а в случае МОП-транзисторов — оказывается зависимым от технологии изготовления. Поскольку размеры структуры малы, пороговое напряжение зависит от длины и ширины канала (что является недостатком). С другой стороны, появляется возможность варьировать пороговое напряжение транзисторов (преимущество). Например, внедрение фосфора в область канала n -канального транзистора может использоваться для смещения порогового напряжения в область отрицательных значений.
- По той же причине (падение напряжения на подзатворном диэлектрике) крутизна передаточной характеристики $\Delta I_D / \Delta V_{GS}$ при сопоставимых условиях меньше, чем крутизна $\Delta I_C / \Delta V_{BE}$ биполярного транзистора. Сопротивление насыщения открытого МОП-транзистора

больше, чем биполярного (сравните характеристики на **Рис. 1.6** и **Рис. 1.11**). По этой причине МОП-транзисторы меньше подходят для использования в качестве драйверов тока.

- Параллельно с непрерывным сокращением размеров структуры происходит усовершенствование всех критических областей МОП-транзистора (**Рис. 1.12**). За счёт снижения управляющего напряжения (с 5 до 3.3 В, и до ≈ 1 В) была снижена мощность, потребляемая при переключениях. В будущем, при уменьшении толщины оксидного подзатворного слоя, благодаря применению новых материалов будут улучшены характеристики транзистора с коротким каналом. При использовании для изготовления затвора материалов с низким активным сопротивлением повышается скорость переключения транзисторов. Путем оптимизации состава легирующих примесей были уменьшены паразитные сопротивления и расширены рамки применимости устройств. В совокупности все улучшения приведут к тому, что КМОП-схемы, особенно КМОП-схемы «кремний на изоляторе» (КНИ, *англ.* SOI — Silicon-On-Insulator), также станут использоваться на более высоких частотах, там где раньше применялись только биполярные схемы и схемы на базе соединений $A^{III}B^V$ (**Рис. 1.13**).

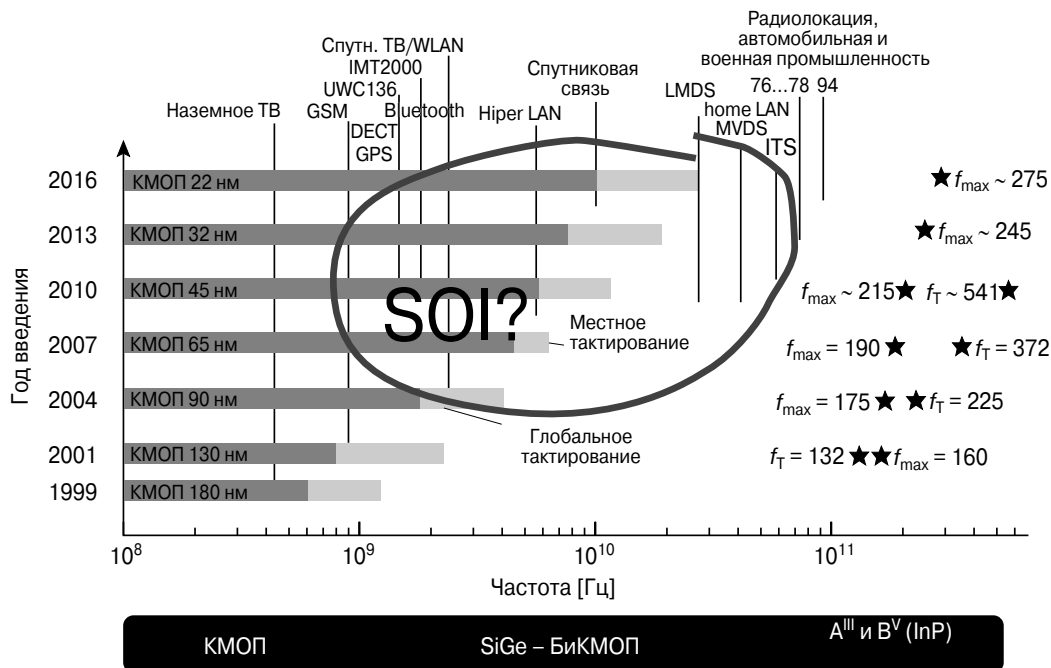


Рис. 1.13. Цифровые ИС заменяют аналоговые ВЧ ИС.

МОП-схемы

Интегральные МОП-схемы состоят из множества МОП-транзисторов, расположенных рядом друг с другом на кристалле кремния и соединённых металлическими проводниками в соответствии с требуемыми функциями схемы.

На Рис. 1.14 представлена типовая структура n -канального транзистора и непосредственно окружающей его области в МОП ИС. Электрически транзистор является полностью симметричным; сток и исток взаимозаменяемы. В этом примере предполагается, что область стока связана с поликремниевой «проводящей дорожкой» при помощи алюминиевой проводящей дорожки.

Как уже упоминалось, МОП-транзистор является самоизолирующимся элементом схемы. Необходимо только, чтобы слой оксида между соседними транзисторами был толще, чем оксидный слой затвора — благодаря этому проводящая дорожка, проходящая над слоем оксида, не сможет действовать как управляющий электрод, наводя проводящий канал между транзисторами. В результате данная структура становится более компактной по сравнению с интегральным биполярным транзистором (см. Рис. 1.7 и Рис. 1.8). Дополнительное снижение объёма появляется из-за того, что нет необходимости обеспечивать контакт с проводящей дорожкой отдельно для каждо-

го стока, затвора или истока. Вместо этого можно реализовать электрические соединения путём продления области истока или стока или электрода затвора соответствующим образом за границы области транзистора. Однако сопротивление таких проводящих дорожек примерно в тысячу раз выше, чем у алюминиевых проводящих дорожек (примерно 30 Ом/). Можно снизить сопротивление слоя на порядок (около 3 Ом/) при помощи силицидных слоев (например, $TaSi_2$, $MoSi_2$, $TiSi_2$). Кремниевые или силицидные n^+ -дорожки применяются для экономии места в МОП-схемах при организации соединения с землёй.

В зависимости от приборов, расположенных на кристалле — только n -канальные транзисторы или только p -канальные транзисторы или n -канальные и p -канальные транзисторы, — мы имеем дело с n -МОП или p -МОП или КМОП-схемами соответственно. В настоящее время КМОП является доминирующей технологией, потому что она имеет меньшее энергопотребление и предоставляет разработчикам схем множество дополнительных возможностей.

Если n -канальные транзисторы КМОП-схемы формируются в подложке p -типа, как показано на Рис. 1.15, то p -канальные транзисторы должны размещаться в n -карманах, поскольку для самоизоляции p -канальных транзисторов требуется n -область.

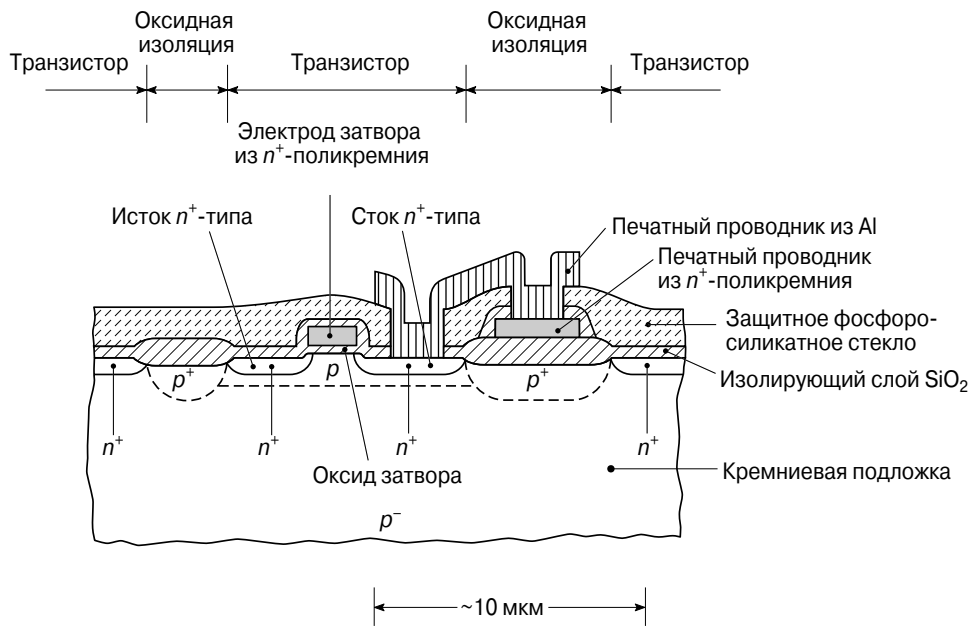


Рис. 1.14. Типовая структура n -канального МОП-транзистора.

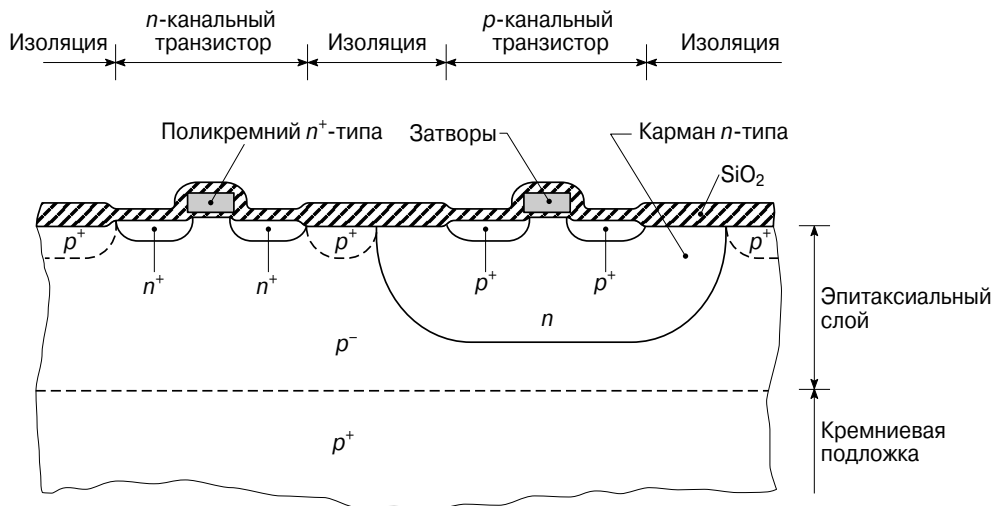


Рис. 1.15. n - и p -канальные транзисторы в КМОП-схеме.

Для того чтобы постоянно поддерживать p - n -переходы карманов в закрытом состоянии, к любой p -подложке или p -карману прикладывается самый низкий потенциал в схеме (в общем случае 0 В), тогда как любая n -подложка или n -карманы должны иметь самый высокий потенциал в схеме (V_{DD}).

Для того чтобы избежать влияния помех (например, защелкивания), предпочтительнее использовать слабо легированный эпитаксиальный слой на сильно легированной подложке, а не слабо легированную подложку.

Как и в случае с биполярными схемами, использование МОП-схем позволяет реа-

лизировать диоды, резисторы и конденсаторы соответствующим расположением легированных областей, а также проводящих и изолирующих структур. Например, тонкий слой оксида затвора позволяет получить относительно высокую удельную ёмкость, требуемую в микросхемах памяти. Возможность реализации памяти ЭСПЗУ при помощи плавающего затвора будет обсуждаться позже.

С помощью нескольких дополнительных технологических операций можно совместить на одном кристалле как МОП- так и биполярные транзисторы (технология БиКМОП).

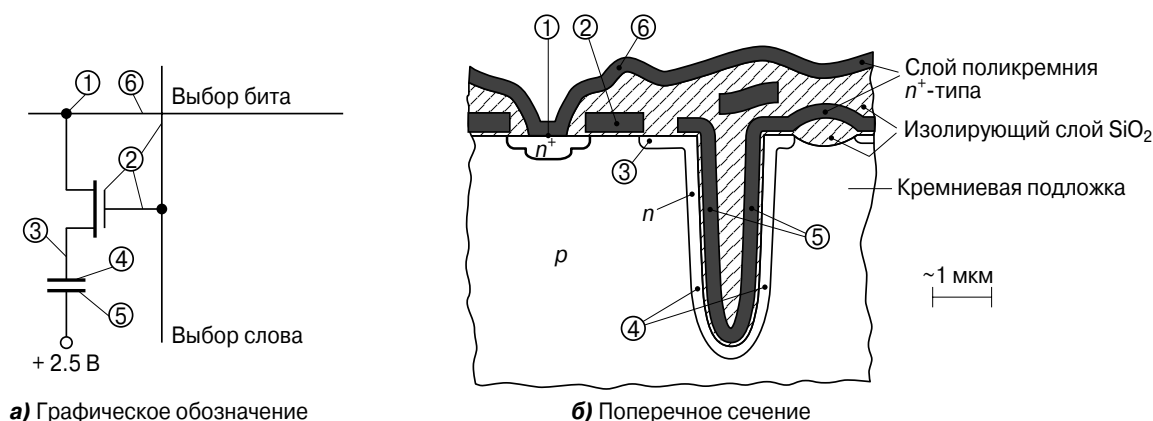


Рис. 1.16. Ячейка динамической памяти.

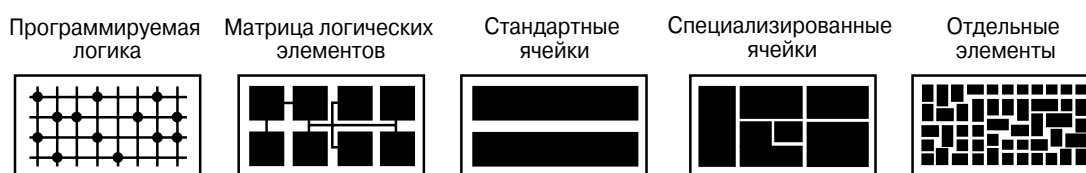


Рис. 1.17. Методы разработки специализированных ИС.

Технология изготовления МОП-схем

МОП-схемы используются, главным образом, в цифровых схемах. Однако на МОП-структурах все чаще реализуются и аналоговые функции. Благодаря компактности МОП-транзисторов, МОП-схемы преобладают среди ИС высокой степени интеграции. Здесь из-за малого энергопотребления и удобства разработки преобладает КМОП-технология.

При разработке схем различают стандартные и специализированные ИС. Стандартные ИС, такие как модули памяти (динамическая память, Рис. 1.16) или микрокомпьютерные устройства (микроконтроллеры, микропроцессоры, периферийные модули) разрабатываются по классической методике, в случае же специализированных ИС используется усовершенствованный процесс разработки, который обращается к ранее разработанным базовым схемам с определёнными функциями. На Рис. 1.17 показаны различные методы разработки, которые применяются в настоящее время для создания специализированных ИС. Чем больше разработано базовых схем с использованием стандартизованных базовых функций, тем выше уровень рационализации процесса разработки. Все большее значение приобретают стандартные ячейки, которые собираются в библиотеки. На Рис. 1.19 по-

казан пример стандартной ячейки — логический элемент И-НЕ.

На Рис. 1.19, а приведена принципиальная схема ячейки памяти, а на Рис. 1.19, б показана её топология. Для уменьшения размеров, необходимых для заданного объёма памяти, в приведенном выше примере ячейки динамического ОЗУ конденсатор продлевается вниз, в область кремниевой подложки, приблизительно на 4 мкм.

Увеличение ёмкости памяти ячеек динамического ОЗУ происходит в вертикальном направлении, как вниз (канавки), так и вверх (стеки) от транзистора. В обоих случаях целью является достижение как можно большей ёмкости памяти — и, следовательно, обеспечение достаточной помехоустойчивости — в пределах наименьшей возможной площади. Использование третьего измерения для указанного увеличения объёма памяти связано с накоплением значительного производственного опыта, позволившего получать чрезвычайно высокие значения соотношений ширина/глубина, а также изготавливать специальные материалы, толщина слоёв которых составляет всего несколько атомов.

Кроме устройств памяти, таких как динамическое и статическое ОЗУ, важную роль играет энергонезависимая память. В энергонезависимой памяти для сохранения данных используются либо изменения в кристаллической структуре, либо накоп-

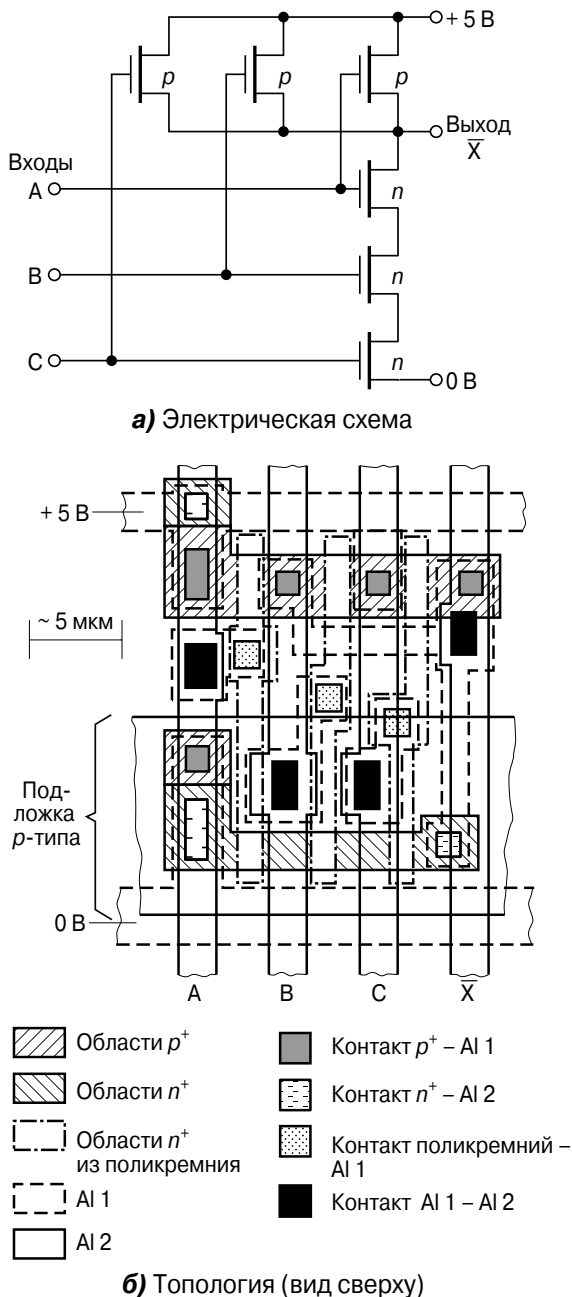


Рис. 1.19. Элемент 3-И-НЕ в качестве примера стандартной ячейки.

ление заряда в изолированной (режим чтения) области.

К энергонезависимой памяти, в частности, относятся:

- ЭППЗУ (EPROM) — электрически программируемое ПЗУ;
- ЭСППЗУ (EEPROM) — электрически программируемое и стираемое ПЗУ;
- флэш-память (FLASH) — разновидность памяти ЭСППЗУ, отличающаяся программированием и технологией изготовления схемы, а также компактностью;

- NROM — элемент памяти, в котором заряд накапливается в слое диэлектрика, а не в проводящем слое;
- FeRAM — резистивное запоминающее устройство, в котором данные хранятся в кристаллической решетке ферроэлектрика (сегнетоэлектрика);
- MRAM — данные хранятся в структуре магнитного сопротивления;
- PRAM — память с фазовым переходом (параметрическое ОЗУ);
- OUM (Ovonyx United Memory) — данные хранятся в структуре халькогенидного кристалла, которая программируется посредством нагревания;
- Polymer — данные хранятся в слое полимера — принцип, схожий с OUM;
- Quantum dots — квантовые точки (применимость пока не определена).

Основное преимущество энергонезависимой памяти заключается в том, что даже если батарея или источник питания перестает действовать, данные в памяти сохраняются. По этой причине энергонезависимая память используется в таких важных областях, как мобильная телефония, цифровые камеры и смарт-карты.

Работа элементов памяти, выполненных на базе ЭСППЗУ/флэш/NROM, основана на изменении порогового напряжения транзистора с помощью изолированного заряда в области затвора (**Рис. 1.18**).

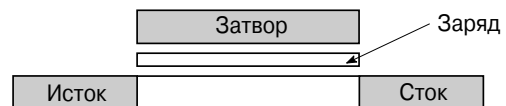


Рис. 1.18. Структура ячейки памяти типа ЭСППЗУ, флэш или NROM.

Этот заряд изменяется во время записи или удаления данных посредством горячих носителей заряда или туннельных токов. В обоих случаях требуются относительно высокие напряжения или уровни энергии. По этой причине важной задачей при разработке является оптимизация условий стирания и программирования.

Другие типы энергонезависимой памяти основаны, главным образом, на изменении сопротивления соответствующего слоя, которое осуществляется при помощи электрических полей или нагревания.

1.4. Другие полупроводниковые приборы

В рамках этой книги невозможно подробно рассмотреть все типы полупроводниковых приборов. Поэтому далее приводится краткое описание некоторых из них. При этом основное внимание будет уделено их техническому и историческому значению. Дополнительную информацию можно найти в Глоссарии (см. главу 16).

1.4.1. Полупроводниковые приборы без специальной структуры

Большинство полупроводниковых приборов имеют специально созданные структуры, например поверхностный слой, или работают на полевом эффекте, но могут использоваться и другие свойства полупроводниковых материалов.

Позисторы

Большинство проводников являются термисторами, т.е. их проводимость изменяется с изменением температуры. Однако, в общем случае, значение температурного коэффициента их проводимости составляет менее 1%/К. Простые задачи измерения и регистрации температуры требуют использования приборов с большим температурным коэффициентом. При изучении одного из керамических материалов (титанита бария), который в конце 30-х годов прошлого века использовался для производства конденсаторов, было обнаружено, что он проявляет полупроводниковые свойства при легировании определёнными материалами. Важное свойство данного материала состояло в том, что при температурах выше точки Кюри наблюдался резкий скачок значения температурного коэффициента. Приборы, в которых используется этот материал, были названы позисторами (термисторами с положительным температурным коэффициентом, РТС — Positive Temperature Coefficient). Они входят в семейство термисторов (терморезисторов). Начиная с 1963 года стало возможным изменять температуру Кюри, вследствие чего стали изготавливать термисторы с различными характеристиками. Современные позисторы состоят из сплавов карбоната бария и некоторых оксидов металлов. Начиная с конца 60-х годов прошлого века, в качестве мате-

риала для позисторов использовался легированный кремний. Позисторы применяются в основном как датчики температуры.

Негисторы

В 1941 году при исследовании магнитного феррита неожиданно были обнаружены смеси, проводимость которых увеличивалась с ростом температуры. Термисторы, изготовленные из таких материалов, называются негисторами (термисторами с отрицательным температурным коэффициентом, NTC — Negative Temperature Coefficient). Несмотря на то что полупроводниковые материалы также обладают отрицательным температурным коэффициентом, они не могут использоваться в качестве резисторов из-за сильной нелинейности характеристик. Негисторы применяются в качестве датчиков температуры или при последовательном включении с позисторами для их защиты от пусковых токов при низких температурах.

Варистор

На практике, в большинстве случаев сопротивление не зависит от напряжения (при постоянной температуре). С другой стороны, в варисторах (от *англ.* varistor (variable resistor) — переменный резистор) существует зависимость омического сопротивления от напряжения, в некоторых случаях — сильная. Как правило, сопротивление варистора уменьшается с увеличением напряжения, и данная характеристика является симметричной (т.е. варисторы не имеют ярко выраженной полярности). Для производства первых варисторов использовался карбид кремния. Сегодня варисторы преимущественно изготавливаются из оксидов металла, например оксида титана или оксида цинка, которые в общем случае имеют более высокую крутизну характеристики. В результате спекания материала образуется множество отдельных зёрен, на границах которых и проявляется варисторный эффект. Таким образом, варистор обычно состоит из множества последовательно и параллельно соединённых микроваристоров. В основном, варисторы используются для защиты схем или отдельных компонентов от перенапряжений. Металлооксидные варисторы могут также использоваться для стабилизации напряжения.

Фоторезисторы

Фотоэлектрический эффект, открытый Альбертом Эйнштейном, проявляется в полупроводниках, когда падающие фотоны имеют достаточную энергию для высвобождения валентных электронов из узлов кристаллической решетки. Эти подвижные свободные носители заряда увеличивают внутреннюю проводимость материала до тех пор, пока они не рекомбинируют после дрейфа в течение большого или малого промежутка времени. Данный эффект сделал возможным появление фоторезисторов. Они состоят из смешанных кристаллов, не имеют p - n -перехода и изготавливаются из селенида кадмия или сульфида кадмия, сопротивление которых резко уменьшается при падении на них видимого света. Такими же свойствами обладают структуры, состоящие из сульфида свинца или антимонида индия, при падении на них инфракрасного излучения.

1.4.2. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковые диоды имеют граничный слой и могут использоваться не только в качестве диода, но также и для других целей.

Туннельные диоды (диоды Эсаки)

В 1954 году Уильям Шокли выдвинул предположение, что в некоторых материалах скорость миграции электронов будет уменьшаться под воздействием сильных электрических полей. Компонент с такими свойствами будет иметь на вольтамперной характеристике участок с отрицательным наклоном, т.е. отрицательное дифференциальное сопротивление. В 1958 году, японский инженер Лео Эсаки (Leo Esaki) подтвердил идею Шокли при проведении экспериментов с сильно легированными p - n -переходами. Из-за малой толщины граничного слоя, которая является следствием высокой степени легирования, даже при малых напряжениях (при которых диффузионный ток будет фактически равен нулю) возникает электрическое поле большой напряжённости. Это сильное электрическое поле изначально обеспечивает возникновение так называемого туннельного эффекта — явления квантовой механики, при котором электроны в определённом направлении «пробиваются» через граничный слой. С увели-

чением напряжённости электрического поля туннельный эффект фактически исчезает, таким образом возникает спад тока (см. **Рис. 1.20**). Первый туннельный диод для

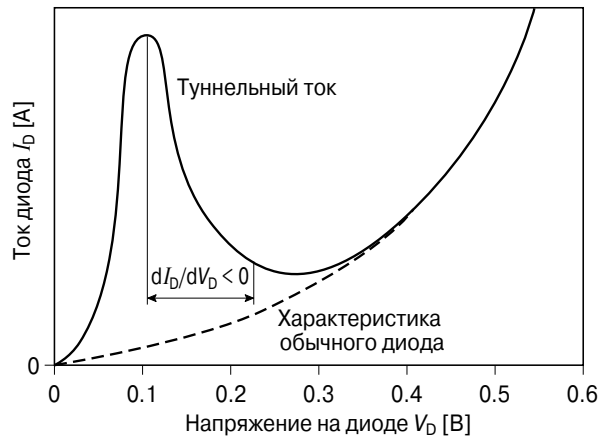


Рис. 1.20. Вольтамперная характеристика туннельного диода.

микроволновой техники появился на рынке в 1960 году. В 1973 году Эсаки, совместно с американцем Иваром Гайвером (Ivar Giaever), исследовавшим явление туннельного эффекта в полупроводниках, был награждён Нобелевской премией по физике.

Варикапы

Как видно из названия, варикап — это диод с изменяемой ёмкостью p - n -перехода. Данное свойство основывается на нелинейности характеристик слоя p - n -перехода: с увеличением обратного напряжения зона перехода становится шире, что приводит к снижению ёмкости. Если используется подходящий профиль распределения легирующей примеси, то ёмкость перехода может изменяться в широком диапазоне (см. **Рис. 1.21**). Одним из примеров применения варикапов является их использование в качестве подстроечного диода в высокочастотных схемах.

Стабилитроны (диоды Зенера)

Во время исследования запирающих свойств p - n -переходов К. Зенер (C. Zener) обнаружил, что при определённой степени легирования резко снижается напряжение пробоя, выше которого резко возрастает обратный ток. Указанный эффект был обусловлен тем, что при приложении высокого напряжения (напряжения Зенера) свобод-

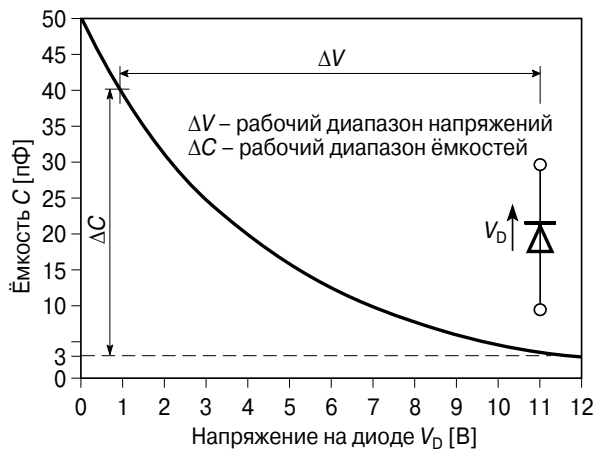


Рис. 1.21. Зависимость ёмкости p - n -перехода от напряжения на варикапе.

ные носители заряда переходили из валентной зоны в зону проводимости, резко увеличивая проводимость. Данный эффект в честь его открывателя называют эффектом Зенера или лавинным пробоем. При напряжениях, меньших напряжения пробоя (также называемого напряжением Зенера), которое составляет 1...50 В в зависимости от степени легирования, протекает только небольшой обратный ток (см. Рис. 1.22). Если

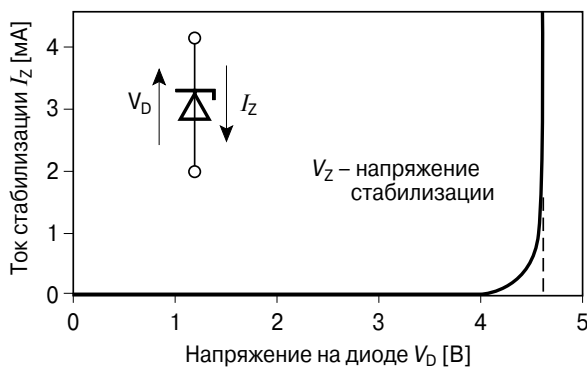


Рис. 1.22. Вольтамперная характеристика стабилитрона.

напряжение превышает напряжение пробоя (напряжение Зенера), то ток лавинообразно возрастает. Поэтому стабилитроны подходят для ограничения и стабилизации напряжения в электрических цепях.

Лавинные диоды

В лавинных диодах происходит лавинное усиление эффекта Зенера. Если напряжённость электрического поля и длина свободного пробега достаточно велики, то свобод-

ные носители заряда, высвобожденные благодаря эффекту Зенера, ускоряются до такой степени, что их кинетической энергии будет достаточно для того, чтобы позволить вторичным электронам перейти из валентной зоны в зону проводимости.

Диоды Шоттки

С разработкой планарной технологии производства полупроводниковых приборов стало возможным изготавливать диоды, состоящие из слоя полупроводника и слоя металла. Эти так называемые диоды с горячими носителями часто называют диодами Шоттки (в честь одного из пионеров полупроводниковой техники Вальтера Шоттки), или, более точно, диодами с барьером Шоттки. Их преимущества — сверхмалое время переключения, малый разброс параметров, низкий уровень шумов и высокая нагрузочная способность. Областью применения диодов Шоттки являются быстродействующие логические схемы.

Диоды Ганна

В 1963 году, во время исследований арсенид-галлиевых (GaAs) и фосфид-индиевых (InP) резисторов в исследовательской лаборатории IBM, английский физик Джон Ганн (John B. Gunn) обнаружил, что при напряжениях, превышающих определённое пороговое значение, уровень собственных шумов резисторов резко увеличивался вплоть до возникновения собственных колебаний. Этот эффект был назван эффектом Ганна в честь его открывателя, несмотря на то что он уже был теоретически описан Ридли (Ridley), Ваткинсом (Watkins) и Хилсумом (Hilsum). Данный эффект возникал из-за того, что при увеличении напряжённости поля свыше определённого значения носители заряда группируются в домены. Таким образом, снижается их подвижность. Как следствие, при протекании тока возникает колебательный дрейф частиц, который может использоваться в высокочастотных генераторах (в некоторых генераторах частота колебаний может превышать 100 ГГц). Не совсем корректно называть эти приборы диодами, поскольку диоды Ганна не имеют p - n -перехода, но они состоят из материала с различным уровнем легирования примесью n -типа.

Инжекционно-пролётные диоды

Так же как и туннельные диоды, диоды Ганна и лавинно-пролётные диоды, инжекционно-пролётные диоды (BARITT) имеют на вольтамперной характеристике участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В этих диодах происходит фактическая инжекция носителей заряда в область p - n -перехода. Они преимущественно используются в СВЧ схемах.

Лавинно-пролётные диоды

Лавинно-пролётный диод (IMPATT) — это полупроводниковый диод, работающий в зоне лавинного пробоя вольтамперной характеристики, когда в некоторых областях обеднённой зоны наряду с лавинным эффектом проявляется и ударная ионизация, так что с ростом прямого напряжения падает ток. Так же как туннельные диоды, диоды Ганна и инжекционно-пролётные диоды, эти диоды имеют на ВАХ участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Идея создания лавинно-пролётного диода была выдвинута еще в 1958 году В.Т. Ридом (W. T. Read), коллегой Уильяма Шокли, но её удалось реализовать только в 1964 году, когда группа учёных смогла предотвратить разрушение диода при появлении лавинного пробоя (группа учёных под руководством А. С. Тагера в Советском Союзе смогла добиться этого в начале 60-х годов прошлого века, но на западе эта разработка стала известна много позднее). Максимальная рабочая частота лавинно-пролётного диода составляет примерно 300 ГГц. Диоды этого типа могут пропускать большую по сравнению с диодами Ганна мощность (хотя у последних меньше уровень внутренних шумов). Данные диоды в основном используются в СВЧ схемах.

Лавинно-пролётный диод с захваченной плазмой

Лавинно-пролётный диод с захваченной плазмой (TRAPATT) — это полупроводниковая структура быстрого СВЧ диода. В нём используется эффект лавинного пробоя в захваченной плазме, одним из следствий которого является участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Диоды Баррасса

Диод Баррасса — это диод, излучающий электромагнитные волны в инфракрасном диапазоне в «обратном направлении», через отверстие в подложке (протравленном после изготовления диода). p - n -переход такого диода находится с нижней стороны подложки. Это создаёт чрезвычайно хорошие предпосылки для встраивания подобных диодов в волоконно-оптические кабели. Поскольку благодаря своему внутреннему строению эти диоды являются чрезвычайно быстродействующими, они используются при передаче данных в волоконно-оптических каналах связи.

Лавинные фотодиоды

Лавинные фотодиоды (APD) — это фотодиоды, работающие при обратном включении, когда генерируемый фототок высвобождает вторичные носители заряда, вызывающие лавинный пробой. Лавинный пробой подобного рода возникает при высоких напряжённостях электрического поля, но такое поле можно создать, только если соединительный слой будет однородным. Если в нём будут неоднородности, то появятся локальные пробои, и это не позволит создать поле с высокой напряжённостью. Поэтому процесс изготовления данных диодов представляет сложную технологическую задачу. Как следствие, лавинные фотодиоды большой площади встречаются редко и дороги в изготовлении. При использовании лавинных фотодиодов можно точно обнаружить даже очень слабое световое излучение.

Фотоэлектрические ячейки

Если энергия излучения проникает в область p - n -перехода, то образуются электронно-дырочные пары. Электроны под влиянием диффузии перемещаются в слой p -типа, а дырки — в слой n -типа. На контактах возникает фотоЭДС, и она может использоваться в качестве источника напряжения, т.е. в цепи будет протекать фототок, а фотоэлектрическая ячейка будет питать нагрузку энергией. С увеличением интенсивности излучения фотоЭДС будет возрастать по логарифмическому закону — сначала резко, затем асимптотически стремиться к диффузионному напряжению (см. Рис. 1.23). Примером использования фотоэлектрических ячеек являются экспонометры.

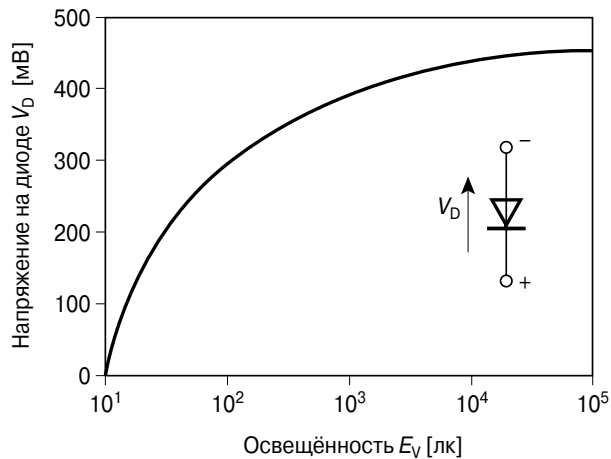


Рис. 1.23. Характеристика фотоэлектрической ячейки.

Солнечные фотоэлементы

Фотоэлектрические ячейки с большой площадью поверхности называются солнечными фотоэлементами. Такие структуры позволяют получать электрическую энергию из солнечного света при помощи фотоэлектрического преобразования.

1.4.3. Транзисторы

Появление транзисторов произвело революцию в электронике. Без них множество инновационных изобретений и разработок было бы невозможным.

Однопереходный транзистор

Даже при использовании только одного p - n -перехода можно создать структуру транзисторного типа. Такая структура называется однопереходным транзистором (UJT), она аналогична полевому транзистору с управляющим p - n -переходом, но имеет два устойчивых состояния. Если к управляющему электроду транзистора приложено достаточно большое напряжение (пороговое напряжение, которое пропорционально напряжению коллектора), то база переходит в проводящее состояние. Чаще всего однопереходные транзисторы применяются в релаксационных генераторах.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) — это гетероструктурные полевые транзисторы с обеднённым слоем. Канал полевого транзистора имеет

квантовую яму, которая создаёт двумерное (плоское) облако электронов с высокой подвижностью. Высокая подвижность электронов позволяет добиться высоких скоростей переключения. Поэтому данный транзистор целесообразно использовать в устройствах с короткими периодами и малым временем переключения.

Биполярный гетеротранзистор

Биполярный транзистор с гетеропереходами (HJBT) — это биполярный аналог полевого транзистора с высокой подвижностью электронов.

Резонансно-туннельный транзистор на горячих электронах

Резонансно-туннельный транзистор на горячих электронах (RHET) — это специальный тип транзистора, предназначенный для СВЧ устройств. В основе его принципа действия лежит квантово-механический туннельный эффект «горячих электронов», которые представляют собой свободные электроны с кинетической энергией, значительно превышающей значение kT (где k — постоянная Больцмана, а T — значение температуры в градусах Кельвина).

Транзисторы, управляемые одним электроном

Транзистор, управляемый одним электроном (SET), является новой разработкой, в которой операции переключения инициируются одним носителем заряда. Это снижает потери энергии на управление до сверхмалых значений. В настоящее время реализация такого принципа возможна только при очень низких температурах (порядка 100 K).

Тиристор (транзистор с коллекторной ловушкой)

Если n - p - n - и p - n - p -транзисторы соединены вместе таким образом, что коллектор каждого из них управляет базой другого, то мы получим структуру с двумя устойчивыми состояниями, которая перейдет в проводящее состояние, если на базу одного из транзисторов подать достаточно большой управляющий импульс. Структуру подобного типа можно также изготовить в виде одного устройства с тремя выводами — анодом, катодом и управляющим электродом.

Это устройство называется тиристором (от *англ.* thyristor — *thyr* = дверь и *transistor*), оно применяется для коммутации больших токов (см. **Рис. 1.24**). Первый тиристор был

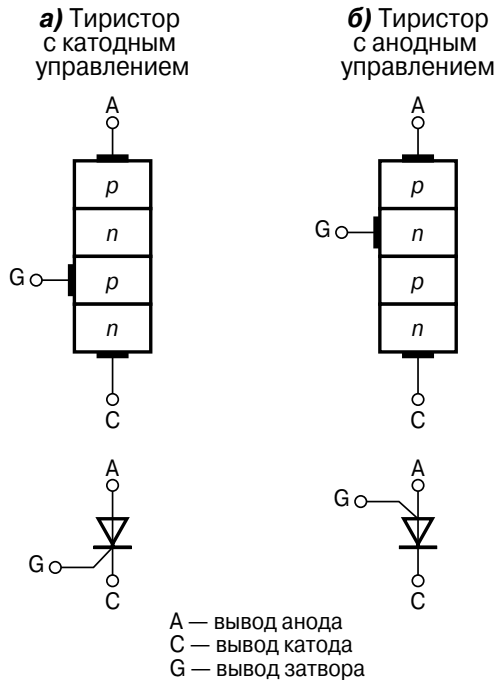


Рис. 1.24. Структура тиристора.

создан компанией Radio Corporation of America (RCA). Тиристор также часто называют кремниевым управляемым диодом (от *англ.* Silicon Controlled Rectifier — SCR). Данный прибор обладает односторонней проводимостью, но можно соединить встречно-параллельно два тиристора, и тогда получится двусторонний ключ. Обычно тиристоры выключаются при уменьшении приложенного к ним напряжения ниже рабочего уровня, но существуют также и тиристоры с запирающим электродом — в этом случае тиристор отключается током, обратным току управления. Такие запираемые тиристоры называются GTO (от *англ.* Gate-Turn-Off).

1.4.4. Другие интегральные полупроводниковые приборы

Приборы с зарядовой связью (ПЗС)

Приборы с зарядовой связью (CCD) — это переключательные приборы, имеющие МОП-структуру, в которых шаговые заряды переносятся при помощи близко расположенных МОП-конденсаторов (они также

называются приборами с переносом заряда типа «пожарная цепочка»). В результате становится возможным создание сдвигового регистра для аналоговых сигналов. Принцип использования зарядовой связи открыли в 1970 году два сотрудника лаборатории Белла, У. Бойль (W.S. Boyle) и Дж. Смит (G.E. Smith). Приборы с зарядовой связью используются, главным образом, в датчиках изображения.

Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ)

Информация из ПЗУ (ROM) может только считываться. На практике ПЗУ состоит из полупроводниковой матрицы, информация в которую заносится во время производства с помощью маски (шаблона), определяющей наличие соединений между двумя слоями (именно поэтому такие ПЗУ называются масочными). Как следствие, содержимое памяти такого типа неизменно.

Программируемые постоянные запоминающие устройства (ППЗУ)

Программируемое ПЗУ (PROM) состоит из полупроводниковой матрицы, в которой после изготовления не все ячейки имеют записанные с помощью маски значения, как это делается в случае с ПЗУ. Отдельные ячейки могут быть запрограммированы пользователем путём безвозвратного разрушения определённых соединений, используя программирующее напряжение. Последнее обычно создаётся внешним устройством (программатором), таким образом, содержимое памяти не может изменяться после его программирования.

Электрически программируемое ПЗУ (ЭППЗУ)

Электрически программируемое ПЗУ (EAROM) — это устройство, содержимое которого может быть изменено при помощи электрических сигналов. В отличие от электрически стираемого и программируемого ПЗУ (EEPROM), при его очистке удаляется только часть данных (как у флэш-памяти). Однако не все приборы данной памяти поддерживают возможность удаления отдельных ячеек. Эти устройства очень дороги и используются, только когда нет другой альтернативы.

2. ДИОДЫ И ТРАНЗИСТОРЫ

2.1. Высоочастотные диоды

В области высоких частот наиболее часто применяются $p-i-n$ -диоды, варикапы (диоды с изменяемой ёмкостью $p-n$ -перехода) и диоды Шоттки. На низких частотах все эти приборы обладают выпрямительными свойствами, а в области высоких частот используются совсем другие их характеристики.

Варикап и $p-i-n$ -диод — биполярные приборы, в то время как диод Шоттки является униполярным устройством; это означает, что ток в диоде Шоттки обусловлен только перемещением носителей заряда одного типа (как правило, электронов).

$p-i-n$ -диод имеет слабо легированную кремниевую (беспримесную) область собственной проводимости, расположенную между высоко легированными областями p - и n -типа. В случае необходимости сопротивление $p-i-n$ -диода может регулироваться в широких пределах при помощи тока или напряжения (см. **Рис. 2.1**). Поскольку граничная частота $p-i-n$ -диодов не превышает 100 МГц, то на более высоких частотах у этих диодов проявляются свойства линейного сопротивления. Так как сопротивление зависит от величины постоянной составляющей тока, то данный тип диода может использоваться в качестве ВЧ ключа, а также в качестве настраиваемого аттенюатора. Характерной особенностью этого диода

является то, что его ёмкость, а следовательно, и сопротивление на высоких частотах, сильно меняется при изменении полярности приложенного напряжения.

У варикапов используется изменение ёмкости обеднённой зоны (ёмкости перехода) при изменении обратного смещения. Этот тип диодов применяется для стабилизации частоты, например в генераторах, управляемых напряжением (ГУН). Конструктивно варикапы представляют собой диоды (см. **Рис. 2.2**), в которых профиль легирования определяет зависимость ёмкости $p-n$ -перехода от напряжения и, как следствие, резонансную частоту в резонансном контуре. В зависимости от формы профиля легирования варикапы можно разделить на диоды с резким и сверхрезким профилем; последние, в свою очередь, характеризуются чрезвычайно резким ростом ёмкости. На **Рис. 2.3** приведена типовая зависимость ёмкости $p-n$ -перехода от приложенного напряжения.

На высоких частотах прибором, выполняющим функции обычного диода, является диод Шоттки. Преимущество его униполярной конструкции с металлическим контактом, расположенным на слабо легированном кремнии (см. **Рис. 2.4**), заключается в наличии сверхмалой диффузионной ёмкости, в результате чего его граничная частота лежит далеко в гигагерцовом диапазо-

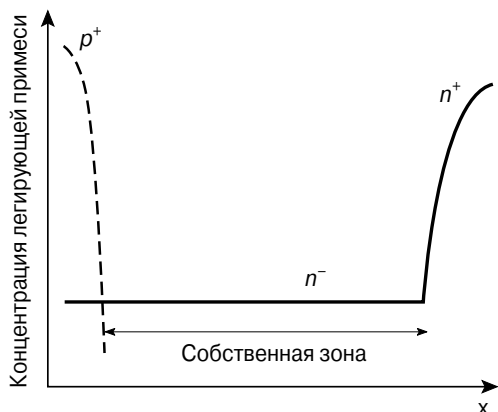


Рис. 2.1. Упрощённое представление легирующего профиля $p-i-n$ -диода.

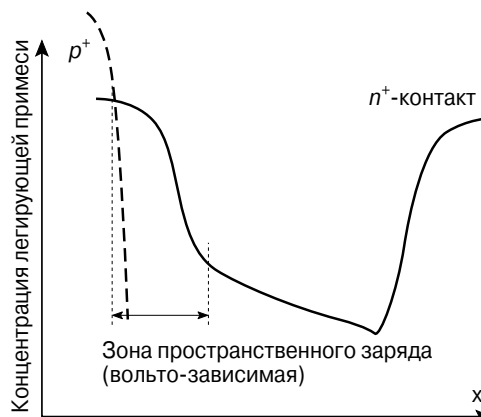


Рис. 2.2. Легирующий профиль варикапа.

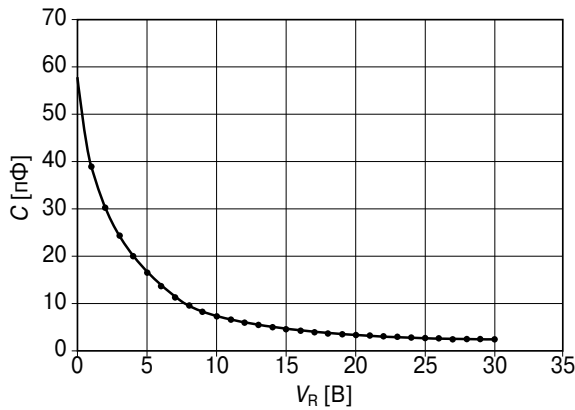


Рис. 2.3. Зависимость ёмкости варикапа ВВ639С от напряжения.

не. Дополнительным преимуществом данных диодов в различных приложениях является запирающее напряжение, которое значительно ниже, чем у p - n -диодов, и может изменяться за счет выбора металла. Диоды Шоттки используются в качестве детекторных и выпрямительных диодов, а также в диодных смесителях.

2.2. Время жизни носителей заряда и последовательное сопротивление ВЧ p - i - n -диодов

В этом разделе мы рассмотрим физические основы работы p - i - n -диодов, их основные конструктивные особенности и представим метод измерения времени жизни носителей заряда.

p - i - n -диоды преимущественно используются как переключаемые или управляемые резисторы для сигналов с частотой от верхней половины мегагерцового диапазона и до частот мобильной связи. На Рис. 2.5 схематически показана структура p - i - n -диода.

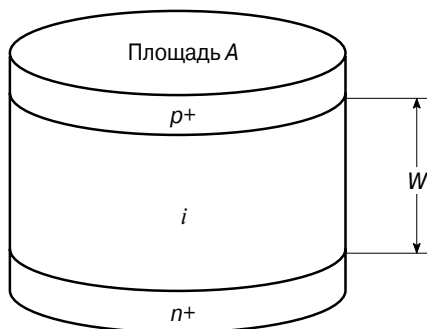


Рис. 2.5. Структура p - i - n -диода.

Слабо легированная область собственной проводимости разделяет сильно леги-

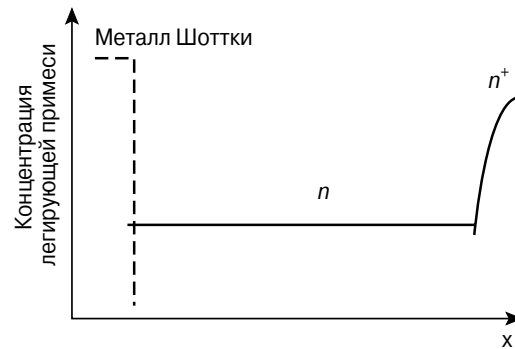


Рис. 2.4. Схематическое изображение легирующего профиля для диода Шоттки.

рованные области p^+ - и n^+ -типа. Даже если к диоду не приложено напряжение смещения, его структура уже будет сильно обеднена носителями заряда, и для малых сигналов диод будет представлять конденсатор с ёмкостью:

$$C_0 = \frac{\varepsilon \cdot A}{W},$$

где

C_0 — ёмкость при нулевом напряжении смещения;

ε — диэлектрическая постоянная материала i -области (области собственной проводимости);

A — площадь;

W — толщина (ширина) области собственной проводимости (i -области).

При нулевом или обратном напряжении p - i - n -диод блокирует высокочастотные сигналы из-за расширенной зоны пространственного заряда и, как следствие, малой ёмкости.

При прямом смещении сопротивление i -области значительно снижается в результате инжекции носителей заряда из сильно легированных областей p^+ - и n^+ -типа. Концентрация появляющихся носителей заряда определяется как величиной приложенного прямого напряжения, так и степенью рекомбинации внутри и на границах области собственной проводимости. Степень рекомбинации зарядов внутри области собственной проводимости, безусловно, определяется временем жизни свободных носителей заряда (электронов и дырок).

Общее сопротивление области собственной проводимости в режиме малого сигнала

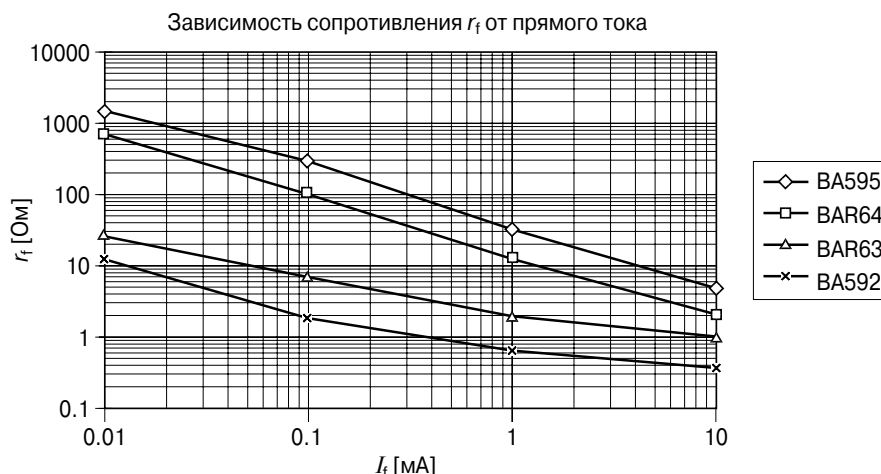


Рис. 2.6. Зависимость сопротивления в проводящем состоянии от прямого тока.

может быть описано следующим выражением:

$$r_f = \frac{W^2}{(\mu_n + \mu_p) \cdot \tau \cdot I_F},$$

где

r_f — прямое сопротивление диода на высоких частотах;

I_F — прямой ток диода;

μ_n — коэффициент подвижности электронов;

μ_p — коэффициент подвижности дырок;

τ — время жизни носителей заряда.

Для приведённого выше выражения сделано допущение, что ток определяется в основном только рекомбинацией внутри области собственной проводимости. Однако если принять за τ эффективное (действительное) время жизни зарядов, то приведённое выше выражение также будет справедливо при учете инжекционного тока в областях p^+ - и n^+ -типа и рекомбинации на границе различных поверхностей (например, между кремнием и оксидом). В общем случае, это является одной из основных причин уменьшения величины τ при уменьшении тока. На Рис. 2.6 приведены типовые значения сопротивления r_f .

Если p - i - n -диод работает на высоких частотах, то при смещении перехода в прямом направлении он действует, в первую оче-

редь, как линейное сопротивление. В таком случае на практике используется правило, что частота сигнала должна быть много больше, чем величина, обратная τ :

$$f \geq \frac{10}{\tau}.$$

В этом случае подавляется модуляция концентрации носителей заряда, а следовательно, исключается появление негармонических эффектов.

Если p - i - n -диод используется в качестве ключа, то его основными характеристиками являются малое прямое сопротивление и, как следствие, малые потери при смещении p - n -перехода в прямом направлении, а также высокий уровень изоляции при обратном напряжении благодаря низкой ёмкости перехода. В Табл. 2.1 приведено сравнение основных параметров типовых высокочастотных p - i - n -диодов.

2.2.1. Измерение электрических параметров p - i - n -диодов

При приложении к диоду прямого напряжения значения r_f и C_0 могут быть измерены при помощи измерителя полного сопротивления, например HP4291. Для опре-

Таблица 2.1. Параметры диодов

	A	W	τ [нс]	r_f	C_0 [фФ]
BA595	средняя	большая	1600	высокое	230
BAR64	большая	средняя	1400	среднее	300
BAR63	малая	малая	80	низкое	300
BA592	средняя	очень малая	120	очень низкое	1200

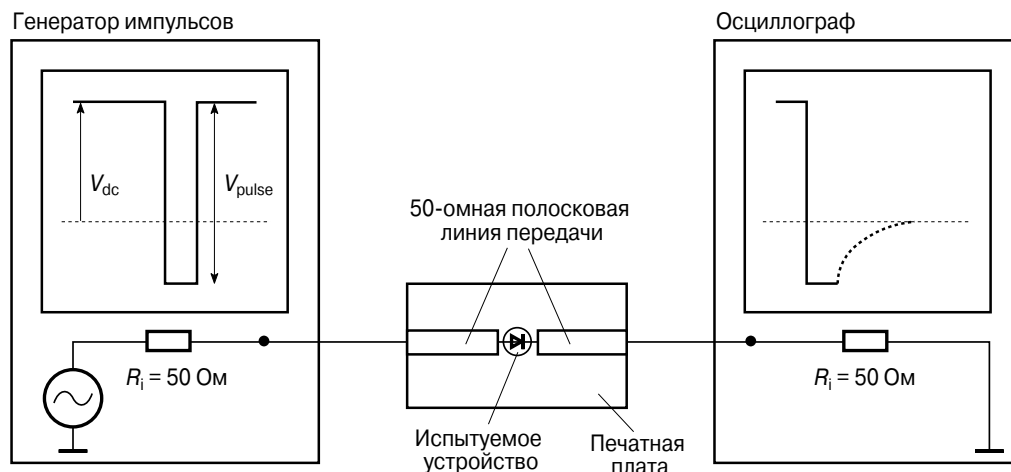


Рис. 2.7. Установка для измерения времени жизни носителей заряда.

деления времени жизни носителей заряда требуется другая измерительная установка (см. Рис. 2.7).

Длительность отрицательного импульса генератора должна превышать ожидаемое время жизни носителей заряда. Режим работы по постоянному току и амплитуда импульса должны быть выставлены так, чтобы на экране осциллографа получилась картинка, похожая на приведённую на Рис 2.8.

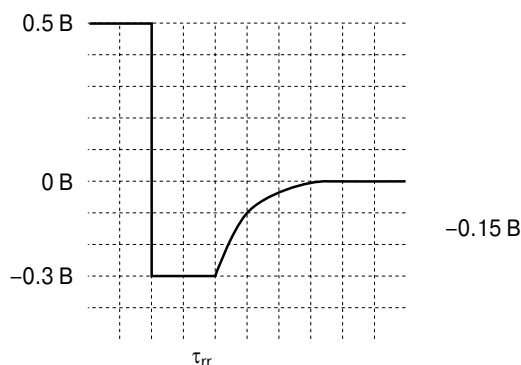


Рис. 2.8. Осциллограмма для измерения времени жизни носителей заряда.

В этом примере прямой ток $I_f = 10$ мА (0.5 В, 50 Ом), обратный ток $I_r = 6$ мА. Время τ_{tr} (длительность затухания импульса при приложении обратного напряжения), измеренное от спада импульса до точки, когда обратный ток достигает 3 мА, позволяет найти и оценить значение τ , которое может быть использовано для установления соотношения между τ_{tr} и τ .

Для выбранного соотношения токов логарифм приближённо равен 1.

2.3. Определение ёмкостей биполярных транзисторов

Существует множество исторически сложившихся способов определения ёмкостей в транзисторе (см. Рис. 2.9). Наиболее просто определить ёмкости между каждым из трёх выводов транзистора. Способы их определения будут рассмотрены в следующем подразделе.

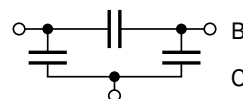


Рис. 2.9. Основное определение: эквивалентная схема биполярного транзистора.

На Рис. 2.10...2.15 приведены различные способы определения и измерения ёмкостей транзисторов. При этом используются следующие обозначения:

C_{CB} — ёмкость коллектор—база;
 C_{CE} — ёмкость коллектор—эмиттер;
 C_{EB} — ёмкость эмиттер—база;
 C_{IBO} — входная ёмкость в схеме с общей базой при холостом ходе на выходе, также обозначается как C_{IB} , C_{EBO} , C_E

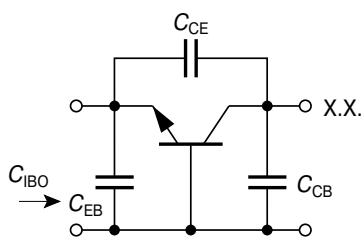
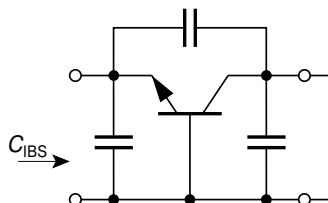
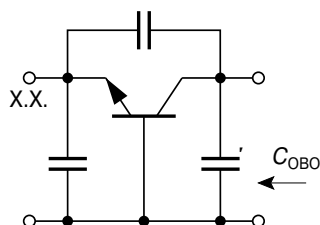
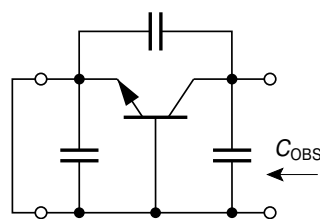
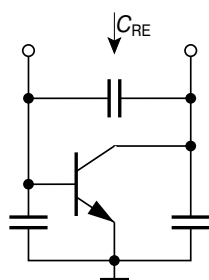
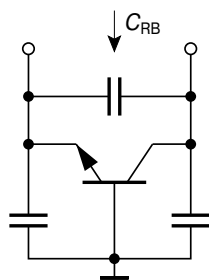
$$C_{IBO} = C_{EB} + (C_{CE} \cdot C_{CB}) / (C_{CE} + C_{CB});$$

C_{IBS} — входная ёмкость в схеме с общей базой при коротком замыкании на выходе, также обозначается как C_{IB} , C_{EBS} , C_{11B} , C_{11E}

$$C_{IBS} = C_{EB} + C_{CE};$$

$C_{ОВО}$ — выходная ёмкость в схеме с общей базой при холостом ходе на выходе, также обозначается как $C_{ОВ}$, $C_{СВО}$, C_C

$$C_{ОВО} = C_{CB} + (C_{CE} \cdot C_{EB}) / (C_{CE} + C_{EB});$$

Рис. 2.10. Схема для определения C_{IBO} .Рис. 2.11. Схема для определения C_{IBS} .Рис. 2.12. Схема для определения C_{OBO} .Рис. 2.13. Схема для определения C_{OBS} .Рис. 2.14. Схема для определения C_{RE} .Рис. 2.15. Схема для определения C_{RB} .

C_{OBS} — выходная ёмкость в схеме с общей базой при коротком замыкании на выходе, также обозначается как C_{OB} , C_{22E} , C_{22B}

$$C_{OBS} = C_{CB} + C_{CE};$$

C_{RE} — обратная ёмкость в схеме с общим эмиттером, также обозначается как C_{12E}

$$C_{RE} = C_{CB}.$$

Ёмкости C_{EB} и C_{CE} не оказывают никакого влияния на точность измерений ёмкости C_{CB} при помощи измерительного ёмкостного моста.

C_{RB} — обратная ёмкость в схеме с общей базой, также обозначается как C_{12B}

$$C_{RB} = C_{CE}.$$

Ёмкости C_{EB} и C_{CB} не оказывают никакого влияния на точность измерений ёмкости C_{CE} при помощи измерительного ёмкостного моста.

2.3.1. Измерение ёмкостей C_{CB} , C_{CE} и C_{EB}

Для простых измерений может использоваться ёмкостной мост (например, НР4279А). Данный мост может измерять ёмкость между двумя коаксиальными выходами при незначительных значениях ёмкостей коаксиальных входов по отношению к земле. Эти выходы также используются для подачи любого требуемого напряжения смещения постоянного тока.

- Для измерения C_{CB} эмиттер транзистора соединяется с землёй. Измерение производится между коллектором и базой.
- Для измерения C_{CE} база транзистора соединяется с землёй. Измерение производится между коллектором и эмиттером.
- Для измерения C_{EB} коллектор транзистора соединяется с землёй. Измерение производится между эмиттером и базой.

Принцип измерений выводится из приведённых выше определений C_{RE} и C_{RB} . При заземлении третьего вывода измеряется ёмкость только между двумя оставшимися.

2.4. Определение параметров малосигнального ВЧ транзистора путём измерения трёх параметров

Стремясь сократить время на проектирование, разработчики всё чаще прибегают к помощи автоматизированных средств моделирования, которые могут обеспечить

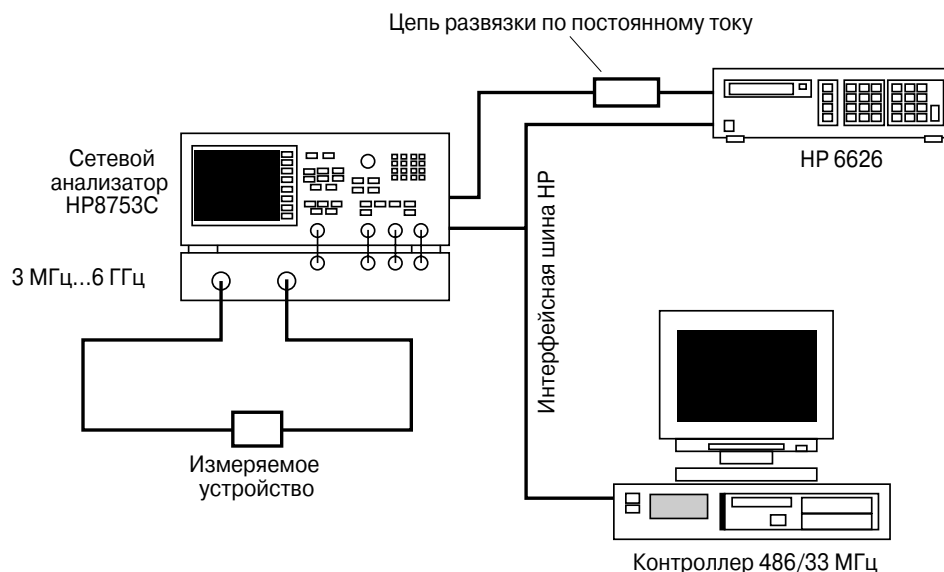


Рис. 2.16. Установка для измерения S -параметров.

удовлетворительные результаты, только когда имеются достаточно точные и ясные экспериментальные данные и значения параметров приборов.

Цель данного раздела заключается в объяснении источников получения требуемых значений и в помощи читателям при проведении собственного анализа и измерений.

2.4.1. Измерение S -параметров транзисторов

а) Измерение с использованием измерительного стенда

Измерение S -параметров полевых и биполярных транзисторов производится на прецизионных измерительных стендах с сопротивлением 50 Ом в схеме с общим истоком или с общим эмиттером. При этом должна быть проведена полная 2-портовая калибровка на обоих концах ВЧ кабеля. Для получения S -параметров на плоскости отсчёта транзистора, анализатор цепи вводит

предварительно определённые S -параметры измерительной установки в расчёт для калибровки по 12 параметрам (см. Рис. 2.16).

Затухание для Порты 1 необходимо установить достаточно большим, чтобы обеспечить работу исследуемого устройства в режиме малых сигналов даже при малых токах коллектора и низких частотах. Помехи могут быть подавлены путём снижения значения устанавливаемого коэффициента затухания Порты 2 на 20 дБ при очень малой ширине полосы пропускания ПЧ.

На Рис. 2.17 и Рис. 2.18 показано расположение плоскостей отсчёта для двух различных типов корпусов.

Настройка источников тока HP6626 производится в соответствии с указаниями по применению AN376-1 компании Hewlett-Packard. В них описываются преимущества конфигурирования напряжения коллекторного перехода и прямой установки тока эмиттера.

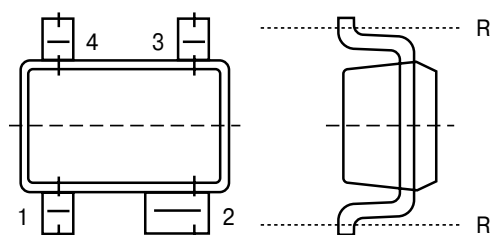


Рис. 2.17. Плоскость отсчёта для определения S -параметров для корпуса SOT343.

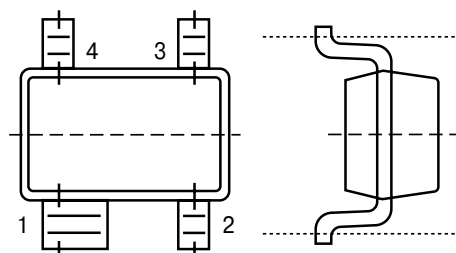


Рис. 2.18. Плоскость отсчёта для определения S -параметров для корпуса SOT143.

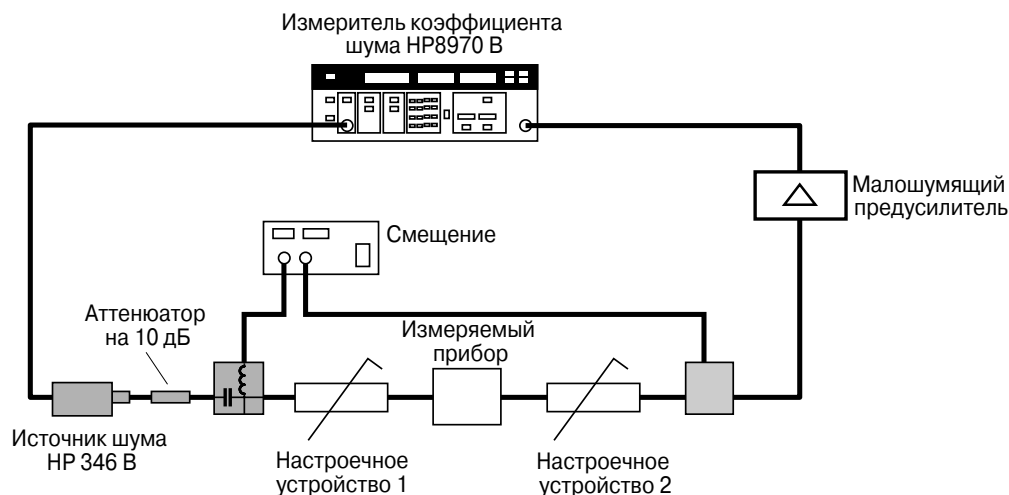


Рис. 2.19. Схема измерения коэффициента шума транзистора.

б) Использование микрополосковых плат

Многие пользователи для измерения S -параметров транзистора предпочитают использовать недорогие SMA-соединители, расположенные на микрополосковой плате. После 3.5-миллиметровой калибровки производится коррекция расстояния между соединителем и транзистором при помощи функции «electrical delay» (время задержки) измерителя. Неточности, возникающие из-за использования штыревого соединителя, ошибки при измерении полного сопротивления и затухание не учитываются.

Более точным является проведение TRL-калибровки с использованием соответствующих стандартов, прецизионной 50-омной линии и специальных штыревых соединителей.

Еще один недостаток данного метода заключается в том, что измеренные значения включают значения индуктивностей переходных отверстий для подключения эмиттера к земле. Эти значения не учитываются в S -параметрах, приведенных в спецификации.

2.4.2. Установка для измерения коэффициента шума транзистора

Описанная в данном разделе установка может использоваться на частотах до 2000 МГц и не требует наличия каскада преобразования частоты между предусилителем и измерителем коэффициента шума (см. Рис. 2.19). Измерение параметров транзисторов производится на прецизионной измерительной установке.

Импеданс источника может быть настроен на $F_{\min}$, а импеданс нагрузки — для

получения максимального усиления. Использование циркуляторов можно избежать путём уменьшения диапазона изменения импеданса источника шума при помощи 10-дБ аттенюатора и применения усилителя с хорошим согласованием сигналов.

Одним из методов исключения специальных коалибровочных цепей является прямое подключение настроенного устройства к 50-омному задатчику, без исследуемого прибора. В этом случае табличные значения ENR (Excess Noise Ratio — коэффициент избыточного шума), поступающие на вход, должны снижаться за счёт затухания в цепи между шумовым диодом и исследуемым прибором. При измерении параметров биполярного транзистора в большинстве случаев дополнительное затухание можно сделать незначительным, используя настроенное устройство с высоким значением Q .

2.4.3. Установка для измерения коэффициента шума смесителя

Частотный сдвиг значений ENR для калибровки и отображения измеренных величин осуществляется путём установки параметра коэффициента шума SP 1.3 измерителя, частота входного сигнала f_{IF} устанавливается при помощи SP 3.0. Одно сочетание f_{LO} и f_{IF} определяет частоту измерения, другое — отражённый сигнал помехи, стоящей на $2f_{IF}$, которую следует подавлять, например, с помощью настраиваемого полосового фильтра.

Так как шум гетеродина приёмника не может быть подавлен при помощи калиб-

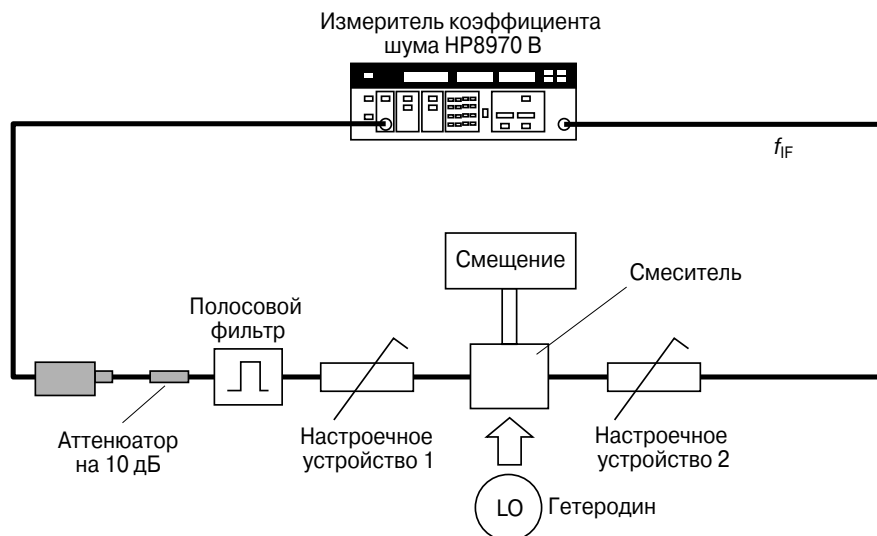


Рис. 2.20. Установка для измерения коэффициента шума смесителя.

ровки, чрезвычайно важно, чтобы выбранный генератор имел очень чистый спектр, с малыми фазовыми и АМ-помехами. Это может быть, например, ламповый или кварцевый генератор (см. Рис. 2.20).

2.4.4. Измерение значения точки интермодуляции третьего порядка (IP3)

Несмотря на то что эмпирическое выражение $IP3_{OUT} = P_{-1dB} + 10 \text{ дБ}$ наводит на мысль, что вместо IP3 можно использовать 1-децибелную точку компрессии P_{-1dB} , настоятельно рекомендуется определять именно интермодуляцию (Рис. 2.21). На практике, режимы работы для их измерения почти не сопоставимы — $IP3_{OUT}$ является параметром класса А, в то время как P_{-1dB} — это параметр, связанный с ограничением сигнала при высокой мощности.

Искажения третьего порядка, возникающие в исследуемом приборе, создают интермодуляционные составляющие (IM) на частотах $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$. Точка интермодуляции выходного сигнала, $IP3_{OUT}$, определяется как точка пересечения экстраполяции интермодуляционной составляющей третьего порядка (3:1) с экстраполированной составляющей основной частоты (1:1), как функции входной мощности.

Точка интермодуляции, измеренная на выходе, может быть также определена для входа.

Точка интермодуляции третьего порядка на выходе [дБм]:

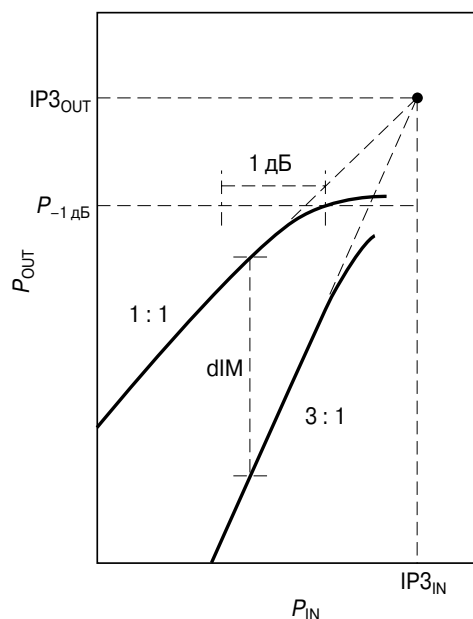


Рис. 2.21. Определение точки интермодуляции.

$$IP3_{OUT} = P_{OUT} + dIM/2.$$

Точка интермодуляции третьего порядка на входе [дБм]:

$$IP3_{IN} = P_{IN} + dIM/2.$$

$$IP3_{OUT} - IP3_{IN} = \text{Gain} = P_{OUT} - P_{IN},$$

где P_{OUT} и P_{IN} — мощность сигналов для одной частоты; dIM — разность между составляющей основной частоты и интермодуляционной составляющей; Gain — коэффициент усиления.

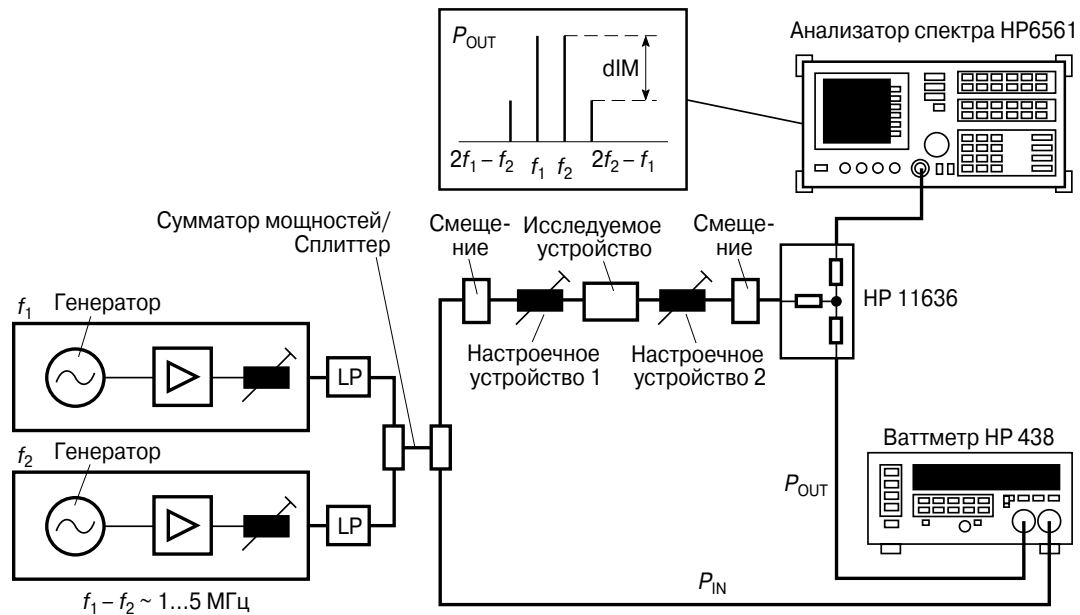


Рис. 2.22. Установка для измерения точки интермодуляции.

Для задания интермодуляционных составляющих в диапазоне от 50 до 60 дБ измерения проводятся при низком уровне сигнала. Затухание между исследуемым прибором и ваттметром должны быть точно определены и учтены при расчёте. На Рис. 2.22 приведена схема измерительной установки.

Несмотря на то что характерной областью применения описанной выше системы является определение характеристик транзисторов или усилителей, её также можно использовать соответствующим образом и для смесителей. В этом случае анализатор спектра должен быть настроен на частоту $f_1 - f_{LO}$, но не должен влиять на определение уровней. Ваттметр показывает значения мощностей для двух несущих частот. Для вычисления $IP3$ требуется определить мощность только одной несущей частоты (на уровне -3 дБ).

2.5. Биполярные ВЧ транзисторы

С того момента как началась разработка ВЧ транзисторов, в качестве вывода коллектора у малосигнальных биполярных транзисторов используется обратная сторона подложки кристалла. Благодаря технологии SIEGET (SIEmens Grounded Emitter Transistor), для четвёртого поколения транзисторов удалось получить максимальные рабочие частоты до 25 ГГц. Это делает их особенно подходящими для применения в устройствах мобильной связи (см. Рис. 2.23). На сегодняшний день компания

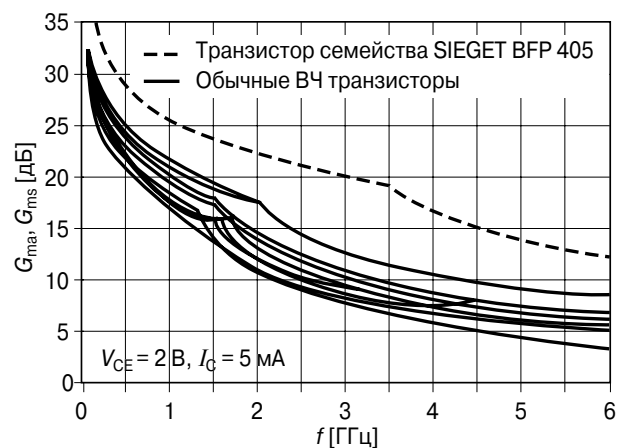


Рис. 2.23. В транзисторах семейства SIEGET удастся получить значительно большие коэффициенты усиления, чем в ВЧ транзисторах предыдущего поколения.

Infineon AG уже может предложить транзисторы 5-го (B6HFe) и 6-го поколений (кремний-германиевые) с граничными частотами до 70 ГГц.

Производство ВЧ транзисторов в компании Siemens началось в 1964 году. Непосредственным толчком для перехода от использования германия, который тогда был преобладающим материалом, на кремний стали жёсткие требования по тепловой стабильности и линейности для широкополосных каналов связи. Граничная частота (f_T) для первого поколения этих приборов составляла 2 ГГц. Появление ионной имплантации в 1975 году создало благоприятную

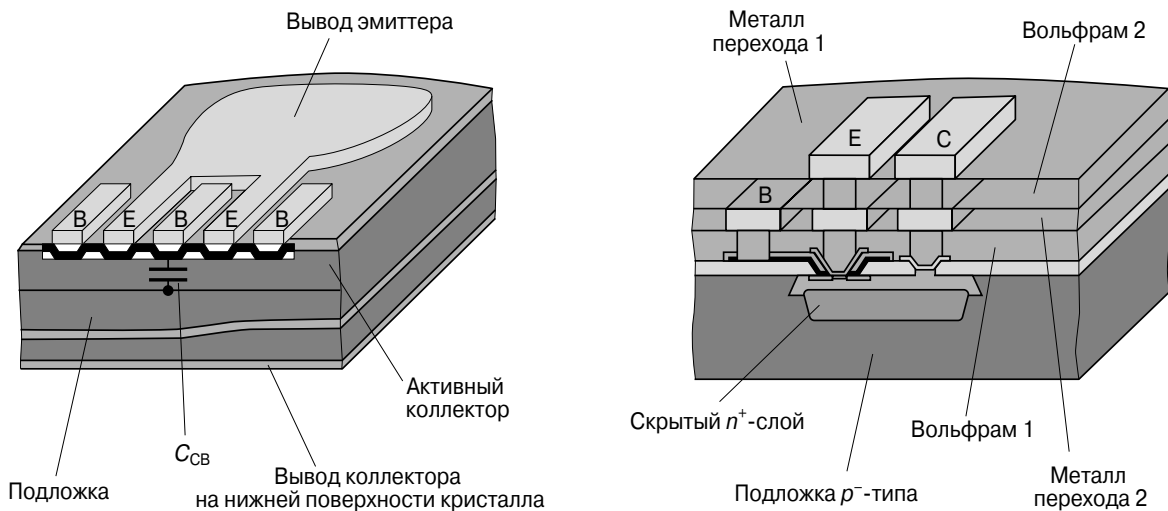


Рис. 2.24. Паразитная ёмкость база—коллектор обычных биполярных ВЧ транзисторов (слева) снижается при использовании SIEGET-технологии (справа)

возможность для использования мышьяка вместо фосфора в качестве легирующей примеси для эмиттера, что позволило повысить граничную частоту f_T для второго поколения приборов до 5 ГГц. В конечном итоге, использование установки фотолитографии с последовательным шаговым экспонированием сделало возможным изготовление транзисторов третьего поколения. Используя 0.8-мкм структуры, в этих транзисторах удалось получить граничную частоту 8 ГГц, что позволило создать усилители с частотами до 2 ГГц. Для того чтобы соответствовать требованиям рынка по воспроизводимости приборов и снижению стоимости, процесс изготовления старых поколений устройств был переработан на основе 4-го поколения приборов и переведён на выпуск новой линейки ИС. Широкий ассортимент микросхем шести поколений, который охватывает диапазон частот от 100 МГц до 12 ГГц, подходит для различных применений не только в области мобильной связи, но также и в области бытовой и автомобильной электроники.

2.5.1. SIEGET

До недавнего времени биполярные ВЧ транзисторы создавались на подложке n -типа (см. **Рис. 2.24**). В результате обратная сторона кристалла неизбежно становилась контактом коллектора, вследствие чего кристалл транзистора всегда монтировался на коллекторный вывод корпуса. База и эмиттер, располагающиеся на верхней стороне кристалла и имеющие гребенчатую

форму, должны привариваться к выводам корпуса тонкой золотой проволокой. Эти проволочные соединения имеют индуктивность, которой нельзя пренебречь на высоких частотах. Соединение с эмиттером, в частности, представляет собой отрицательную обратную связь в цепи заземления, что может привести к снижению коэффициента усиления на 10 дБ. Используя принцип SIEGET, компании Siemens удалось решить эту проблему революционным путем.

SIEGET-транзисторы производятся по технологии B6HF — технологический процесс для интегральных ВЧ микросхем — с граничной частотой 25 ГГц. Реальный транзистор изготавливается на слабо легированной подложке p -типа. Таким образом, сам транзистор остается изолированным от подложки, и, следовательно, можно установить кристалл транзистора на вывод корпуса, соединяющийся с землёй. Однако, в отличие от более ранних поколений приборов, коллектор необходимо вывести на верхнюю часть кристалла и там разварить. Взамен, эмиттерное соединение может быть перемещено вниз по наикратчайшему пути при помощи нескольких соединительных проводников. Таким образом, индуктивность эмиттера уменьшается от 1 нГн при старой технологии размещения до 0.25 нГн, эмиттер выходит прямо на высокочастотную землю. Традиционную конструкцию можно сравнить с человеком, стоящем на голове, в то время как теперь всё становится на свои места. Процесс производства основывается на получении легиро-

ванных слоев из поликремния. Это самосовмещающийся процесс, использующий промежуточные маски и радикальное сокращение всех продольных и вертикальных размеров. В результате толщина базы составляет всего лишь 80 нм, а ширина эмиттера — 400 нм. Запирающее напряжение коллектор—эмиттер снижается до 4.5 В, что позволяет получить более высокие плотности токов и приводит к относительному уменьшению внутренней обратной передаточной ёмкости, которая является одним из факторов, определяющих коэффициент усиления на ВЧ. Например, у BFP 405 остаточная ёмкость составляет только 50 фФ. Другим фактором, который вносит значительный вклад в уменьшение ёмкости, является то, что в новой технологии больше не используется карман базы — вместо этого контакт к базе обеспечивается посредством легированного примесью p -типа слоя поликремния, расположенного рядом с эмиттером. Выводы базы и эмиттера разделены только тонким изолятором.

При использовании SIEGET решается старая как мир проблема, которая с самого начала озадачивала разработчиков схем: возникающие в биполярных транзисторах тепловые потери всегда выделяются на коллекторе. В этом случае пользователь сталкивается с трудно выполнимой задачей по управлению не только напряжением питания, но и ВЧ сигналом и рассеиваемой мощностью независимо друг от друга. В SIEGET-транзисторах данная проблема отсутствует.

Для того чтобы полностью использовать превосходные характеристики нового транзисторного кристалла (см. **Рис. 2.25**), необходимо было разработать специальный корпус, подходящий для работы на высоких частотах. Транзисторы семейства SIEGET поставляются в специально модифицированных миниатюрных корпусах SOT343. Корпус размерами 2×1.3 мм позволяет использовать его даже в сверхкомпактных мобильных телефонах. Совсем недавно эти транзисторы также появились в маленьких плоских корпусах TSFP-4 с ещё меньшими размерами 1.4×0.8 мм. Установочная высота теперь составляет менее 0.59 мм, поэтому данные корпуса также могут применяться в модулях.

Для снижения индуктивности эмиттера кристаллы SIEGET-транзисторов устанавли-

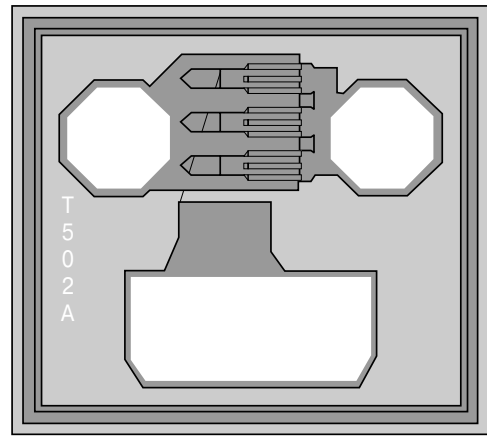


Рис. 2.25. Топология кристалла транзистора BFP 420.

ливаются на широкую медную пластину SMD-корпуса SOT343, для сравнения на **Рис. 2.26** приведено внутреннее устройство стандартных ВЧ транзисторов в корпусе SOT143.

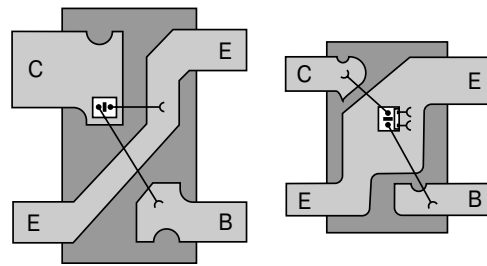


Рис. 2.26. Внутреннее устройство транзисторов в корпусе SOT343 (слева) и SOT143 (справа).

Технические характеристики транзисторов предоставляют разработчику значительно большую свободу. Для типовой характеристики зависимости f_T от тока коллектора I_C (см. **Рис. 2.27**) при напряжениях V_{CE} менее 1 В граничная частота коэффициента передачи тока при всех значениях тока резко снижается по сравнению со значениями при более высоких напряжениях V_{CE} . Но даже при значении $V_{CE} = 0.5$ В, из-за достаточно высокой f_T , составляющей 17 ГГц, у разработчиков схем существуют обширные возможности для выбора. Это означает, что на частотах свыше 2 ГГц при $V_{CE} = 0.7$ В и токе $I_C = 1$ мА SIEGET-транзистор BFP 405 обладает значительно большим коэффициентом усиления, чем транзисторы 3-го поколения при $V_{CE} = 7$ В и $I_C = 10$ мА. В то время как обычные ВЧ транзисторы с трудом работают при напряжениях питания менее 2 В, SIEGET-тран-

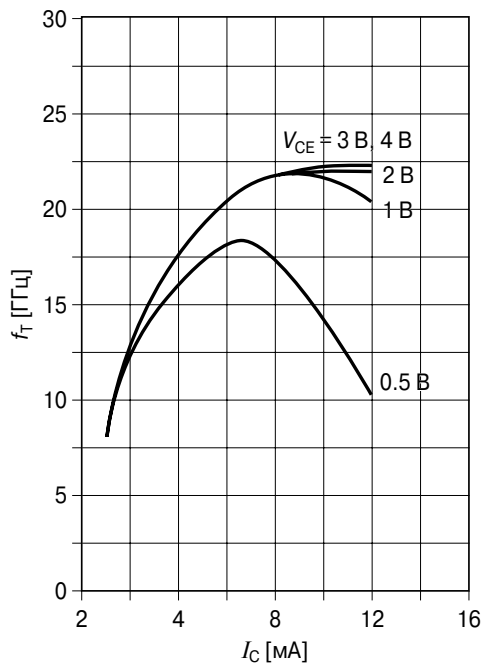


Рис. 2.27. Граничные частоты для SIEGET-транзисторов.

зисторы демонстрируют при этом напряжении свои оптимальные характеристики.

В результате открываются новые возможности для применения данных транзисторов даже в устройствах мобильной связи при $V_{CE} < 1$ В. Обычно проблемой, связанной с усилителями, оптимизированными для получения минимальных коэффициентов шума на ВЧ, является снижение коэффициента усиления из-за рассогласования. SIEGET-транзисторы одновременно обеспечивают как очень низкий коэффициент шума, так и высокий коэффициент усиления (см. Рис. 2.28). Благодаря оптимальной зависимости импеданса биполярных транзисторов от частоты можно, например, управлять транзистором BFP 420 во многих широкополосных устройствах без согласования. Одним из преимуществ данных

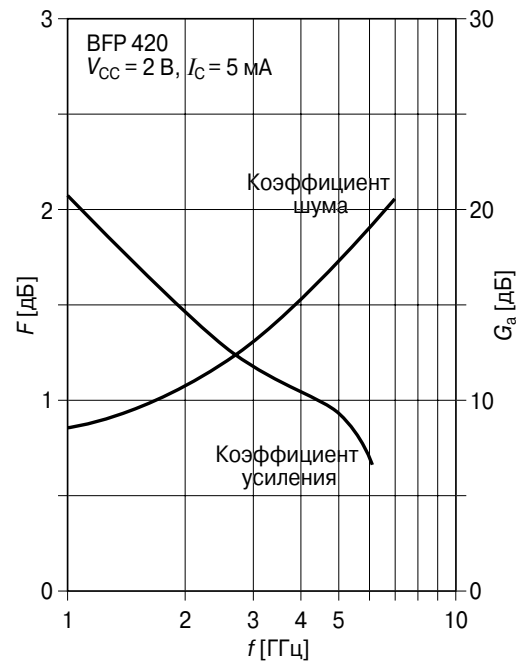


Рис. 2.28. Коэффициент шума и коэффициент усиления транзисторов семейства SIEGET.

транзисторов по сравнению с арсенид-галлиевыми полевыми транзисторами является их достаточно простое согласование с 50-Ом нагрузкой. Это предоставляет разработчику еще больше свободы, так что в случае необходимости можно даже оптимизировать усилитель для лучшего согласования и/или для стабильности при низких коэффициентах усиления. Результаты, полученные при работе на частотах около 6 ГГц, точно такие же, как и у традиционных транзисторов при работе на частоте 2 ГГц.

2.5.2. Применение

Три модели транзисторов семейства SIEGET — BFP 405, BFP 420 и BFP 450 — охватывают диапазон токов от менее 10 мА до 100 мА (Табл. 2.2).

Таблица 2.2. Параметры SIEGET-транзисторов BFP 405, BFP 420 и BFP 450

BFP 405 ($I_{C, \max} = 12$ мА)	BFP 420 ($I_{C, \max} = 35$ мА)	BFP 450 ($I_{C, \max} = 100$ мА)
- Генераторы с частотой до 12 ГГц - Маломощные усилители с низкими токами - Высокий коэффициент усиления при низких токах - Слаботочные устройства	- Генераторы с частотой до 9 ГГц - Маломощные усилители - Высокий коэффициент усиления - Универсальные устройства	- Маломощные каскады с высокой допустимой глубиной модуляции - Драйверные каскады с высоким коэффициентом усиления: $P_{\text{вых}} = +19$ дБм при $V_{CE} = 3$ В и $f = 1.9$ ГГц - Устройства средней мощности, драйверы

Здесь большим преимуществом по сравнению с ВЧ транзисторами прежних поколений является более низкое напряжение питания и меньшие токи потребления. Но даже при напряжении коллектор—эмиттер от 2 до 3 В транзистор работает без проблем. Технические параметры, полученные при этих условиях, не идут ни в какое сравнение с параметрами для более старых транзисторов, даже при больших напряжениях питания. Одно из устройств, в котором до недавнего времени было невозможно использовать биполярные транзисторы в пластиковом корпусе и которое теперь может быть сконструировано на базе SIEGET-транзистора BFP 405 — это серийно выпускаемый стабилизированный генератор на диэлектрическом резонаторе (DRO) для маломощных схем (LNC), работающих на частоте 12 ГГц. Данный генератор обеспечивает выходную мощность более +3 дБм на частоте 10 ГГц, и по сравнению с предыдущими поколениями генераторов на основе арсенид-галиевых полевых транзисторов создаваемый им уровень шумов в боковой полосе частот более чем на 5 дБ ниже. На **Рис. 2.29** показан опытный образец DRO-генератора для частоты 10 ГГц.

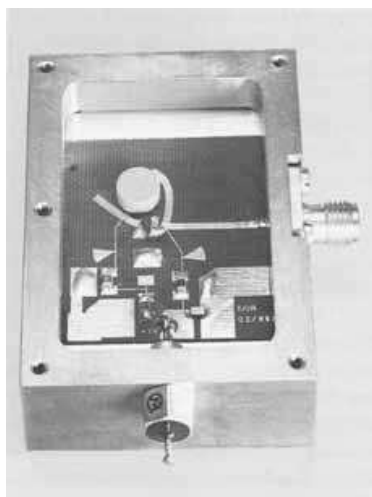


Рис. 2.29. Лабораторный образец стабилизированного 10-ГГц генератора на диэлектрическом резонаторе, выполненный на базе транзистора BFP 405.

2.5.3. Кремний-германиевые транзисторы

Может показаться, что с разработкой SIEGET-транзисторов в очередной раз были достигнуты предельные характери-

ки, и дальнейшее улучшение технологии производства транзисторов невозможно.

На самом деле, оказалось возможным получить 5-е поколение (BFP 520/BFP 540) из 4-го путём последовательного применения теоретически известных стратегий оптимизации — главным образом, за счёт уменьшения всех вертикальных и горизонтальных структур. Однако кремниевая технология при использовании современных методов производства (не учитывая сверхдорогие возможности, например для замены фотолитографии) достигла своего предела. Этот предел можно преодолеть во многом благодаря оригинальной идее, выдвинутой в дни основания полупроводниковой техники. В 1954 году Герберт Кромер (Herburt Kroemer) опубликовал предложение по модифицированию запрещённой зоны базы транзистора таким образом, чтобы носители заряда, выходящие из эмиттера, «встречали» встроенное поле. Поле ускоряло бы электроны, резко снижая время прохождения базы, что соответствует повышению граничной частоты. За эту идею в 2000 году Кромер был удостоен Нобелевской премии.

Модифицирование запрещённой зоны наилучшим образом осуществляется путём выборочного включения атомов германия в подложку из кремния таким образом, что концентрация примесных атомов в направлении от эмиттера к коллектору постоянно возрастает. Поскольку атомы германия больше, чем атомы кремния, в кристалле возникают сильные механические напряжения, которые приводят к появлению трещин. Поэтому прошло много лет, прежде чем первые лабораторные опыты привели к разработке полноценного производственного процесса. Полное и подробное описание этого процесса можно найти в журнале «Elektronik» 18/2002 (Lohninger: «Diskret, aber nicht trivial — Teil 3» [Дискретные, но не тривиальные — Часть 3]). С 2000 года Infineon выпускает транзистор BFP 620 с граничной частотой 70 ГГц. Стало возможным и снижение коэффициента шума до 0.7 дБ на частоте 2 ГГц. К сожалению, за высокое значение граничной частоты приходится платить меньшим значением напряжения пробоя, поскольку граничная частота транзистора определяется не только временем прохождения базы, но и временем прохождения коллектора. Так как скорость электронов постоянна, последней ос-

тавшейся возможностью увеличения рабочей частоты является уменьшение толщины не только базы, но и коллектора. Но более тонкий коллектор имеет меньшее напряжение пробоя. Соответственно, транзистор BFP 620 может работать только при напряжениях не более 2.5 В. Поскольку часто это приводит к увеличению стоимости схем, а для схем с рабочей частотой 3 ГГц сверхвысокие значения граничной частоты не требуются, то процесс производства был модифицирован, чтобы получить более высокое рабочее напряжение. В результате были выпущены два типа транзисторов 6-го поколения — BFP 640 и BFP 650. Эти транзисторы имеют рабочее напряжение 4.5 В, а их граничная частота соответственно снижена до 40 ГГц, причём это не повлияло на значение коэффициента шума.

2.6. Кремниевые монолитные СВЧ интегральные схемы (ММИС) упрощают разработку

При использовании дискретных компонентов не удаётся получить ВЧ схемы с высокими требованиями в отношении управления рабочей точкой, тепловых характеристик, ESD-защиты или коммутационных функций. В этом случае должно быть использовано слишком большое количество активных компонентов, при этом пространственное расположение некоторых из них сильно взаимосвязано или имеется недостаточно места на печатной плате или модуле. Эти требования могут быть выполнены при использовании кремниевых монолитных СВЧ ИС (Monolithic Microwave Integrated Circuit — ММИС), поскольку в них можно интегрировать как активные (биполярные транзисторы, диоды), так и пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы, дроссели) на очень малой площади кристалла. Таким образом, использование кремниевых ММИС позволяет значительно сократить время разработки и риски, связанные с дискретными ВЧ устройствами. Примерами могут служить маломощные усилители (LNA), усилители с переменным коэффициентом усиления (VGA), генераторы, управляемые напряжением (VCO) или смесители.

В общем случае, более или менее сложные схемы смещения по постоянному току управляют рабочей точкой ВЧ каскадов так, что можно достичь желаемых характерис-

тик, например постоянного коэффициента усиления или постоянного тока потребления, вне зависимости от изменений температуры, напряжения питания или мощности входного ВЧ сигнала. В то же время ВЧ каскады оптимизированы для специальных требований. Например, в маломощных усилителях сочетается минимальное значение коэффициента шума с согласованием по мощности, т.е. волновое сопротивление на входе и выходе должно быть равно 50 Ом.

Имеются различные типы монолитных интегральных СВЧ усилителей, изготовленных по биполярным технологиям, разработанным компанией Infineon, например SIEGET®-25, SIEGET®-45 или другие, изготовленные по 70-ГГц кремний-германиевой (SiGe) технологии с высокой стабильностью характеристик в диапазоне частот от 0 до 10 ГГц и рабочей точкой, обеспечивающей согласование с сопротивлением 50 Ом. Эти приборы имеют превосходные коэффициенты шума и усиления даже при напряжениях ниже 3 В; кроме того, все они подходят для применения в системах мобильной связи. Кремниевые монолитные СВЧ ИС обладают такими же ВЧ характеристиками (коэффициент шума, коэффициент усиления, и т.д.), что и схемы на дискретных транзисторах, т.е. в них используются технологические преимущества дискретных транзисторов. Используя преимущества в технологии, можно, например, значительно снизить ёмкость коллектор—база путём сокращения площади базы до чрезвычайно малых размеров. Соответствующее снижение обратной связи между базой и коллектором ведёт к получению высоких коэффициентов усиления в диапазонах частот до нескольких гигагерц. В то же время оптимизированные этапы изготовления делают возможным получение более низких сопротивлений базы и, как следствие, меньших коэффициентов шума.

На **Рис. 2.30** показана топология кристалла двухкаскадной монолитной СВЧ ИС. Активную структуру транзистора можно определить, найдя эмиттерные выводы. Использование подложки *p*-типа приводит к тому, что находящиеся на подложке активные структуры электрически изолированы, и обратную сторону кристалла можно напрямую соединять с землёй. В результате провод, соединяющий кристалл с землёй, может быть очень коротким, поскольку его можно припаять к выводной рамке прямо

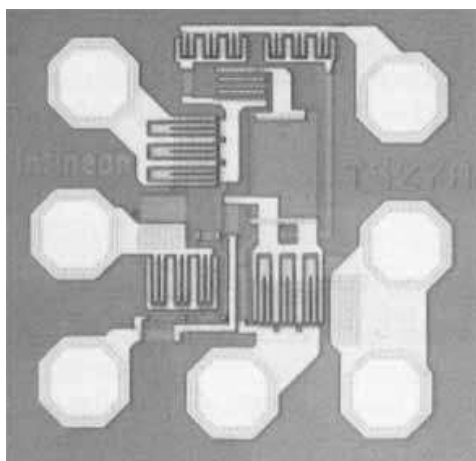


Рис. 2.30. Кристалл ИС Т527 размерами 330×360 мкм.

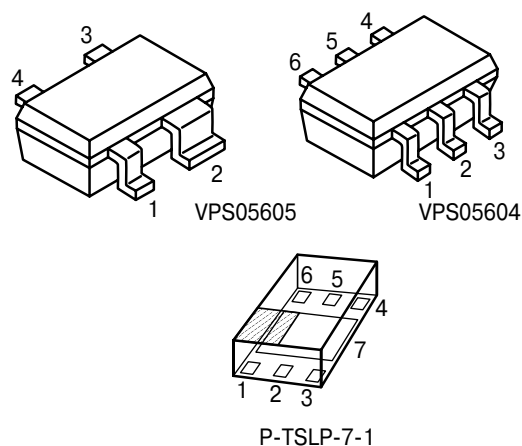


Рис. 2.31. Корпуса типа SOT и TSLP для MMIC (4...7 выводов).

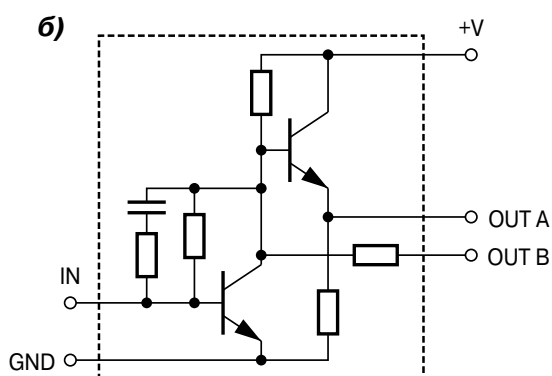
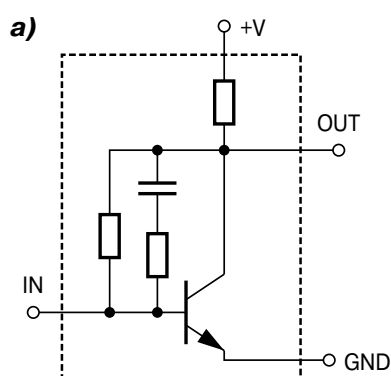


Рис. 2.32. Однокаскадная (а) MMIC (BGA 420) и двухкаскадная (б) MMIC (BGA 427).

рядом с кристаллом. В сочетании с подходящей выводной рамкой это приводит к более низким значениям индуктивности на землю и, следовательно, к большим значениям коэффициента усиления на высоких частотах. Покрытие золотом увеличивает надёжность монокристаллических СВЧ ИС. Для MMIC используются SMD-корпуса типа SOT (Small Outline Transistor) и значительно более плоские и миниатюрные корпуса типа TSLP (Thin Size Leadless Package) (см. Рис. 2.31).

Варианты исполнения

Однокаскадный усилитель BGA 420 (Рис. 2.32, а) состоит из активных структур, обеспечивающих оптимальное согласование, и резистивной цепи смещения. В данном случае RC -цепь обратной связи между коллектором и базой гарантирует согласование по входу во всей полосе пропускания от 0 до 3 ГГц. Сопротивление коллектора снижает разброс коэффициента усиления по току (обратная связь ток—напряже-

ние). С другой стороны, RC -цепь обеспечивает широкополосное согласование MMIC с нагрузкой сопротивлением 50 Ом.

В двухкаскадной ИС BGA 427 (Рис. 2.32, б) входной каскад аналогичен входному каскаду однокаскадной ИС BGA 420. Сопротивление коллектора первого каскада попутно задаёт рабочую точку второго каскада, представляющего собой эмиттерный повторитель. По различным причинам, в том числе и для того чтобы сделать MMIC более гибкой в использовании, во втором каскаде сопротивление коллектора отсутствует. Одна из функций эмиттерного сопротивления второго каскада заключается в обеспечении отрицательной обратной связи и стабилизации рабочей точки независимо от разброса параметров активной части второго каскада. Другой функцией является обеспечение широкополосного согласования выхода OUT A с 50-Ом нагрузкой. По сравнению с однокаскадной ИС BGA 420, двухкаскадный усили-

Таблица 2.3. Основные характеристики отдельных ММІС, изготовленных по различным технологиям

	BGA 420	BGA 427	BGA 428	BGA 622
Количество усилительных каскадов	1	2	2	1
Технология изготовления	SIEGET®-25, $f_T = 25$ ГГц	SIEGET®-25, $f_T = 25$ ГГц	SIEGET®-45, $f_T = 45$ ГГц	SiGe, $f_T = 70$ ГГц
Тип корпуса	SOT343	SOT343	SOT363	SOT343
$ S_{21} ^2$, дБ				
при 0.1 ГГц	19	27	—	—
1.0 ГГц	17	22	—	—
1.8 ГГц	13	18.5	20	14
2.1 ГГц	—	—	18	13.5
2.4 ГГц	—	—	17	13
Коэффициент шума, дБ				
при 0.1 ГГц	1.9	1.9	—	—
1.0 ГГц	2.0	2.0	—	—
1.8 ГГц	2.2	2.2	1.4	1.1
2.1 ГГц	—	—	1.4	1.1
2.4 ГГц	—	—	1.5	1.15
IP3 _{OUT} , дБм				
при 0.1 ГГц	11.0	8.5	—	—
1.0 ГГц	10.0	8.0	—	—
1.8 ГГц	9.5	7.0	11	—
2.1 ГГц	—	—	12	16
2.4 ГГц	—	—	13	—
Напряжение питания, В	3.0	3.0	2.7	2.75
Ток (тип), мА	6.4	9.5	8.2	5.8

тель BGA 427 явно обладает более высоким коэффициентом усиления (см. Табл. 2.3).

В отличие от ИС BGA 420 и BGA 427, микросхема BGA 428 является узкополосным усилителем. Благодаря технологии SIEGET®-45 стало возможным получить более высокий коэффициент усиления и значительно меньший коэффициент шума на высоких частотах, чем у BGA 427. Микросхема BGA 428 используется как малошумящий усилитель в различных системах мобильной связи, например DCS 1800 и PCS 1900. Это двухкаскадный малошумящий усилитель. Первый транзисторный каскад обеспечивает согласование по уровню шумов в результате последующего сложного согласования со вторым каскадом, при одновременном согласовании ВЧ входа по мощности. Из-за этого достигается согласование по входу лучше 10 дБ при коэффициенте шума 1.4 дБ на частоте 1.8 ГГц. Кроме того, у BGA 428 имеется так называемый режим работы с шаговым изменением коэффициента усиления, при котором малошумящий усилитель работает как аттенюатор с уровнем вносимого затухания около

14 дБ. Вносимое затухание меньше, чем у полностью выключенного усилителя из-за селективной связи через ёмкость база—коллектор используемого транзистора. Данный режим работы активируется в мобильных телефонах для предотвращения перегрузки последующих каскадов, когда уровень входного ВЧ сигнала очень высокий.

Однокаскадный малошумящий усилитель BGA 622 изготавливается по 70-ГГц кремний-германиевой технологии В7НГ. Благодаря оптимизированной конструкции его коэффициент шума составляет порядка 1.1 дБ, что несравнимо меньше, чем у других кремниевых малошумящих усилителей, в то же время он имеет согласование по мощности. Поскольку однокаскадный малошумящий усилитель уже согласован как по входу, так и по выходу благодаря наличию встроенного в кристалл дросселя, его запросто можно использовать и устанавливать во многих современных системах мобильной связи (GSM, GPS, DCS, PCS, UMTS и т.д.). Кроме того, он может быть выключен путём приложения постоянного напряжения к его выходу.

2.6.1. Три схемы устройств

В зависимости от типа ММІС и предъявляемых к ней требований, можно создавать различные устройства. Далее приведены примеры трёх устройств.

Устройство 1. Малошумящий усилитель на BGA 420 или BGA 427 с минимальным количеством внешних компонентов

Пример схемы малошумящего усилителя, которая может быть реализована на ИС BGA 420 или BGA 427, представлен на **Рис. 2.33** (на фото изображён усилитель на

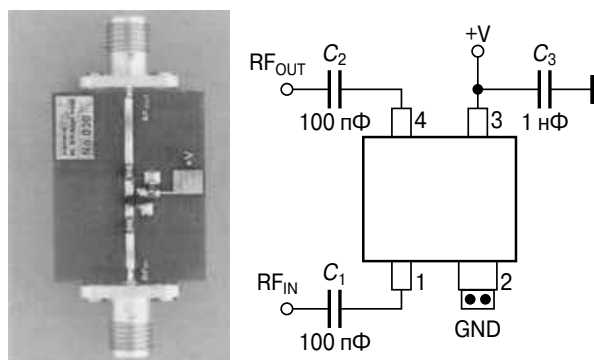


Рис. 2.33. Малошумящий усилитель на ИС BGA 420 или BGA 427 с минимальным количеством внешних компонентов.

BGA 427 в корпусе SOT343). Чрезвычайно простая конструкция требует использования только трёх внешних конденсаторов. Для оптимальной работы важно иметь хороший ВЧ шунт, включённый параллельно источнику питания; таким образом, выходной сигнал может быть полностью передан на выводы OUT и OUT A. Именно поэтому конденсатор C_3 должен быть расположен как можно ближе к выводу +V. Конденсаторы C_1 и C_2 служат для блокировки постоянного напряжения, прикладываемого к выводам 1 и 4.

Устройство 2. Малошумящий усилитель на BGA 428

Для обеспечения оптимальных характеристик микросхеме BGA 428 требуется пять внешних пассивных компонентов (см. **Рис. 2.34**).

Конденсатор C_1 на входе ИС только блокирует напряжение базы первого усилительного каскада, для согласования по ВЧ на частоте 1.8 ГГц он не нужен. Дроссель L_1 и конденсатор C_2 выполняют функции согласующих элементов на выходе ИС. В со-

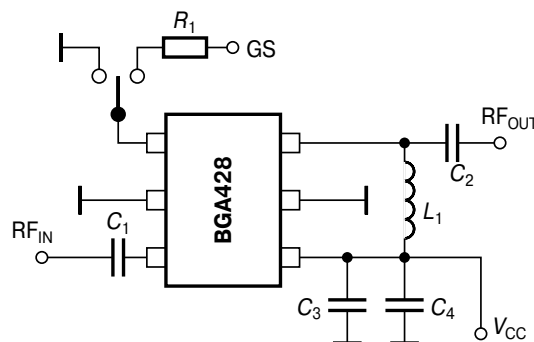


Рис. 2.34. Малошумящий усилитель на микросхеме BGA 428.

четании с паразитными компонентами корпуса SOT363, они преобразуют 50-Ом импеданс внешней нагрузки на коллекторе в более высокий импеданс, действительная часть которого составляет около 100 Ом, что позволяет получить более высокое значение 1-дБ точки компрессии для второго каскада. Конденсаторы C_3 и C_4 служат для развязки ВЧ сигнала от источника напряжения постоянного тока и обеспечения заданного значения импеданса для ВЧ сигнала. Поэтому они должны располагаться близко к BGA 428 и рядом с дросселем L_1 . И наконец, резистор R_1 , подключённый к выводу GS, задаёт ток, а, следовательно, и вносимое затухание в режиме пошагового изменения коэффициента усиления.

Устройство 3. Малошумящий усилитель на микросхеме BGA622 с улучшенным значением IP3

Благодаря оптимизированной конструкции, для простейшей схемы включения BGA 622 при работе на частоте 2.1 ГГц требуется только два внешних компонента (C_1 и C_4 , см. **Рис. 2.35**).

Дроссель L_1 необходим, если требуется улучшить согласование по входу на частотах ниже 2.1 ГГц (например для GPS, 1575 МГц). Для большинства устройств дополнительным требованием является высокое значение точки интермодуляции третьего порядка (IP3), поскольку, как правило, на вход малошумящего усилителя одновременно подаётся несколько ВЧ сигналов. В этом случае проблемой являются низкочастотные составляющие, которые возникают из-за разности частот входных сигналов вследствие нелинейности характеристики транзистора. Они приводят к нежела-

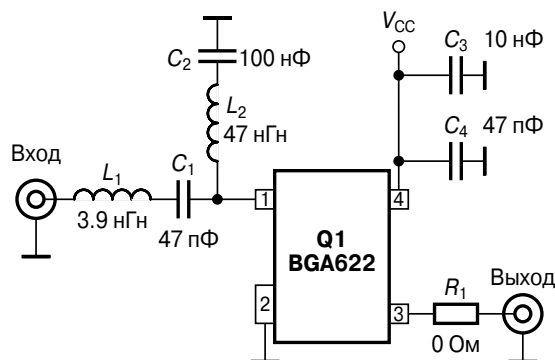


Рис. 2.35. Малошумящий усилитель на микросхеме BGA 622 с повышенной точкой интермодуляции третьего порядка.

тельной амплитудной модуляции сигнала, поступающего на базу транзистора, которая накладывается на ВЧ сигналы. На выходе малошумящего усилителя невозможно отделить амплитудную модуляцию от искажений третьего порядка, воздействие помех будет таким же. Следовательно, задачей является снижение уровня указанных разностных составляющих без воздействия на рабочую точку по постоянному току и ухудшения согласования по ВЧ. Это обеспечивается путём подключения LC -цепи между входом малошумящего усилителя и землёй (L_2 и C_2). Для разностных составляющих в диапазоне нескольких мегагерц конденсатор C_2 представляет очень низкий импеданс, а дроссель L_2 осуществляет развязку по ВЧ. Это улучшает линейность устройства и повышает точку интермодуляции третьего порядка на несколько дБ, в то время как остальные ВЧ характеристики устройства практически не изменяются.

2.6.2. Мобильные телефоны — не единственная область применения MMIC

Помимо основной области применения, систем мобильной связи, MMIC применяются и в других устройствах, например в малошумящих усилителях для систем кабельного телевидения, в усилителях промежуточной частоты малошумящих блоков (LNB) для приёмников спутниковых сигналов или как генераторы сигналов в диапазоне нескольких мегагерц. BGA 420 превосходно подходит для использования, например, в качестве недорогого полностью согласованного буферного усилителя с очень хорошими изоляционными параметрами и

напряжением питания в диапазоне от 2 до 5 В. Благодаря гибкой концепции построения ИС BGA 427, она может применяться в усилителях промежуточной частоты или в управляемых током усилителях напряжения в трансиверах (приёмопередатчиках) для оптоволоконных систем связи. Используя каскодную схему BGA 416, очень легко спроектировать генератор с встроенными выходными буферными усилителями. Из-за высокой изоляции выходного каскада в обратном направлении схема генератора оптимальным образом изолирована от импеданса нагрузки, что значительно улучшает стабильность частоты.

2.7. Стабилизация тока при помощи стабилизатора рабочей точки BCR 400

В устройствах и системах мобильной связи требуется стабильность рабочей точки в широком диапазоне температур. В то же время они работают при низких рабочих напряжениях и низком токе потребления. Для подобных устройств компания Infineon Technologies предлагает активный стабилизатор рабочей точки BCR 400W.

Мобильные телефоны, системы автомобильной электроники и портативные устройства бытовой электроники являются классическими примерами мобильных устройств. В общем случае, к ним предъявляются требования по низким напряжениям питания, низкому току потребления и высокой стабильности рабочей точки даже при сильных колебаниях температуры. Кроме того, данные устройства должны иметь как можно меньшие габариты. Классические схемы стабилизации рабочего тока (подключённые параллельно или последовательно) иногда вызывают флуктуации стабилизированного рабочего тока, что неприемлемо при наличии флуктуаций напряжения, а также из-за диапазона усиления токов используемых транзисторов. Оптимизация данных схем требует большего количества компонентов и, следовательно, больше места в модуле. Более того, в этом случае снова требуется дополнительная мощность. Таким образом, в результате опыта, полученного при разработке транзисторов со встроенными резисторами («цифровые транзисторы»), был разработан однокристалльный активный стабилизатор рабочего тока BCR 400. Основными примерами

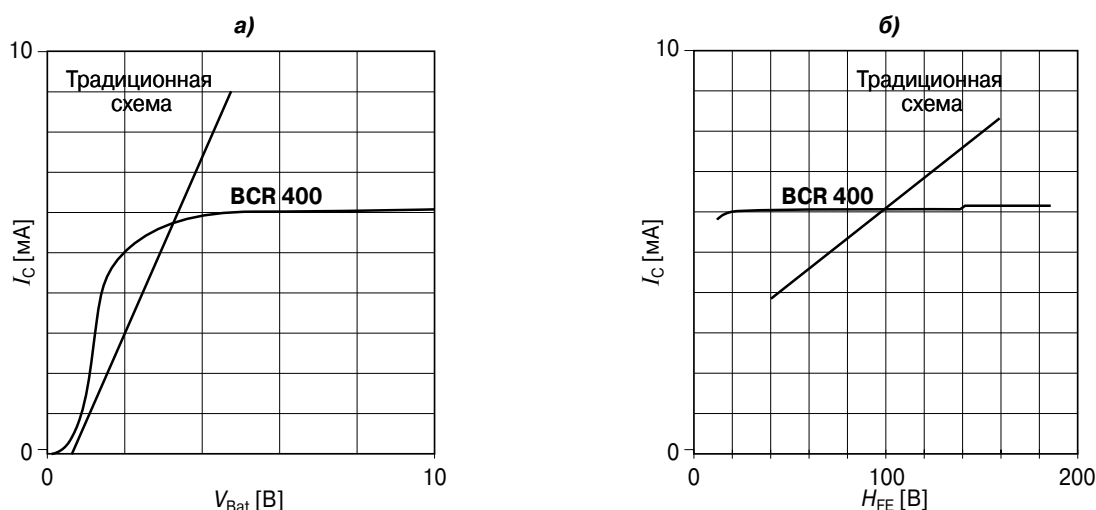


Рис. 2.38. Коррекция колебаний рабочего напряжения (а) и колебаний коэффициента усиления по току (б) регулируемого транзистора при помощи BCR 400 и традиционной схемы.

как описано выше, в большинстве случаев это не имеет последствий. С другой стороны, прямое падение напряжения на p - n -переходе изменяется на несколько милливольт, поскольку изменение падения напряжения на одном из диодов компенсируется аналогичным падением напряжения $V_{EB(pnp)}$ и некомпенсированным остаётся только температурный коэффициент одного диода. Его величина составляет около -2 мВ/К, и, следовательно, это приводит к изменению $V(I)$ (и соответственно к изменению I_C) самое большее на $\pm 15\%$ при изменении температуры на ± 50 К. Колебания $V_{EB(pnp)}$ не играют никакой роли, потому что они не влияют на контур, который определяет ток.

Регулировочная характеристика BCR 400 представлена на **Рис. 2.38**. По сравнению с традиционными схемами, BCR 400 значительно лучше корректирует изменения ра-

бочего напряжения или даже коэффициента усиления по току регулируемого транзистора.

Технические характеристики

Предельные значения и электрические параметры BCR 400W приведены в **Табл. 2.4**. Здесь следует отметить малое падение напряжения, составляющее 0.7 В во всём диапазоне токов, как меньше, так и больше 200 мА.

BCR 400 может поставляться в двух исполнениях: BCR 400R в корпусе SOT143 (с размерами, аналогичными размерам корпуса SOT23) и BCR 400W в миниатюрном SMD-корпусе SOT343 (с размерами, аналогичным размерам корпуса SOT323). Оба исполнения этой микросхемы совместимы по выводам.

Таблица 2.4. Предельные значения и электрические параметры BCR 400

Предельные значения		
Рабочее напряжение	V_S	15 В
Ток управления	$I_{упр.}$	10 мА
Напряжение управления	$V_{упр.}$	8 В
Электрические параметры		
Дополнительный потребляемый ток при $V_S = 3$ В	I_0	40 мА (max)
Минимальный стабилизируемый ток при $V_S = 3$ В	I_{min}	0.1 мА
Изменение тока коллектора при		
– изменениях температуры		0.2%/К
– изменениях рабочего напряжения ($V_S > 3$ В)		$0.15 \Delta V_S / V_S$

3. СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Для того чтобы дать определение силового полупроводникового прибора и области его применения, рассмотрим блоки управления устройств, так называемые электронные блоки управления. В электронных блоках управления входной сигнал, получаемый с датчика, преобразуется в электрический сигнал. Затем, для получения соответствующих управляющих сигналов, этот сигнал обрабатывается устройствами обработки сигналов. И наконец, блок обработки сигналов подаёт управляющие сигналы на регулируемый блок, исполнительное устройство, для получения желаемого результата.

Наглядным примером может служить система обогрева автомобиля, регистрирующая температуру внутри салона при помощи датчика температуры. Напряжение с этого датчика (обычно в качестве датчика используется терморезистор с положительным температурным коэффициентом) сравнивается с заранее заданными пороговыми значениями температуры (верхним и нижним). Устройство обработки включает или выключает исполнительное устройство, например замыкает ключ, включая кондиционер, если температура внутри салона слишком высока.

Короче говоря, в электронных блоках управления производятся измерения, вычисления, задание уставок или, другими словами, в них всегда существует необходимость использования датчиков, микроконтроллеров и силовых полупроводниковых приборов.

3.1. Классификация

На **Рис. 3.1** представлена общая блок-схема электронного блока управления.

Если разделить электронный блок управления на функциональные блоки, то можно выделить блок электропитания, интерфейс обмена данными, микроконтроллер с периферийными устройствами (память и т.д.), устройства последующей обработки сигналов (например, АЦП) и исполнительные устройства. Силовые полупроводниковые приборы используются, главным образом, в исполнительных устройствах и в источниках питания.

Контроллеры такого типа можно найти в бесчисленном количестве устройств, не говоря уже о ноутбуках, мобильных телефонах и других товарах широкого потребления, а также в автомобилях и во множестве про-

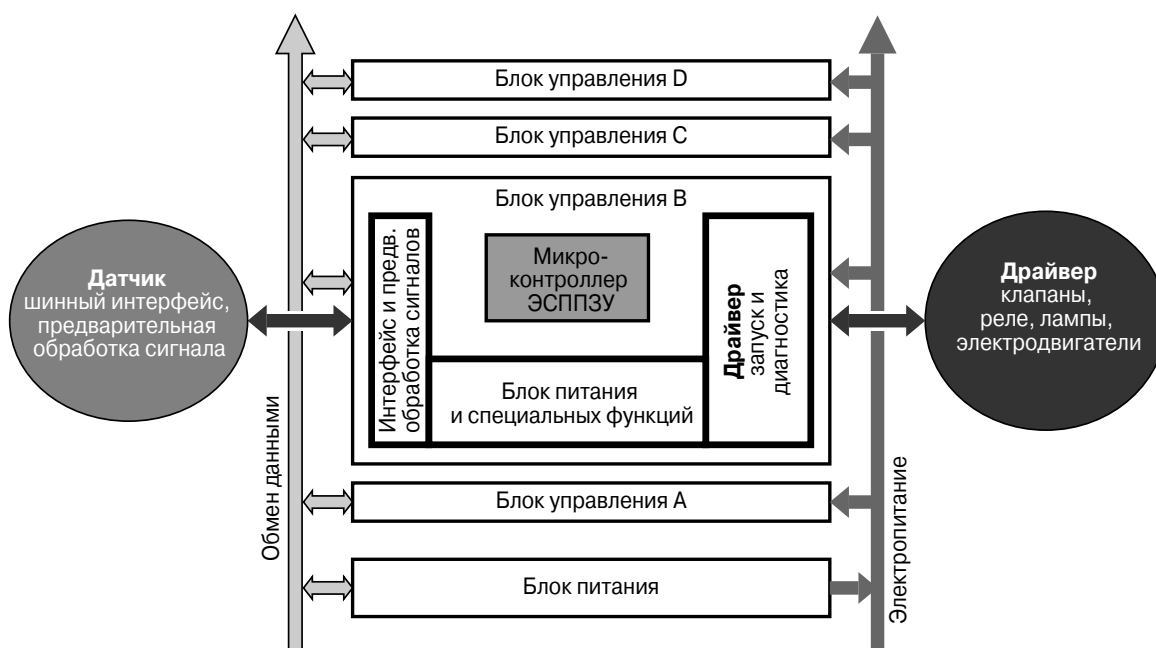


Рис. 3.1. Блок-схема электронного блока управления.

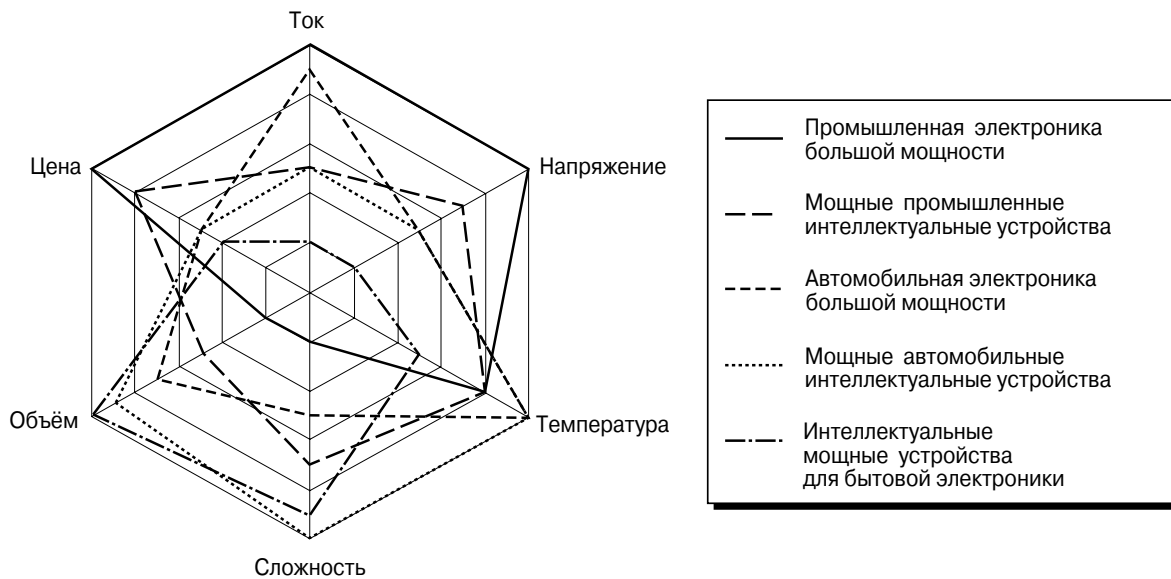


Рис. 3.2. Профили областей применения силовых полупроводниковых приборов.

мышленных устройств. Всё чаще электронные приборы заменяют электромеханические, например реле. Поскольку они должны работать в более сложных приборах, требования по надёжности отдельных компонентов (защита от короткого замыкания и от перегрузки) становятся ещё жёстче. Диагностические функции должны облегчить поиск неисправности в случае отказа и повысить ремонтпригодность. Именно поэтому микросхемы управления и стабилизации в электронных блоках управления часто соединяют в распределенные сети. Они могут иметь очень простую структуру или же, в крайних случаях, могут работать как весьма сложные контроллеры. В связи с этим термин «силовой полупроводниковый прибор» в значительной степени определяется типом рассматриваемого устройства, поскольку, в зависимости от области применения, коммутируемая мощность может отличаться на несколько порядков.

Однако в любом случае одной из функций данных приборов является приведение в действие исполнительных механизмов, например электродвигателей, ламп, нагревательных резисторов и других электромагнитных приводов. Другой их функцией является обеспечение электроэнергией управляющего устройства в целом. В этом случае наиболее важным параметром становится эффективность (КПД). Наряду с увеличением функциональности постоянно происходит снижение энергопотребления. Если рассматривать это с точки зрения миниатю-

ризации, то можно обнаружить, что плотность выделяющейся в современных микропроцессорах энергии (Вт/м^3) с недавних пор достигла плотности энергии, выделяемой в топливном стержне ядерного реактора. Это ставит новые задачи перед силовой электроникой.

Для того чтобы разъяснить эти специфичные для каждой области применения силовых полупроводниковых приборов требования, рассмотрим подробнее три основные области их применения: промышленность, автомобилестроение и бытовая электроника.

Наиболее важные параметры для этих областей представлены на Рис. 3.2 в виде отрезков прямых, выходящих из начала координат и имеющих свой вес для каждой области применения. Вершины этих отрезков образуют замкнутый контур, который представляет собой профиль области применения.

Наиболее важными параметрами являются ток, напряжение, диапазон рабочих температур и требования по электромагнитной совместимости (ЕМС). Рыночные характеристики представлены объёмом (в штуках) и ценой.

Сложность устройств также вводится в качестве параметра. По этому параметру рынок промышленной и автомобильной электроники можно разделить на две подгруппы: силовая электроника высокой мощности и интеллектуальная силовая электроника.

3.1.1. Классификация силовых полупроводниковых приборов по их параметрам

Рис. 3.2 позволяет сделать следующие выводы:

- **Ток.** По данному параметру, наравне с зарождающейся областью автомобильной электроники большой мощности (интегрированный стартер-генератор и система управления батарейным питанием, см. главу 9) преобладает область промышленной электроники с токами порядка нескольких килоампер. Токи интеллектуальных устройств в автомобилях и промышленности могут лежать в диапазоне от 5 до 100 А. В устройствах бытовой электроники, компьютерах, мобильных телефонах, телевизорах и радиоприёмниках значения токов достигают единиц ампер. Исключениями являются сильноточные источники питания для современных процессоров со значениями токов до 100 А.
- **Напряжение.** По этому параметру устройства промышленной электроники являются безусловными лидерами с напряжениями от 20...200 В до нескольких киловольт (кВ). Однако в будущем в автомобилях будет необходимо использовать более высокие уровни напряжения для системы освещения, зажигания и для так называемых пьезопроводов системы впрыска топлива. То же самое относится к устройствам, которые появятся в будущем в автомобилях с электрическим приводом или с топливными элементами. Современные стандартные полупроводниковые приборы для автомобилей требуют напряжения 8...18 В для легковых и до 36 В для грузовых автомобилей. Могут возникать короткие броски напряжения до 100 В, вызванные неисправностями, например при отсоединении батареи (сброс нагрузки). В устройствах бытовой электроники значения напряжений в большинстве случаев находятся на более низком уровне. Исключением является относительно большой сегмент рынка, представленный импульсными источниками питания (SMPS) и корректорами коэффициента мощности (ККМ), которые подключаются к электрической сети питания (220 В переменного тока). В данном

случае требуются приборы на напряжение в несколько сотен вольт.

- **Температура.** Различают температуру окружающей среды T_A и температуру кристалла T_j . При рассмотрении силовых электронных приборов необходимо учитывать это различие, поскольку активные потери мощности, как правило, возникают непосредственно в самом силовом полупроводниковом приборе. Это приводит к появлению большой разности температур на тепловом сопротивлении между кристаллом и окружающей средой (R_{thj-a}). Наибольшие абсолютные значения температуры окружающей среды T_A характерны для автомобильной электроники, от -40 до $+135^\circ\text{C}$. В промышленной электронике этот диапазон обычно ограничен значениями от -25 до $+85^\circ\text{C}$. А в бытовой электронике рабочие температуры обычно лежат в диапазоне от 0 до $+85^\circ\text{C}$. Пользователи и потребители хотят наилучшей температурной совместимости в силовых полупроводниковых приборах (значения T_j), поскольку снижение разности температур кристалла и окружающей среды лишь в редких случаях может быть получено без дополнительных затрат (использования радиаторов и т.д.). Именно поэтому приборы компании Infineon рассчитаны на работу при температуре кристалла до $+150^\circ\text{C}$ при пиковых значениях свыше $+200^\circ\text{C}$.
- **Сложность.** Силовые интеллектуальные полупроводниковые приборы для автомобильной, бытовой и промышленной электроники значительно опережают по этому параметру традиционные силовые приборы. Правило таково: для более сложных и мощных приборов используется более дорогая технология производства полупроводниковых пластин. Оптимальным образом дополнительные функции реализуются при изготовлении приборов по разработанной компанией Infineon технологии «кристалл на кристалле». Она даёт возможность изготавливать интеллектуальные силовые полупроводниковые приборы большой мощности с оптимальным соотношением цена/производительность.
- **Объём и цена** (рыночные критерии). Больше всего приборов применяется в бытовой электронике, затем следуют автомобильные и промышленные интел-

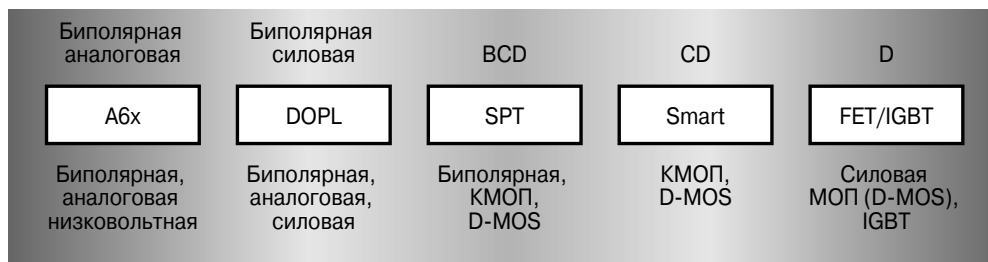


Рис. 3.3. Технологии изготовления полупроводниковых пластин для автомобильной электроники.

лектуальные силовые приборы. Меньше выпускается электронных устройств большой мощности. Тем не менее, доля так называемой кремниевой начинки в цене данных устройств очень велика. В сегменте интеллектуальной силовой электроники ценовой прессинг относительно высок. Самые низкие цены наблюдаются в сегменте бытовой электроники.

Различные профили могут быть получены в оптимальном виде только при использовании специально адаптированных технологий, применяющихся на начальном (front-end) этапе (изготовление полупроводниковых пластин) и конечном этапе (back-end) разработки (изготовление корпусов). В качестве примера, на **Рис. 3.3** представлены технологии исследований и разработки, необходимые для автомобильной электроники. Именно поэтому компания Infineon предлагает оптимизированные приборы для каждого подсегмента рынка. Следовательно, компания Infineon является поставщиком системных решений. В структуру компании Infineon Technologies входят подразделения автомобильной электроники (Automotive Power), промышленной электроники (Industrial Power), микроконтроллеров (Microcontrollers) и датчиков (Advanced Sensors), каждое из которых охватывает свой подсегмент рынка.

3.2. Разработка продукции

Разработка продукции начинается с идеи. Начиная с этого момента, заданная спецификация согласовывается с одним или несколькими потенциальными заказчиками. Затем возможность реализации проекта проверяется при помощи компьютерного моделирования самого объекта или системы в целом, т.е. заказчик задаёт технические параметры устройства, а специалисты конструкторского отдела Infineon прово-

дят его разработку, подбирая оптимальные технологии, используемые на начальном (front-end) и конечном (back-end) этапах проекта, под требования приложений.

Вслед за успешным анализом технической реализуемости начинается этап создания продукции с коммерческого планирования. После составления этого плана отделом менеджмента, разрабатывается концепция создания продукции. Затем задаются и определяются начальный и конечный этапы реализации продукции.

Когда все важные параметры будут заданы, начинается производство первой партии полупроводниковых пластин. Если никакие исправления не требуются, то этап технического задания и реализации на этом завершается. Следом за ним начинается этап оценки и маркетинга проекта.

После создания полупроводниковой пластины и её корпусирования на конечном этапе разработки, полученные приборы измеряются, проводятся испытания в схеме применения, и, если результаты удовлетворительные, выпускается опытная партия. Разработка продукции завершается только в том случае, если сделаны все необходимые доработки, технические характеристики полностью соответствуют требованиям и продемонстрирована надёжная работа изделия. С данного момента предварительная спецификация считается готовой. Заказчик получает опытные образцы для разработки конечного устройства.

В дополнение к этому, некоторые заказчики получают оценочный комплект. Он состоит из готовой платы, на которой реализована эталонная схема применения, протоколов испытаний и руководства по применению, полного программного обеспечения, которое может понадобиться для управления прибором, и контактные данные ответственных специалистов для решения технических вопросов. Специалисты

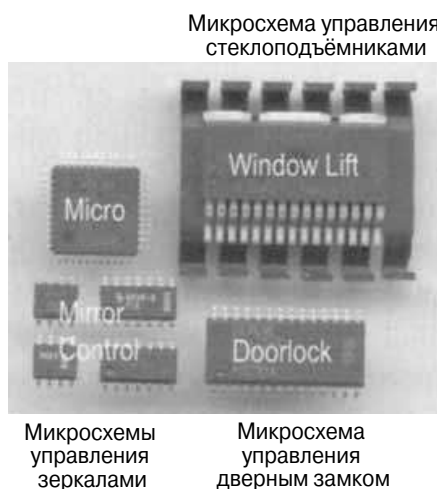
Стандартный комплект микросхем

Рис. 3.4. Специализированная стандартная ИС управления дверями автомобиля с бортовым напряжением 42 В.

по применению работают с заказчиком до полного завершения проекта. При возникновении проблем он может также проконсультироваться со специалистом по конкретному прибору в головном офисе компании. Например, совместно с заказчиком можно провести моделирование тепловых процессов во всём электронном блоке управления. Или при возникновении электромагнитных помех в устройстве соответствующий электронный блок управления может быть оптимизирован совместно со специалистами компании Infineon по электромагнитной совместимости.

Затем опытные образцы передаются на квалификационные испытания, которые проводятся под наблюдением соответствующего подразделения. После этого приборы передаются в серию, и начинается постепенное наращивание объёмов производства. После изготовления достаточно большого количества партий продукции, отдел маркетинга выпускает окончательную спецификацию (datasheet), и начинаются крупносерийные поставки.

3.2.1. Различия процессов разработки продукции

Существуют основные отличия в процессе разработки, в зависимости от которых разрабатываемая микросхема будет стандартной (широкого применения), специализированной стандартной, называемой также полузаказной (Application Specific Standard Product — ASSP) или узко специа-

лизированной, заказной (Application Specific Integrated Circuit — ASIC).

Стандартные ИС не имеют чётко выраженной специализации. Они должны использоваться как можно большим числом потребителей в как можно большем количестве приложений. Поскольку такие ИС легко скопировать, быстро развивается конкурентная среда с относительно высоким ценовым давлением.

С другой стороны, специализированные стандартные ИС (ASSP) предназначены для конкретного применения и используются, главным образом, ограниченным числом потребителей. Они могут быть рационально использованы только в определённых приложениях, для которых они предназначены. Примеры современных специализированных ИС: — мостовая схема управления электроприводом дроссельной заслонки (система ETC) TLE7209, специализированная микросхема питания для подушек безопасности TLE6711 или набор микросхем для передних дверей автомобиля, состоящий из микросхемы питания и передачи данных TLE6263 и многофункционального драйвера TLE7201.

Тенденция к применению ASSP пояснена на примере микросхемы управления дверями автомобиля, приведённой на **Рис. 3.4.** При использовании автомобильного источника питания с напряжением 42 В в одной микросхеме можно объединить полный набор силовых функций. В принципе, в эту микросхему также можно включить и микроконтроллер.

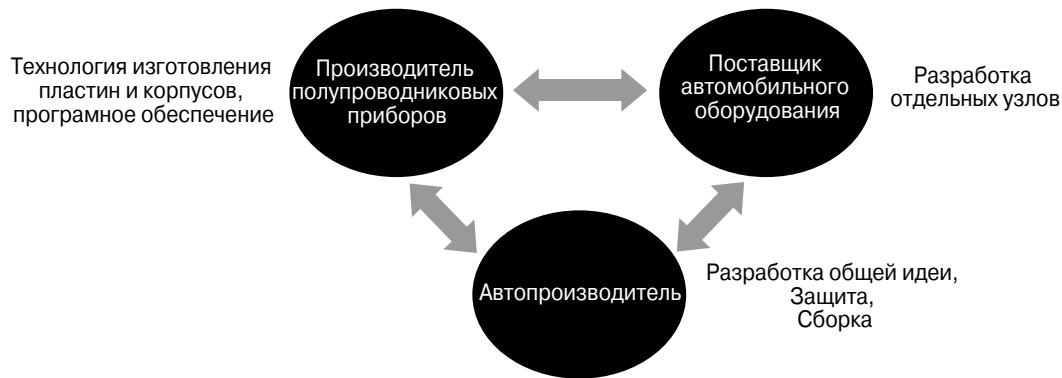


Рис. 3.5. Треугольник взаимоотношений в процессе разработки.

Заказные ИС (ASIC) полностью изготавливаются в соответствии с требованиями заказчика. Основная цель — реализация пожеланий заказчика. Только в редких случаях возможна работа с заказчиками для дальнейшей оптимизации системы. В этом случае важным фактором для компаний-изготовителей оборудования (OEM), например автопроизводителей, является возможность участия в разработке (Рис. 3.5).

Это единственный способ для решения спорных вопросов, которые могут существовать и которые непременно возникнут в «конвейерной структуре» OEM — поставщик автоэлектроники — поставщик полупроводниковых приборов.

С другой стороны, в случае использования ASSP и тем более стандартной продукции необходимо провести исследования рынка, опросив большое количество потребителей, чтобы получить наиболее широкую область применения. Это единственная возможность обсудить функции готовых наборов микросхем. Организация производства в компании Infineon (датчики, микроконтроллеры и силовые микросхемы) позволяет добиться комплексного подхода при изготовлении печатных плат различных устройств (т.е. по возможности организовать поставку всех микросхем для печатной платы в виде системного набора микросхем).

3.3. Группы продукции

Для того чтобы классифицировать силовые полупроводниковые приборы по группам, рассмотрим их характеристики как функцию от уровня интеграции (сложности). Из Рис 3.6 видно, что простые компоненты, МОП-транзисторы и IGBT находятся в начале оси «характеристик» (сложность).

Если к МОП-транзистору или IGBT добавить схемы защиты, то в самом простом случае мы получим так называемый TEMPFET (MOSFET с защитой от перегрева). Силовые полупроводниковые приборы с дополнительными интеллектуальными устройствами контроля состояния обычно называются SmartFET. Далее можно выделить PROFET (защищённые полевые транзисторы), или верхние ключи (располагаются между плюсом источника питания и нагрузкой, второй вывод нагрузки подключён к земле) и HITFET (полевые транзисторы с высокой степенью интеграции), или нижние ключи (см. подраздел 3.4.3).

Если объединить несколько интеллектуальных полевых транзисторов и добавить дополнительные функции, то мы получим интеллектуальную силовую микросхему (PIC — от *англ.* smart Power Integrated Circuit). К этой группе относятся многоканальные ключи, полумостовые и мостовые микросхемы (полумостовая микросхема состоит из двух последовательно соединённых ключей между положительной и отрицательной шиной источника питания), микросхемы источников питания и микросхемы линейных драйверов.

Ещё более высокий уровень интеграции ведёт к появлению так называемых силовых системных микросхем. Они изготавливаются и оптимизированы по стоимости специально для конкретной задачи (например, для управления подушками безопасности или антиблокировочной системы тормозов).

Наивысшие уровни интеграции достигаются путём использования встроенных силовых устройств. Это, по крайней мере теоретически, законченные системы на одном кристалле или на нескольких кристаллах в одном корпусе. Однако, на сегодняшний



Рис. 3.6. Группы силовых полупроводниковых приборов.

день, только в редких случаях этот путь является экономически оправданным.

3.4. Технология изготовления полупроводниковых пластин (начальный этап проекта)

Каждая группа продукции может оптимальным образом быть изготовлена при использовании какой-то конкретной технологии. В области силовой электроники используется множество технологий. Это и базовая биполярная, МОП-, комплементарная МОП- (C-MOS) и силовая МОП-технологии (D-MOS), а также их комбина-

ции. На Рис. 3.7 показаны связи этих технологий с группами продукции.

3.4.1. Базовые технологии

КМОП-технология

Эта технология получила название КМОП (комплементарная МОП), так как в ней используются только p - и n -канальные МОП-транзисторы, резисторы и конденсаторы. Транзистор изготавливается в карманах p - и n -типа с затвором из поликристаллического кремния. В качестве резистора можно использовать слой из поликремния. Обкладками конденсатора служат слой по-

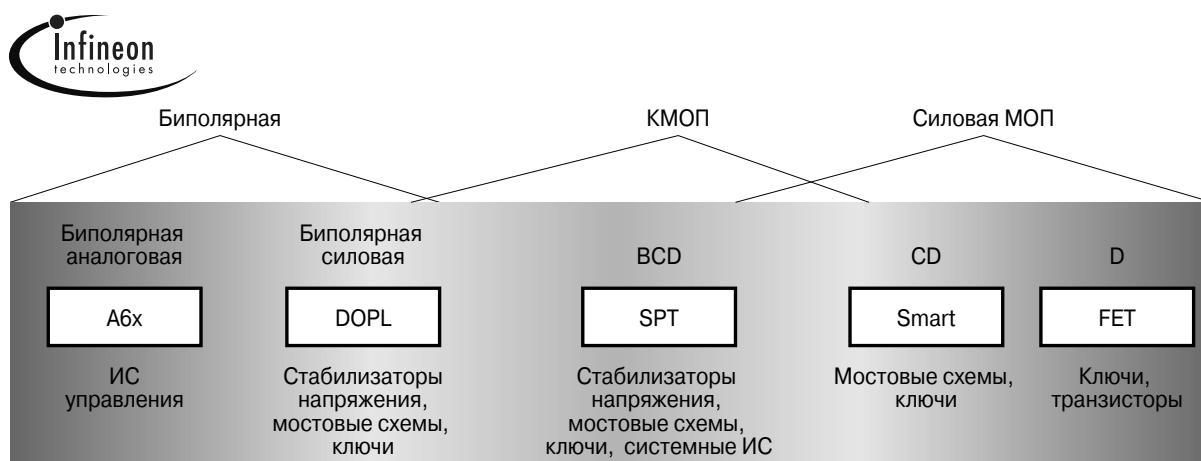


Рис. 3.7. Обзор технологий и связанных с ними групп продукции.

ликремния и легированная подложка, а диэлектриком — оксидный слой. КМОП-технология оптимизирована для реализации логических функций. По существу, с её помощью можно создавать устройства с очень низкими напряжениями питания (5 В, 3 В, 1.8 В), а это позволяет использовать компоненты небольшого размера с высокой степенью интеграции. На КМОП-транзисторах могут быть также реализованы аналоговые функции. Компания Infineon располагает целым рядом технологических процессов (C5, C6, ..., C11) производства логических схем, некоторые из которых используются при изготовлении микросхем ЭСППЗУ или флэш-памяти.

Биполярная технология

В биполярной технологии в качестве активных элементов используются *n-p-n* и *p-n-p* биполярные транзисторы. Для чисто биполярных структур не требуются затворы из поликремния. Следовательно, подобные технологические процессы включают меньшее количество операций и поэтому очень рентабельны. Степень интеграции зависит от класса технологии по пробивному напряжению. Класс напряжения зависит от размеров интегральных транзисторов. DOPPL — это биполярная технология, разработанная компанией Infineon.

ДМОП-технология (DMOS)

ДМОП-, или DMOS-транзисторы (от *англ.* Double diffused MOS — МОП-транзисторы, изготовленные методом двойной диффузии) — это транзисторы, оптимизированные для коммутации больших токов и предназначенные для работы при высоких напряжениях. Данный транзистор имеет длинный канал, благодаря чему можно получить высокое пробивное напряжение. Конструктивно он состоит из параллельно соединённых ячеек, что позволяет получить высокие токи (низкое сопротивление в открытом состоянии) и высокую плотность энергии. ДМОП-структуры имеют более толстый, чем у логических структур, подзатворный оксидный слой, что позволяет изготавливать более надёжные приборы. Компания Infineon предлагает различные ДМОП-технологии, которые оптимизированы для отдельных устройств. Например, PFET- и SFET-технологии.

Если эти базовые технологии объединить в логической последовательности, то мы получим следующие интересные варианты, которые, благодаря их специфическим характеристикам, предназначены для конкретного применения.

БиКМОП-технология

БиКМОП-технология сочетает в себе биполярные и КМОП-компоненты. Такая комбинация компонентов позволяет реализовывать различные аналоговые функции, например прецизионные источники опорного напряжения. Компания Infineon предлагает различные БиКМОП-технологии, которые, например, оптимизированы для применения в ВЧ устройствах.

CD-технология

CD-технология сочетает в себе КМОП- и ДМОП-компоненты. Это позволяет одновременно в одной микросхеме совмещать логические функции, высокую мощность и большие токи. Один из примеров CD-технологии, предлагаемой компанией Infineon, — интеллектуальная технология.

VCD-технология

VCD-технология — это технология, сочетающая в себе биполярные, КМОП- и ДМОП-компоненты. С их помощью можно изготавливать компоненты на различные классы напряжения. КМОП-структуры позволяют получить высокие плотности размещения логических элементов. Таким образом, существует возможность, например, интегрирования микроконтроллера. Совместное использование биполярных и КМОП-структур позволяет создать прецизионные схемы опорного напряжения. ДМОП-транзисторы позволяют коммутировать высокие токи и напряжения (вплоть до 20 А и 80 В).

В некоторых случаях для достижения высоких степеней интеграции в низковольтных логических схемах используется более одного подзатворного оксидного слоя (субмикронная логика). Также возможно создание нескольких резистивных слоёв из поликремния. В передовой VCD-технологии используется более 25 фотолитографий (фотошаблонов). Однако это делает её более дорогостоящей по сравнению с более простыми технологиями, например КМОП.

3.4.2. Силовые MOSFET

В большинстве случаев силовые МОП-транзисторы используются в качестве ключей. Только в редких случаях их аналоговый режим работы играет какую-либо роль. Можно выделить следующие состояния транзистора:

- Транзистор выключен.
Через транзистор должен протекать наименьший возможный ток при максимальном приложенном напряжении. Параметры, связанные с данным режимом работы транзистора, — напряжение пробоя и ток утечки.
- Транзистор включён.
В этом состоянии сопротивление транзистора (сопротивление в открытом состоянии) должно быть как можно меньше при максимально возможных значениях тока. Параметры, связанные с данным режимом работы транзистора, — сопротивление сток — исток в открытом состоянии и максимальный ток.
- Включение или выключение транзистора.
Время переключения должно быть как можно меньше и величины изменения заряда настолько малыми, насколько это возможно. Параметры, характеризующие данный режим работы транзистора, — время переключения, крутизна передаточной характеристики и величина заряда затвора.

Современные технологии позволяют получать приборы с рабочей температурой свыше $+200^{\circ}\text{C}$. Высокие рабочие темпера-

туры позволяют уменьшить площадь кремниевого кристалла и снизить затраты на охлаждение. Именно поэтому стремление к более высоким температурам кристалла сочетается с более длительным сроком службы и активной и пассивной надёжностью.

Дополнительными параметрами, влияющими на надёжность, которые следует упомянуть, являются устойчивость к электромагнитным помехам (ElectroMagnetic Interference — EMI) и устойчивость к воздействию электростатических разрядов (ElectroStatic Discharge — ESD).

Специально для автомобильной промышленности компания Infineon разработала технологию OPTIMOS, позволяющую изготавливать приборы с оптимальными параметрами практически для любых применений.

На **Рис. 3.8** показано совершенствование транзисторов на примере наиболее важного параметра — сопротивления в открытом состоянии R_{on} .

На рисунке представлены четыре последних поколения ключей с сопротивлением в открытом состоянии 18 мОм, а также указаны соответствующие технологии изготовления и снижение стоимости. Соотношение цена/производительность значительно улучшилось: более дешёвые микросхемы меньших размеров могут использоваться для коммутации более высокой мощности. Соответствующие корпуса приборов могут также изготавливаться по более низкой цене, так как потери мощности будут ниже.

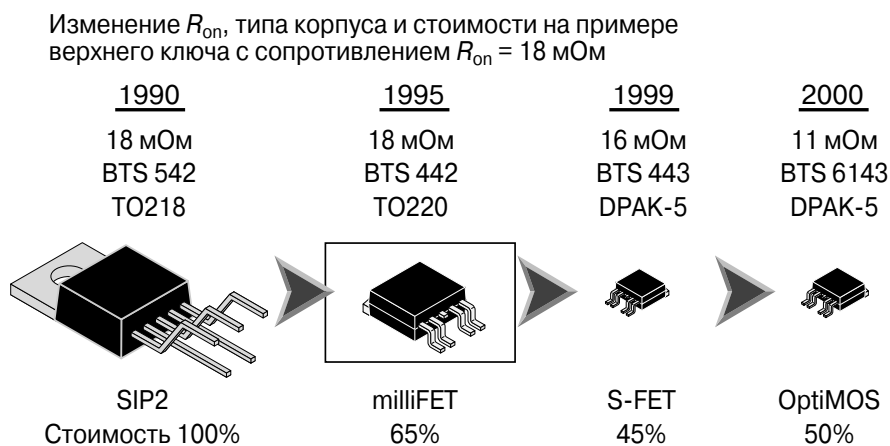


Рис. 3.8. Развитие полупроводниковых ключей на примере 18-мОм верхнего ключа.

3.4.3. Интеллектуальные МОП-транзисторы (SmartFET)

Если в приборы, изготовленные по силовой МОП-технологии (power-MOS), добавить дополнительные карманы p - и n -типа, то появляется возможность сочетать дополнительные функции в одном устройстве. МОП-транзисторы становятся интеллектуальными. Например, можно интегрировать функции защиты и контроля состояния прибора. Ряд компонентов, которые можно получить в результате данного усовершенствования, представлен на **Рис. 3.9**.

Как мы видим, на данном рисунке не представлены биполярные структуры. Таким образом, мы имеем дело с CD-технологиями (КМОП и ДМОП). Основные параметры приборов, изготовленных по этим технологиям, определяются спецификацией на электронные ключи.

В случае CD-технологии интерес представляет то, какое количество дополнительных компонентов и какого типа можно интегрировать. Данный параметр называется топологическими нормами; от него зависит размер компонентов и плотность их размещения, определяется он, как правило, толщиной подзатворного диэлектрика и дополнительными этапами изготовления. В любом случае правило таково: технология с меньшими топологическими нормами является более сложной для реализации и, как следствие, более дорогостоящей.

Как и в случае с силовыми МОП-транзисторами, ток течёт вертикально через

транзистор. Таким образом, все элементы имеют одну подложку, которая является стоком силовой структуры. Сопротивление в открытом состоянии будет меньше, чем в структурах с изолированным стоком. В дальнейшем оно может быть уменьшено путём сошлифования пластины до толщины в несколько десятков микрон. Таким образом, можно изготовить некоторые силовые структуры, стоки которых будут соединены вместе. У подобных устройств с общим стоком теплоотводящая пластина корпуса должна быть изолирована от внешнего заземлённого радиатора, поскольку часто потенциал стока не совпадает с потенциалом земли системы. На **Рис. 3.10** показан путь протекания тока в структуре такого типа, а на **Рис. 3.11** — примеры использования данных структур.

С точки зрения применения, с помощью CD-технологии можно создать так называемые верхние и нижние ключи. Понятия верхний ключ и нижний ключ следуют из схемы их включения (см. **Рис. 3.11**), на которой показана последовательность подключения ключа и нагрузки. В общем случае, отрицательный потенциал источника питания соединяется с землёй схемы, как, например, в автомобильных источниках питания.

Если нагрузка соединена с землёй системы (например, в автомобиле), то это позволяет использовать на один провод меньше, потому что ток будет возвращаться в аккумулятор через корпус автомобиля. Если на-

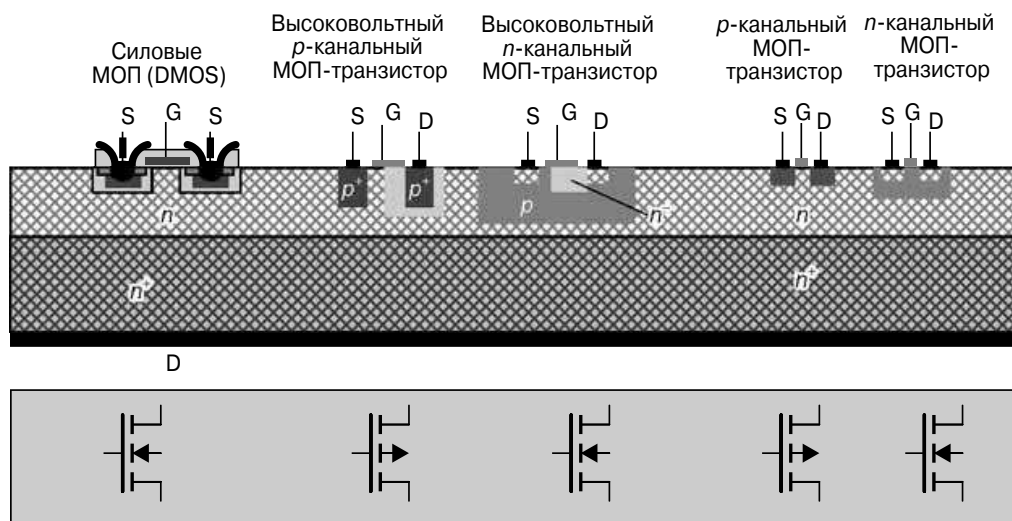


Рис. 3.9. Технологии изготовления полупроводниковых интеллектуальных силовых устройств компании Infineon.

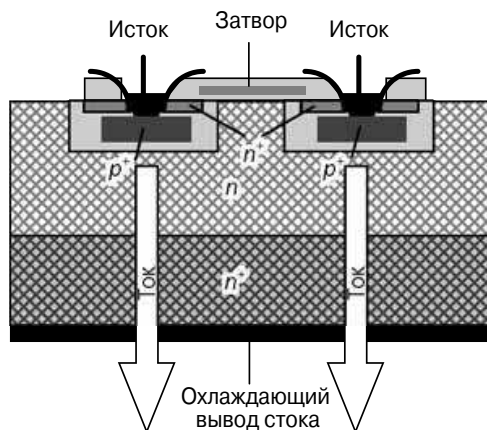
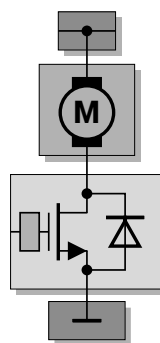


Рис. 3.10. Направление протекания тока в структурах с общим стоком.

Нижний ключ:

- Нагрузка подключается к $+V_S$
- Исток подключается к земле



Верхний ключ:

- Нагрузка подключается к земле
- Сток подключается к $+V_S$

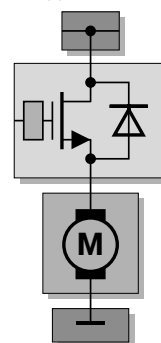


Рис. 3.11. Блок-схема включения верхних и нижних ключей.

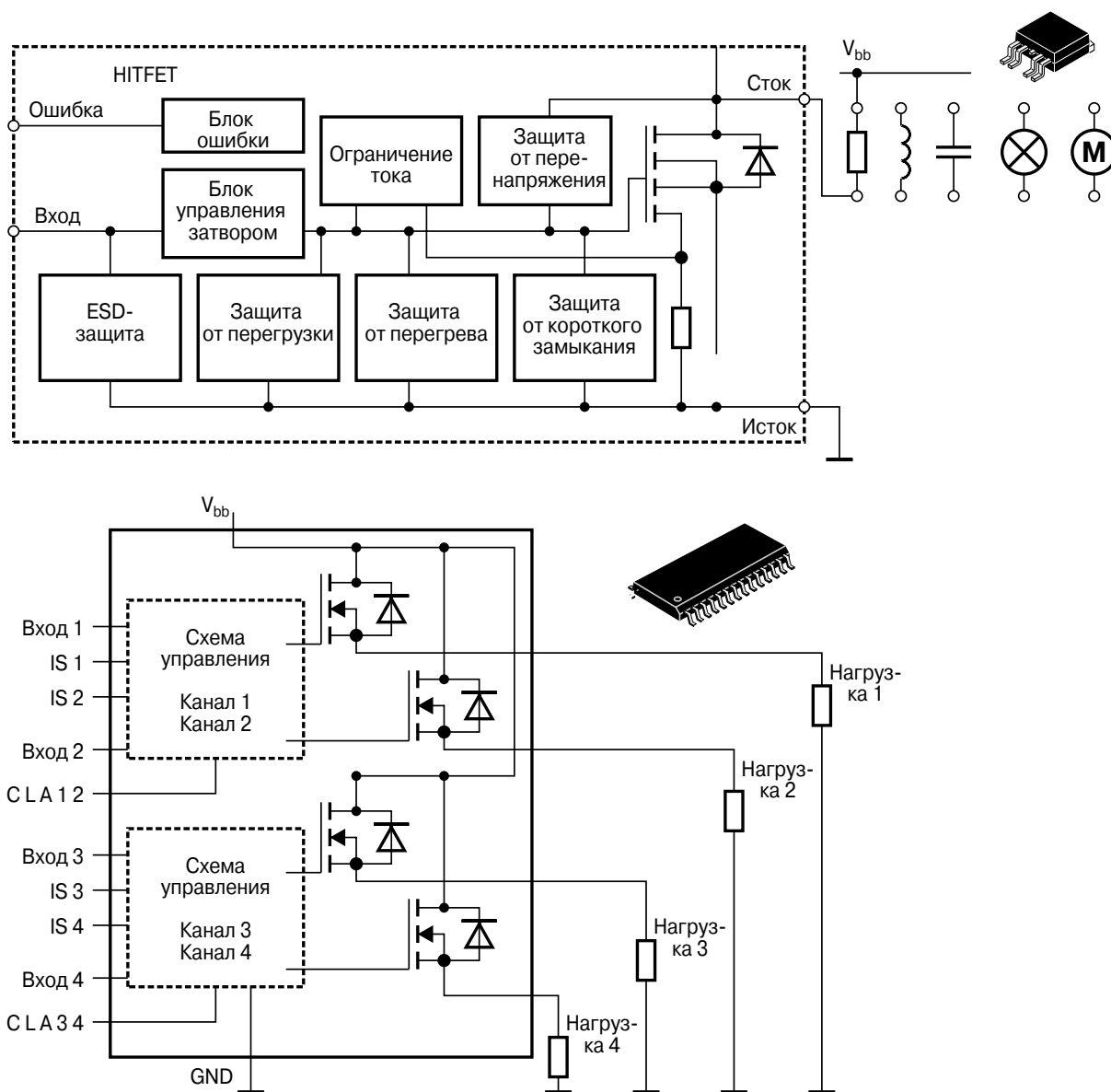


Рис. 3.12. Блок-схемы нижнего ключа BTS3150 (вверху) и верхнего ключа BTS5140 (внизу).

грузка соединена с землёй, то ключ должен быть подключён между нагрузкой и плюсом аккумуляторной батареи; на схеме, приведённой на **Рис 3.11**, он будет находиться на верхней стороне. С другой стороны, нижний ключ всегда соединён с землёй системы. На **Рис. 3.12** показаны типичные верхние и нижние ключи, выпускаемые компанией Infineon.

Выпускаются не только дискретные электронные ключи, но и так называемые мостовые схемы, поскольку всё чаще применяются реверсивные электроприводы с электронным управлением. На **Рис 3.13** представлена так называемая мостовая (H-bridge) схема. Эта схема может использоваться для соединения нагрузки, обычно двигателя постоянного тока, с источником питания любой полярности.

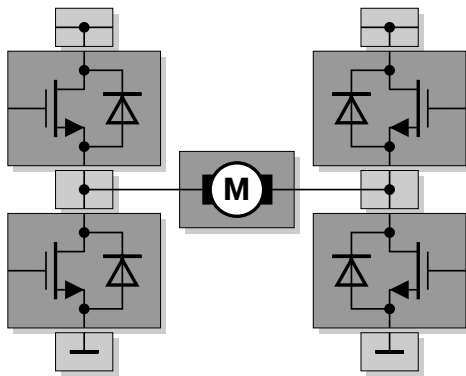


Рис. 3.13. Мостовая схема для реверсивного электропривода.

Помимо интегрированных в одном корпусе слаботочных схем, были также разработаны микросхемы семейства TrilithIC. Это мостовые схемы, которые совмещают в одном корпусе МОП-транзисторы и/или управляющий чип. Сокращение «TRI» взято потому, что оптимальным для создания мостовой схемы является использование двух кристаллов нижних ключей и одного сдвоенного кристалла верхних ключей. На **Рис 3.14** представлена типовая микросхема подобного типа. Как видно из рисунка, кристаллодержателем служит выводная рамка. Для наглядности микросхема показана без полимерной формовочной массы, чтобы можно было увидеть её внутреннюю структуру.

Компания Infineon осуществляет массовое производство микросхем, изготавливаемых по CD-технологии, уже более 20 лет.

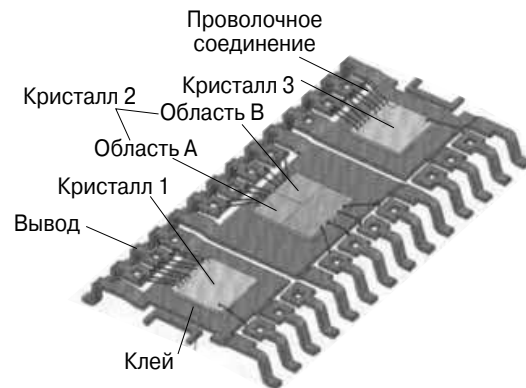


Рис. 3.14. Типовая микросхема семейства TrilithIC.

Последнее поколение микросхем Smart 5 имеет чрезвычайно низкое сопротивление в открытом состоянии и значительно меньшие топологические нормы. Это сделало возможным изготовление мощных электронных ключей со сложной логикой. Сейчас не осталось преград для производства интеллектуальных ключей с полной диагностикой их состояния.

В погоне за слоганом «Кремний вместо реле» будут востребованы устройства с жёсткими требованиями по диагностике; в таких приложениях единственным возможным вариантом является использование интеллектуальных ключей. Практический пример приведен на **Рис. 3.15**. Для того чтобы яснее продемонстрировать эффект сокращения размеров, на данном рисунке в реальном масштабе показаны микросхемы с одинаковым набором функций. Сверху приведена микросхема предыдущего поколения, а снизу — её аналог, изготовленный по новейшей технологии Smart 5.

Конечно, во всех случаях использования CD-технологии должна проверяться целесообразность применения монолитных ИС. Компания Infineon учитывала данный факт при разработке своих базовых концепций: «кристалл на кристалле» (Chip-on-Chip — CoC) и «кристалл рядом с кристаллом» (Chip-by-Chip — CbC). При этом стандартный МОП-транзистор используется в качестве так называемого базового кристалла. Лишь ограниченное количество дополнительных интеллектуальных микросхем требует применения сложных (дорогих) технологий. Два кристалла монтируются один на другом или один рядом с другим по специальной технологии.

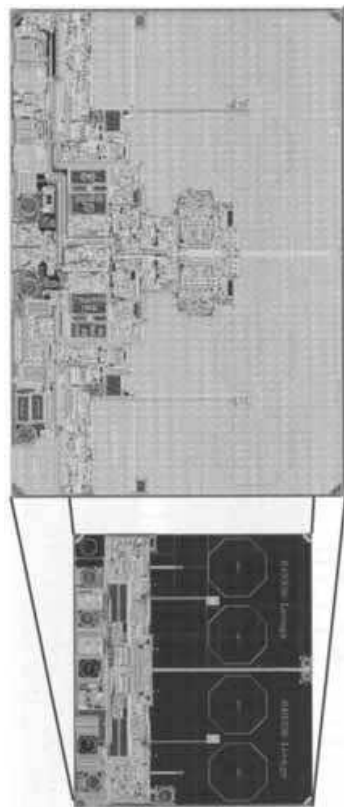


Рис. 3.15. Сокращение размеров кристалла микросхемы поколения Smart 5.

В результате, в зависимости от заданного значения тока или сопротивления в открытом состоянии, которое определяется стоимостью изготовления, так называемые силовоточные ключи производятся по технологии «кристалл на кристалле» или «кристалл рядом с кристаллом».

На сегодняшний день при сопротивлениях в открытом состоянии 20...50 мОм метод «кристалл на кристалле» является более дешёвым в производстве. При более низких токах существует возможность разместить несколько ключей в одном корпусе. В этом диапазоне токов требуется использование технологии со свободно подключаемыми транзисторами, так называемой технологии изготовления интеллектуальных силовых ИС (Smart Power IC).

3.4.4. Интеллектуальные силовые ИС

CD-технология характеризуется довольно низкими топологическими нормами, и по ней нельзя изготовить аналоговые приборы. Указанный пробел заполняется интеллектуальными силовыми технологиями (Smart-Power Technology — SPT), благодаря которым появляется возможность разработки ИС с мощными выходными каскадами, так называемых силовых ИС (Power IC — PIC).

В зависимости от технологического решения, набор компонентов ИС может быть значительно более широким, чем минимальный набор элементов, показанный на Рис. 3.16.

При помощи данной технологии можно получать свободно соединяемые мощные транзисторы. Путь протекания тока показан на Рис. 3.17. Сначала ток протекает вертикально вниз в скрытый слой интегрального транзистора. Скрытый слой проводит ток в сторону расположенного выше соединения со стоком. Сопротивление вертикального участка тока, текущего к поверх-

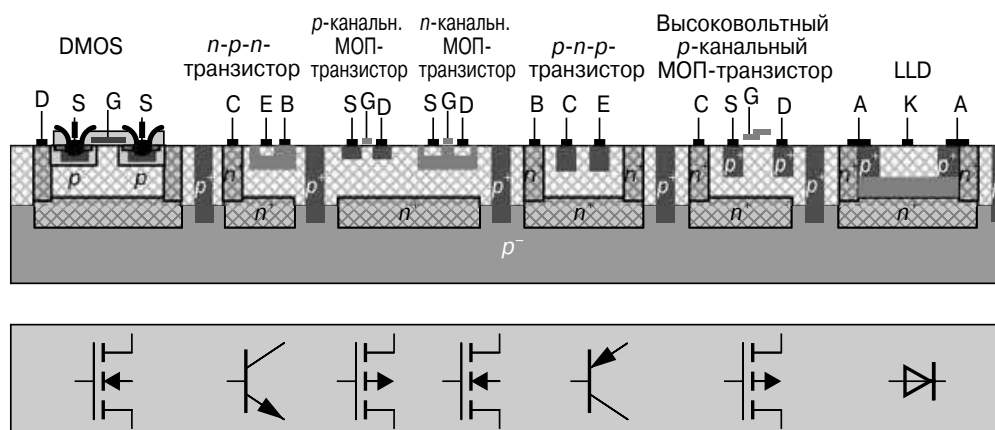


Рис. 3.16. Семейство приборов, изготавливаемых по технологии SPT.

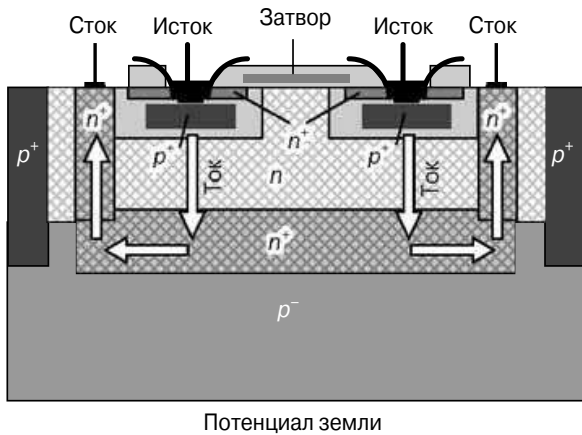


Рис. 3.17. Путь протекания тока и изоляция от подложки в мощных приборах, изготовленных по технологии SPT.

ности, мало благодаря вертикальной n^+ -области, что позволяет изготовить изолированные силовые выводы стока на поверхности кристалла. Однако за это приходится платить значительно более высоким сопротивлением в открытом состоянии.

Следовательно, применение SPT-приборов целесообразно для средних уровней тока. Для изолирования стока транзистора от остальной схемы используется подложка p -типа, которая при подключении к земле удерживает p - n -переход между стоком и подложкой в закрытом состоянии. Легко заметить, что p - n -переход между областью стока и карманами элементов будет оста-

ваться в закрытом состоянии, только если p -подложка будет всегда иметь наименьший потенциал в схеме.

Для охлаждения обратная сторона кристалла в приборе может иметь соединение с землёй. В этом случае не требуется дополнительных изолирующих экранов. Большое многообразие дополнительных опций представлено на **Рис. 3.18**.

Помимо рассмотренных верхних и нижних ключей, по данной технологии может быть реализована полумостовая схема, состоящая из двух последовательно соединённых быстродействующих МОП-транзисторов.

Кроме того, существует возможность изготавливать практически любую из требуемых комбинаций аналоговых и цифровых схем. Типичным примером могут служить микросхема CAN-трансивера TLE6263 с большим количеством прецизионных аналоговых схем и цифровым интерфейсом управления (SPI) и TLE6288 — многоканальный нижний ключ с множеством дополнительных функций.

Компания Infineon производит SPT-приборы уже на протяжении 20 лет, на сегодняшний день используются технологии пятого поколения, SPT5. На **Рис. 3.19** показано, как совершенствовались наиболее важные параметры — R_{on} и топологические нормы.

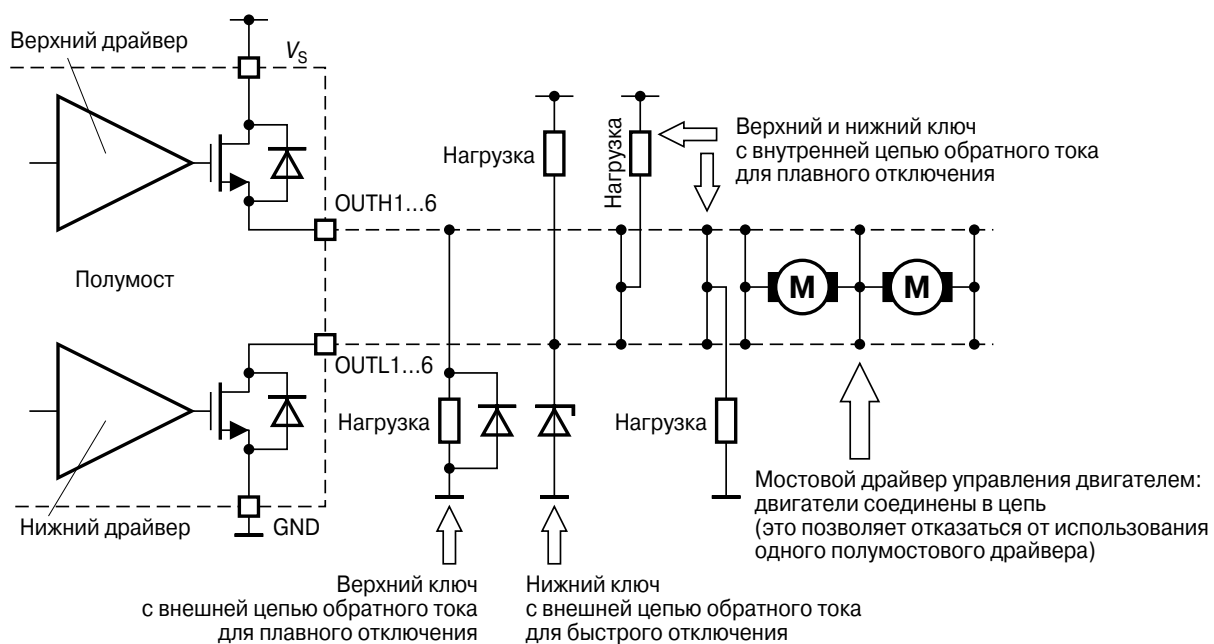


Рис. 3.18. Конфигурация дополнительных устройств для ключей, полумостовых и мостовых схем.

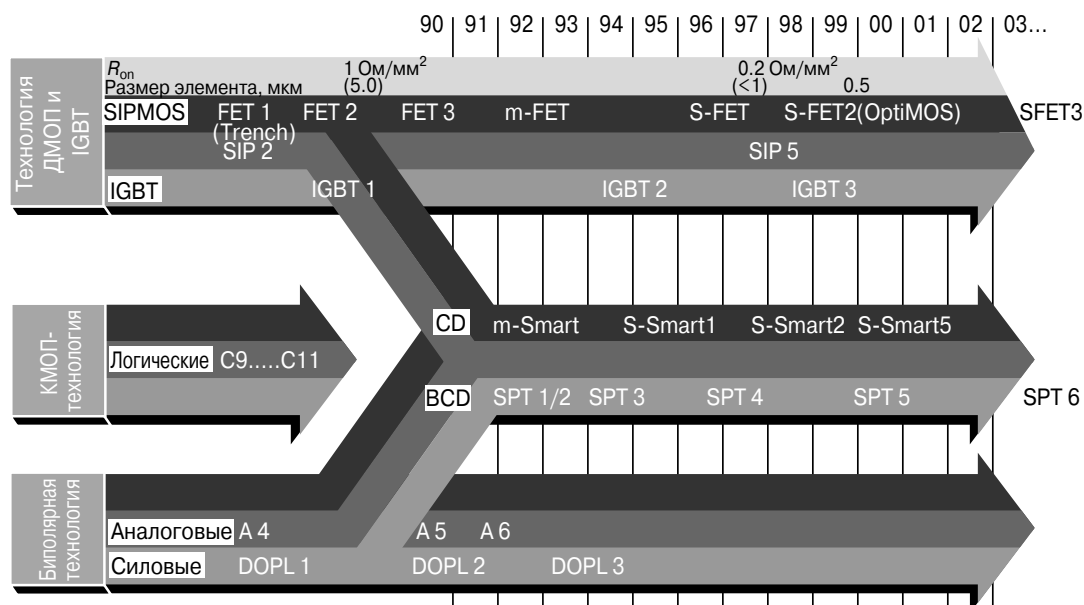


Рис. 3.19. Развитие интеллектуальных силовых полупроводниковых технологий.

Также можно увидеть, как технологии изготовления силовых МОП- (вверху) и биполярных приборов (внизу) объединились с КМОП-технологиями, в результате чего образовалась SPT-технология.

Основные достоинства SPT-технологии представлены на обобщённой схеме (Рис. 3.20). На ней показаны ИС третьего, четвертого и пятого поколения SPT со схожим набором функций. Из рисунка можно увидеть, что более новые ИС при том же размере обладают значительно большей функциональностью.

Возрастание сложности электронных схем предъявляет определённые требования к функциональному распределению площади кристалла, изготавливаемого по современным технологиям. Так, в стандартной SPT-микросхеме 30% площади кристалла занимают силовые элементы, около 40% — аналоговые схемы, а оставшиеся 30% — цифровые. Если сложность каждой из этих частей возрастёт ещё больше, то размер кристалла увеличится втрое. Наибольшую долю в этом увеличении будет иметь цифровая часть, которая увеличится в 6 раз. Чтобы скомпенсировать указанное

Мы можем предоставить нашим клиентам микросхемы с постоянно увеличивающимися функциональными возможностями и уменьшающимися размерами

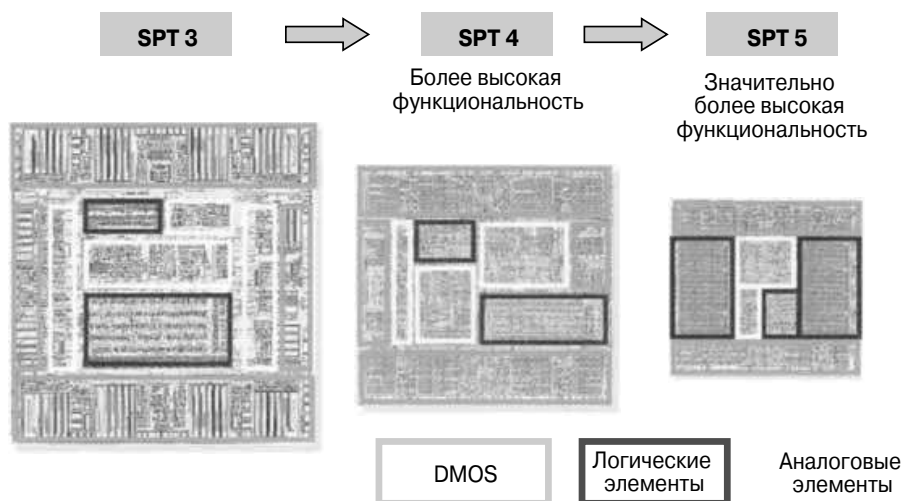


Рис. 3.20. Преимущества высокой степени интеграции.

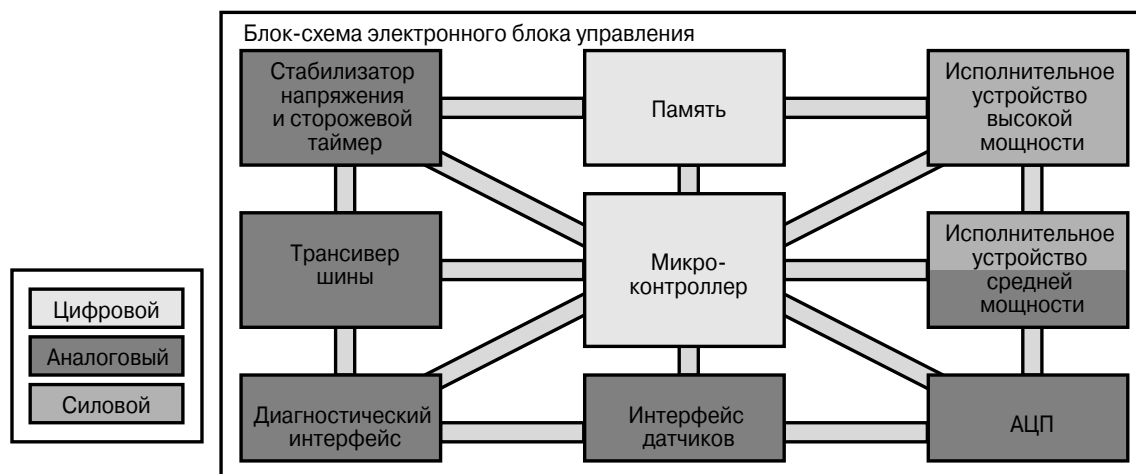


Рис. 3.21. Функциональные блоки электронного блока управления.

увеличение, опережающими темпами нужно уменьшать топологические нормы в технологиях следующего поколения. Соответствующее распределение площади микросхемы будет таким: 46% — силовые элементы, 34% — аналоговые схемы и 20% — цифровые. Таким образом, будет существовать дальнейший потенциал для интеграции большего количества как логических, так и системных функций, что реализуется в интеллектуальных ИС систем питания.

Интеллектуальные ИС систем питания

Увеличение степени интеграции интеллектуальных силовых микросхем привело к появлению интеллектуальных ИС систем питания. Для определения оптимальной степени интеграции в электронных блоках управления, необходимо учитывать параметры входящих в их состав функциональ-

ных блоков. На Рис. 3.21 представлены функциональные блоки типового электронного блока управления. Здесь можно выделить логические (цифровые), аналоговые и силовые блоки.

Требования по току, напряжению и температуре определяют, какие дополнительные функции и по какой технологии могут быть реализованы, а также какие типы корпусов должны использоваться. В частности, из Рис. 3.22 видно, что интерфейс между контроллером и окружающими его высоковольтными силовыми полупроводниковыми приборами чрезвычайно сложен и интересен.

В данном случае нахождение технико-экономического оптимума требует очень тесного взаимодействия, например, между автопроизводителем, его поставщиками и производителем электроники. Как постав-

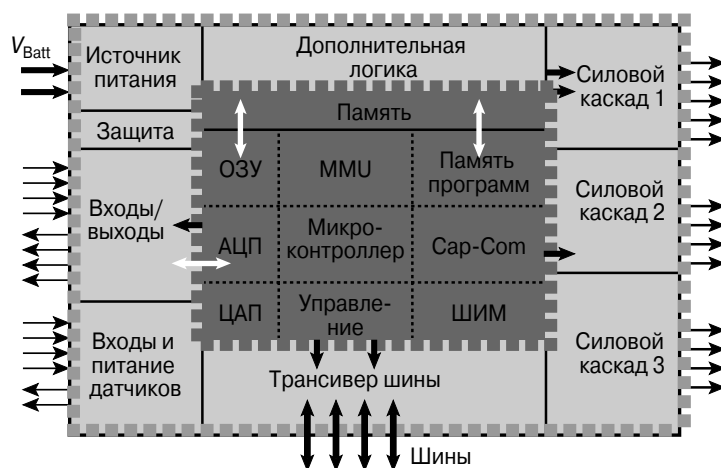


Рис. 3.22. Разбиение электронного блока управления на интеллектуальные функциональные блоки.

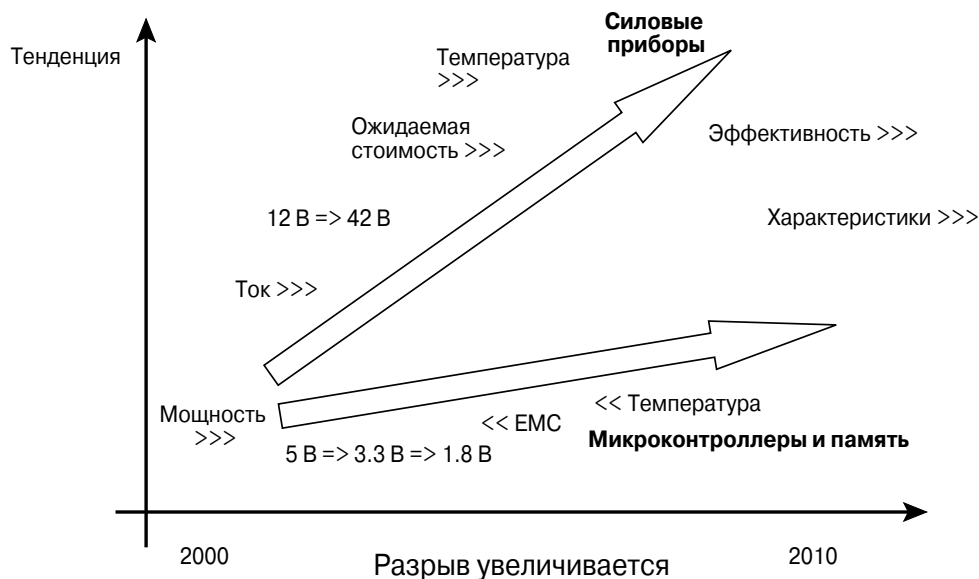


Рис. 3.23. Различные требования, предъявляемые к силовым и логическим устройствам.

щик широкого ассортимента продукции, компания Infineon имеет полный набор оригинальных методов (know-how) для указанного процесса оптимизации системы. Недаром Infineon является первой инстанцией для обращения, когда дело касается системных решений и их «интеллектуального разбиения на части».

3.4.5. Перспективы и тенденции

Требования, которым должны удовлетворять технологии будущего, несомненно определяются характеристиками, которые улучшаются, в некоторых случаях значительно, совместно с более высокой эффективностью. Это подразумевает, с одной сто-

роны, более высокие вычислительные мощности контроллеров, а с другой — потребность в более совершенных (с более низким сопротивлением в открытом состоянии) силовых полупроводниковых ключах. На Рис. 3.23 представлены тенденции изменения отдельных параметров силовых приборов и микроконтроллеров (температура, электромагнитная совместимость, ток и напряжение).

Очевидно, что требования развиваются в различных направлениях.

Аналитический обзор этой характерной ситуации приведён на Рис. 3.24. Очевидно, что в зависимости от сочетания характеристик переключения и тока возможны раз-

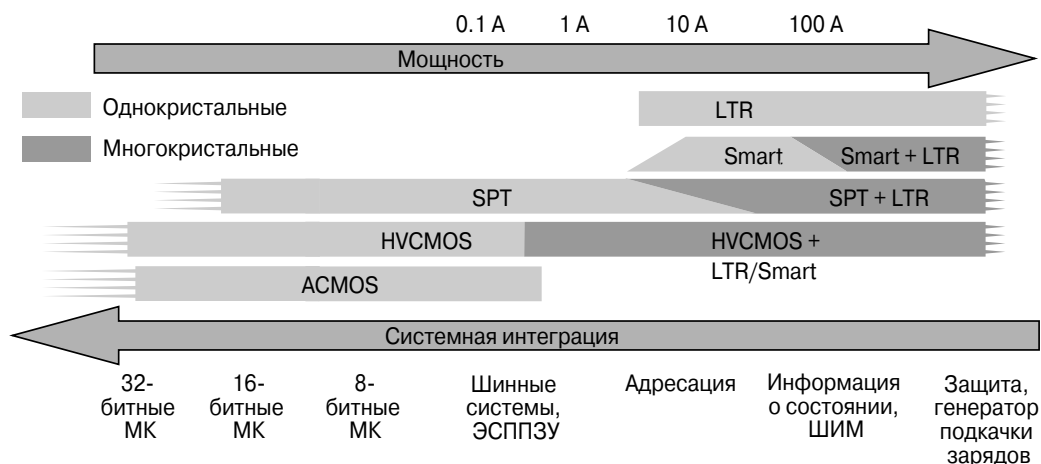


Рис. 3.24. Сравнение технологий изготовления полупроводниковых приборов по току и количеству логических функций.

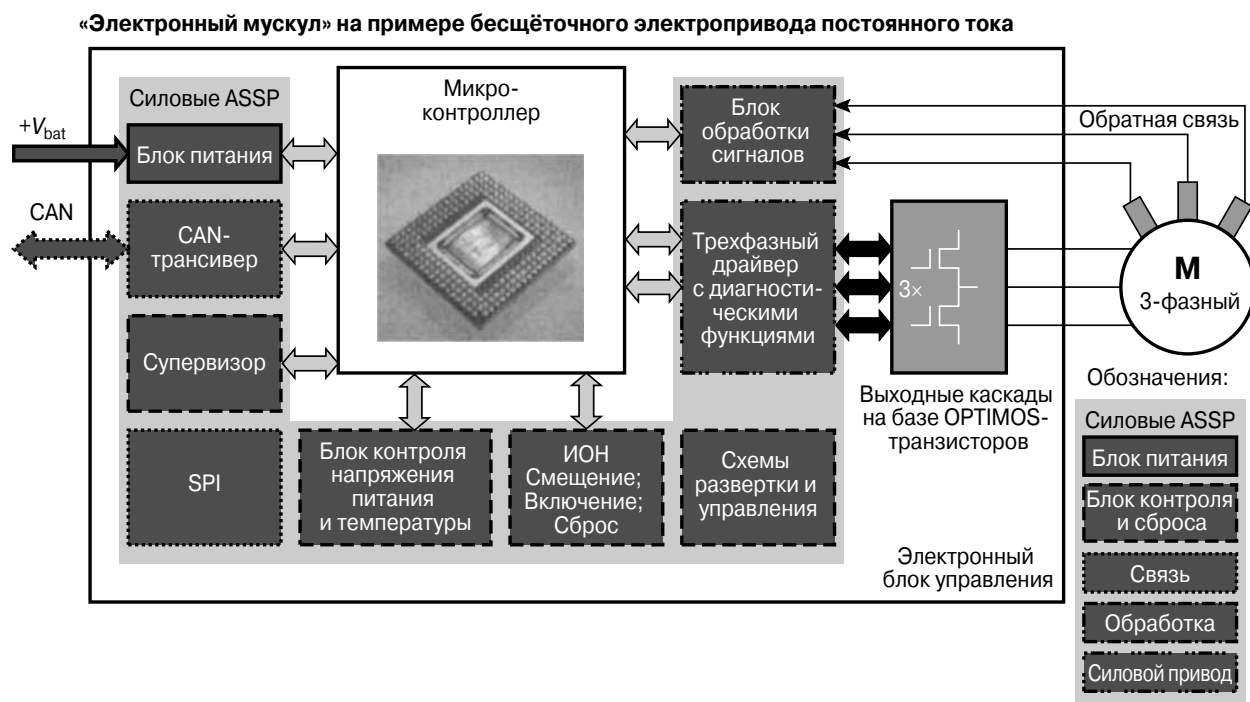


Рис. 3.25. Устройство будущего — «электронный мускул».

личные технологические варианты, в некоторых случаях одинаково перспективные.

Это делает необходимым наличие глубоких знаний в технологической области, а также возможность предложить полный набор данных технологий. Только тогда можно определить и использовать наиболее предпочтительную технологию в каждом отдельном случае.

Необходимость оснащения сложных систем всеобъемлющими диагностическими функциями становится понятной, если рассмотреть возможность выхода из строя всей системы в целом. Таким образом, при запуске двигателя современного автомобиля высшего класса требуется больше вычислительных мощностей, чем это было необходимо для осуществления полёта на Луну. Именно поэтому для технологий будущего будут требоваться значительно большие логические мощности.

Другим важным фактором является создание интеллектуальных сетей и связанная с ними децентрализация функций управления. Это ещё одна движущая сила после так называемой мехатронизации, т.е. полной интеграции электроники в механическую систему. Соответствующим примером можно считать «электронный мускул», который развивает механическое усилие. Это может быть соленоид или электродвигатель. На-

пример, в электродвигатель можно встроить контроллер и, таким образом, превратить его в интеллектуальный привод, как показано на **Рис. 3.25**. В данном случае передача команд управления в одном направлении и данных диагностики в обратном будет осуществляться по последовательно-однопроводному интерфейсу. Всё, что требуется дополнительно в данном случае, — это два питающих провода (плюс и минус). В частности, в автомобильной электронике такой тип передачи данных имеет очень важное значение. Здесь камнем преткновения часто являются дополнительные затраты на локальную интеллектуальность.

Следующим шагом может быть использование уже применяющейся в промышленной электронике передачи управляющих сигналов по проводам источника питания.

Если не учитывать аналоговые функции, то одной из технологий будущего будет объединение силовых ключей с высоковольтными КМОП-приборами. В частности, такой подход будет применяться в системах малой сложности, например в мехатронных системах, упомянутых ранее. Однако высокие и средние вычислительные мощности на протяжении обозримого будущего останутся прерогативой исключительно КМОП-приборов.

3.5. Технологии корпусирования

Технология корпусирования (back-end — конечный этап проекта) играет очень важную роль при изготовлении силовых полупроводниковых приборов. Одна из причин — активный характер потерь мощности и высокие динамические нагрузки при аварийных ситуациях. Таким образом, потери мощности в МОП-транзисторе при нормальном режиме работы, лежащие в диапазоне от одного до двух ватт, могут возрасти более чем на три порядка в случае короткого замыкания. Достаточно легко понять, что в этом случае все элементы (кристалл, припой, теплоотвод) испытывают предельные тепловые нагрузки.

Второй причиной является то, что проводочные соединения проводят большие токи или к ним приложено высокое напряжение. Например, если рассчитать ток, протекающий в обычном кабеле с поперечным сечением 0.75 мм^2 при такой же плотности тока, как и в проводочных проводниках, то он будет составлять порядка 1000 А. А это означает, что материалы будут работать на пределе своих физических возможностей. Результатом достижений в МОП-технологии стала возможность изготовления приборов со сверхнизким внутренним сопротивлением. Именно поэтому на первый план при учёте потерь мощности выходят внутренние тепловые сопротивления корпуса (проводочные соединения, соединения кристалл — теплоотвод и сам теплоотвод).

3.5.1. Классификация корпусов полупроводниковых приборов

В общем случае существуют две различные группы корпусов. Первая группа в качестве теплоотвода использует кристаллодержатель (площадку на выводной рамке), который выведен наружу и может быть напрямую припаян к плате или радиатору. Тепловое сопротивление такого корпуса между кристаллом и охлаждающей поверхностью, обозначаемое $R_{\text{thj-c}}$ (кристалл — корпус), очень мало.

Вторая группа имеет выводную рамку с улучшенным теплоотводом. В этих корпусах металлические перемычки соединяют кристаллодержатель с выводами корпуса. По внешнему виду данный тип корпуса невозможно отличить от обычных корпусов, поскольку пластик скрывает эти детали. На

Рис. 3.26 показаны корпуса двух типов: P-DSO-28 (имеет три отдельных кристаллодержателя с угловыми выводами в качестве теплоотводов) и P-TO263-15.



Рис. 3.26. Отличие между корпусом SO с улучшенным теплоотводом (слева) и корпусом с теплоотводящей пластиной (справа).

Всё чаще многих пользователей начинает интересовать вопрос о размере охлаждающей поверхности. Особенно при использовании современных SMD-приборов (компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа). Стремление к переходу от корпусов, устанавливаемых в отверстия, к дешёвым SMD-корпусам продиктовано достижениями в технологии. Во многих случаях это позволяет использовать «кремний вместо теплоотвода» совместно с теплоотводом с печатной платы.

При расчёте печатной платы в качестве охлаждающей поверхности следует принимать во внимание множество факторов. Более ранние решения подразумевали установку (при помощи винтов или скоб) радиатора на корпус силового прибора. В этом случае тепловое сопротивление может быть найдено относительно просто, из геометрии радиатора. С другой стороны, при использовании SMD-компонентов расчёт размеров становится более сложным, поскольку необходимо анализировать теплопроводящий путь кристалл — выводная рамка — контакт корпуса — посадочное место — материалы печатной платы (материал основания, толщина слоя меди) — объём печатной платы — окружающая среда. Возможные способы организации охлаждения SMD-компонентов схематически представлены на **Рис. 3.27**.

Поскольку в данном случае разводка печатной платы оказывает существенное влияние на результат расчётов, необходимо использовать новый метод расчёта. Далее мы поясним этапы этого метода, используя в каждом случае показательный пример из групп корпусов, упомянутых ранее (корпус

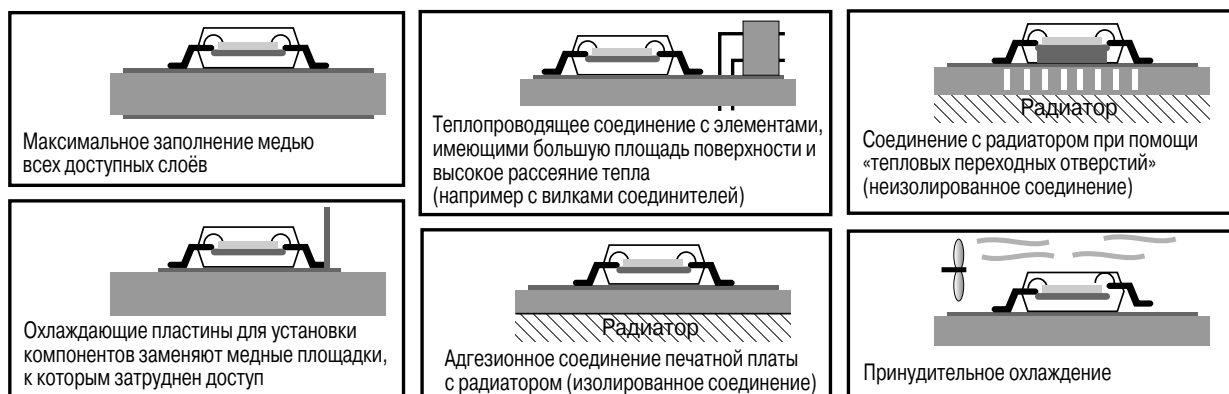


Рис. 3.27. Охлаждение SMD-корпусов ИС.

с теплоотводящей пластиной и корпус с улучшенным теплоотводом).

3.5.2. Статические характеристики корпусов силовых приборов

Для того чтобы пояснить статические тепловые характеристики силовых ИС (PIC), на Рис. 3.28 представлена внутренняя структура силовой ИС, установленной на печатную плату или охладитель. Силовая ИС состоит из кристалла, закреплённого на кристаллодержателе при помощи металлического припоя или контактного клея. Пе-

чатная плата состоит из материала с высокой проводимостью, например меди, и может иметь толщину несколько миллиметров.

Соответствующая эквивалентная тепловая схема показана на Рис. 3.29. В этой схеме используются приведённые ниже аналоги электрических переменных.

Мощность тепловых потерь P_V у поверхности кристалла заменяется источником тока. Тепловые сопротивления заменяются электрическими сопротивлениями. Эквивалентная электрическая схема по существу представляет собой последовательное со-

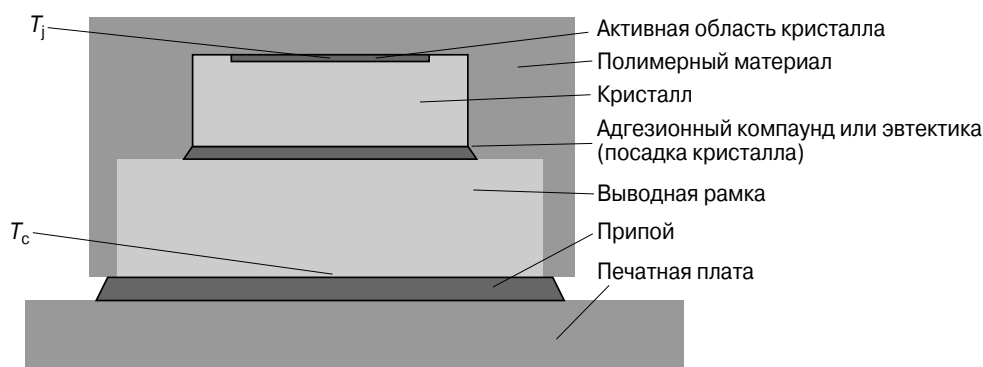


Рис. 3.28. Внутренняя структура силовой ИС.

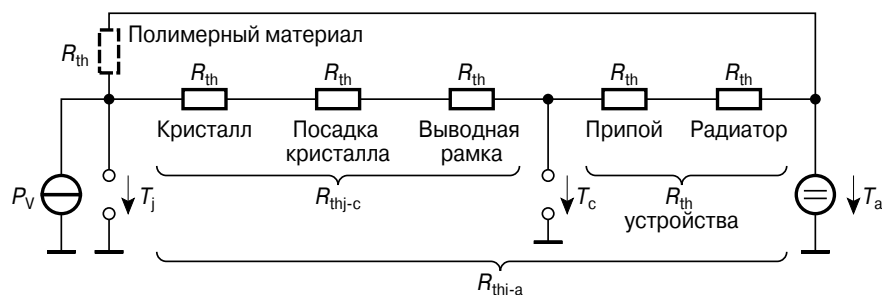


Рис. 3.29. Упрощенная эквивалентная тепловая схема силовой ИС.

Таблица 3.1. Соответствие между тепловыми и электрическими параметрами

Тепловой параметр	Электрический параметр
Температура T [K]	Напряжение V [В]
Тепловой ток P [Вт]	Ток I [А]
Тепловое сопротивление R_{th} [K/Вт]	Сопротивление R [В/А]
Тепловая ёмкость C_{th} [Вт·с/К]	Ёмкость C [А·с/В]

единение тепловых сопротивлений. В первом приближении, сопротивлением пластика корпуса (обозначено пунктирной линией), соединённым параллельно с общей цепью, можно пренебречь. Температура окружающей среды заменяется источником напряжения.

В соответствии с данной аналогией тепловой поток $P_V = Q/t$ теперь может быть рассчитан при помощи теплового эквивалента закона Ома:

$$V = I \cdot R.$$

Соответствующее ему выражение для тепловой цепи

$$T_j - T_a = P_V \cdot R_{thj-a}.$$

В заключение в Табл. 3.1 показано соответствие между основными электрическими и тепловыми параметрами.

При рассмотрении устройства как единого целого большое значение имеет функция $P_V = f(T_a)$. Из выражения, приведённого выше, получаем: $P_V = -T_a/R_{thj-a} + T_j/R_{thj-a}$. Полученное выражение является линейно спадающей функцией с тангенсом угла наклона, равным $-1/R_{thj-a}$, пересекающей ось абсцисс в точке T_j .

Запишем аналоги электрических и тепловых параметров:

$$I \sim P_V, R \sim R_{th}, U \sim T.$$

Определение параметров R_{th} , P_V и T_j для корпусов силовых полупроводниковых приборов с улучшенным теплоотводом

На Рис. 3.30 показана зависимость $P_V = f(T_a)$ для корпуса типа P-DSO-14-4, установленного на печатную плату. Из выражения, приведённого выше, можно определить допустимое значение потерь для любого значения температуры окружающей среды.

Например, если $T_a = +85^\circ\text{C}$, то допустимое значение тепловых потерь будет равняться примерно 0.7 Вт. Точное значение

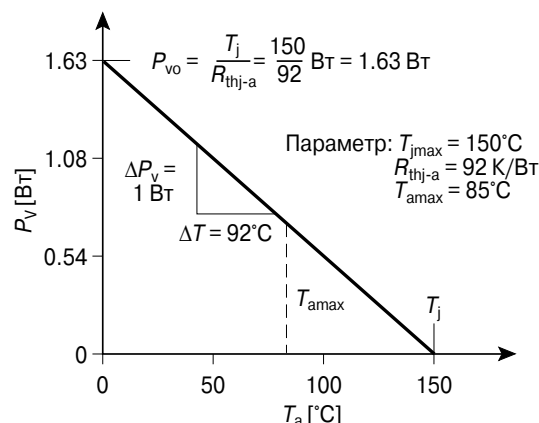


Рис. 3.30. Допустимые тепловые потери для корпуса P-DSO-14-4, установленного на печатную плату с площадью охлаждающей поверхности 400 мм² (как функция от температуры окружающей среды).

можно получить, используя следующее выражение:

$$P_V = (T_j - T_{max})/R_{thj-a} = 65 \text{ K}/(92 \text{ K/Вт}) = 0.7 \text{ Вт}.$$

Корпуса с теплоотводящей пластиной

В спецификациях на силовые ИС тепловые потери представлены в виде функции от температуры корпуса T_C , поскольку производитель не знает конкретных значений тепловых сопротивлений. Как и в предыдущем случае, указанная функция является линейно спадающей. В данном случае тангенс угла наклона равен $1/R_{thj}$. Точка пересечения с осью абсцисс остаётся равной T_j . На Рис. 3.31 представлен пример такой функции для корпуса P-TO252-3-1.

Возникает вопрос, почему максимальное значение $P_V = 30$ Вт остаётся неизменным. Более высокие значения тепловых потерь ограничиваются при помощи встроенных в ИС ограничителей тока. Именно поэтому значение тепловых потерь остаётся постоянным при более низких значениях температуры.

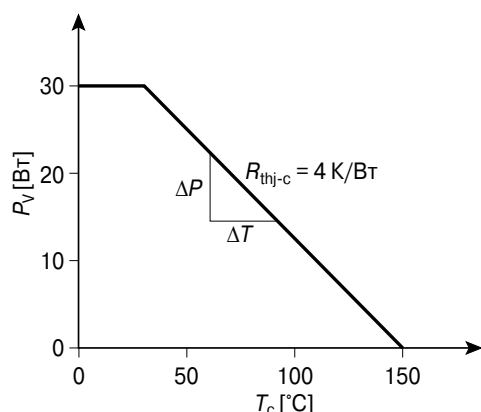


Рис. 3.31. Допустимые тепловые потери для корпуса Р-ТО252-3-1 (как функция от температуры корпуса).

3.5.3. Динамические характеристики мощных корпусов

Тепловая характеристика силовых ИС изменяется, если учитывать динамику воздействия тепла (импульсный режим). Эту характеристику можно выразить через тепловую ёмкость, которая прямо пропорциональна объёму используемого материала V (в см^3), его плотности ρ (в г/см^3) и коэффициенту теплоёмкости c (в $\text{Вт}/(\text{г} \times \text{К})$):

$$C_{th} = c \cdot \rho \cdot V = m \cdot c.$$

Физический смысл данного выражения состоит в следующем.

Теплоёмкость тела массой $m = \rho \cdot V$ равна количеству теплоты, которое необходимо сообщить телу для повышения его температуры на 1 К.

Для того чтобы рассчитать количество теплоты, полученное телом при изменении температуры тела на ΔT , мы должны воспользоваться зависимостью накапливаемого заряда от ёмкости. Это выражение выглядит следующим образом:

$$V \cdot C = I \cdot t = Q.$$

Аналогичное выражение для тепловой цепи:

$$\Delta T \cdot C_{th} = P \cdot t = Q.$$

Физический смысл выражений, приведённых выше, следующий.

Сила тока $I = Q/t$ — заряд, протекающий в единицу времени через сечение проводника. Мощность тепловых потерь P — это количество теплоты, испускаемой поверх-

ностью тела в единицу времени. Из вышесказанного следует, что

$$\Delta T = \frac{P \cdot t}{C_{th}}.$$

Эквивалентная схема замещения тепловой цепи для корпуса Р-ТО 263-7-3 с учётом тепловых ёмкостей представлена на **Рис. 3.32**. Тепловые ёмкости, рассчитанные, исходя из свойств материала и его объёма, подключаются параллельно тепловым сопротивлениям.

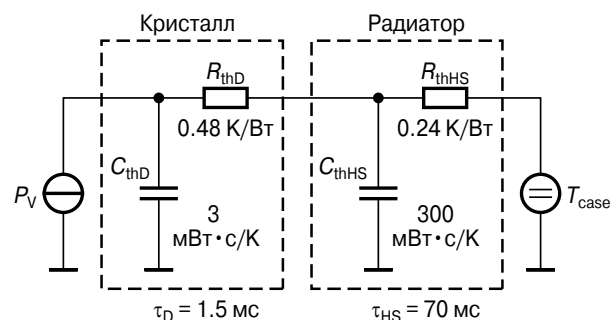


Рис. 3.32. Упрощённая эквивалентная схема замещения тепловой цепи для корпуса Р-ТО263-7-3.

При расчёте параметров элементов схемы замещения, для определения соответствующего теплового сопротивления R_{th} необходимо знать толщину d , площадь поперечного сечения A и теплопроводность L ($\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$). Выражение для расчёта теплового сопротивления имеет следующий вид:

$$R_{th} = \frac{d}{L \cdot A} \left(\frac{\text{К}}{\text{Вт}} \right).$$

Для расчёта тепловой ёмкости C_{th} необходимо знать объём $V = d \cdot A$, удельную плотность материала ρ (г/см^3) и характеристическую теплоёмкость материала c ($\text{Вт}/(\text{г} \times \text{К})$). Тогда:

$$C_{th} = m \cdot c \left(\frac{\text{Вт}}{\text{К}} \right).$$

Динамические тепловые характеристики

По аналогии с электрическими схемами, кривая изменения температуры кристалла может быть сопоставлена с нарастанием напряжения на RC -цепи при питании от импульсного источника тока:

$$V(t) = R \cdot I \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right).$$

Тогда, по электротермической аналогии, превышение температуры:

$$T(t) = R_{th} \cdot P \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{th}C_{th}}}\right).$$

Качественные зависимости для процессов нагрева и охлаждения представлены на **Рис. 3.33** (эти графики справедливы только для значений $t_p \gg 2$ мс).

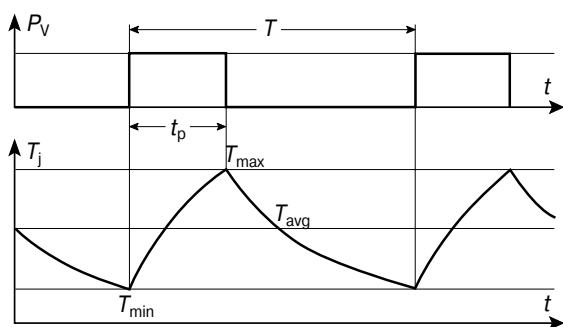


Рис. 3.33. Зависимость температуры кристалла T_j от времени нагрева при работе в импульсном режиме.

Температура кристалла колеблется между значениями T_{min} и T_{max} . Размах колебаний зависит от амплитуды и длительности импульса тока.

Определение Z_{th} , t_p и коэффициента заполнения

Переходные тепловые процессы могут быть представлены зависимостью, в которой динамический тепловой импеданс

$$Z_{th} = \frac{T_{max} - T_{min}}{P_V}$$

является функцией от длительности импульса тока t_p . На **Рис. 3.34** приведены зависимости полного теплового сопротивления от длительности импульса тока при разных значениях коэффициента заполнения импульсов (Duty Cycle — DC).

Частным случаем этих характеристик будет зависимость при работе с единичным импульсом (DC = 0). На **Рис. 3.35** представлена зависимость теплового сопротивления от длительности импульса тока для

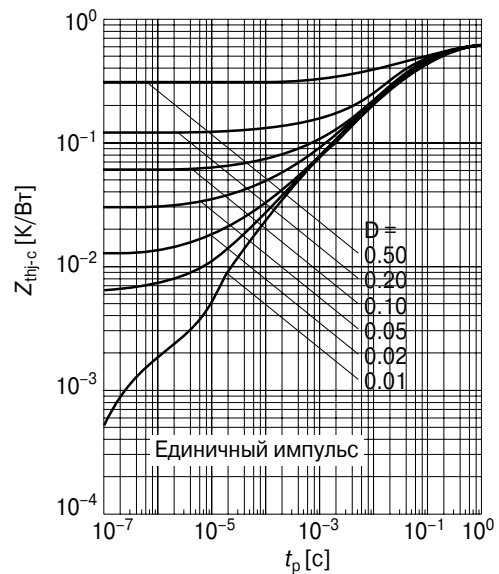


Рис. 3.34. Динамический тепловой импеданс Z_{th-c} корпуса P-TO263-7-3.

корпуса средней мощности, P-DSO-14-4, при различной площади охлаждающей поверхности на печатной плате. Из данного рисунка чётко видны длительности импульсов, при которых преобладают тепловые постоянные времени кристалла, выводной рамки и печатной платы.

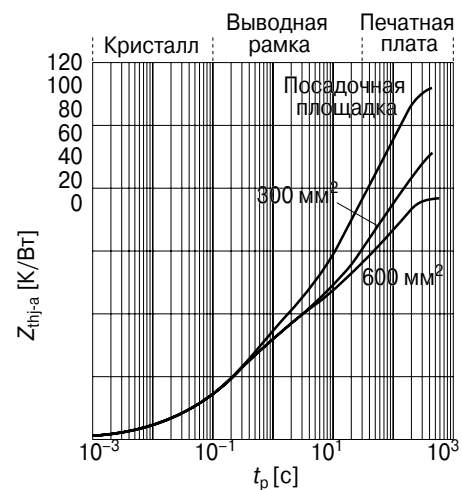
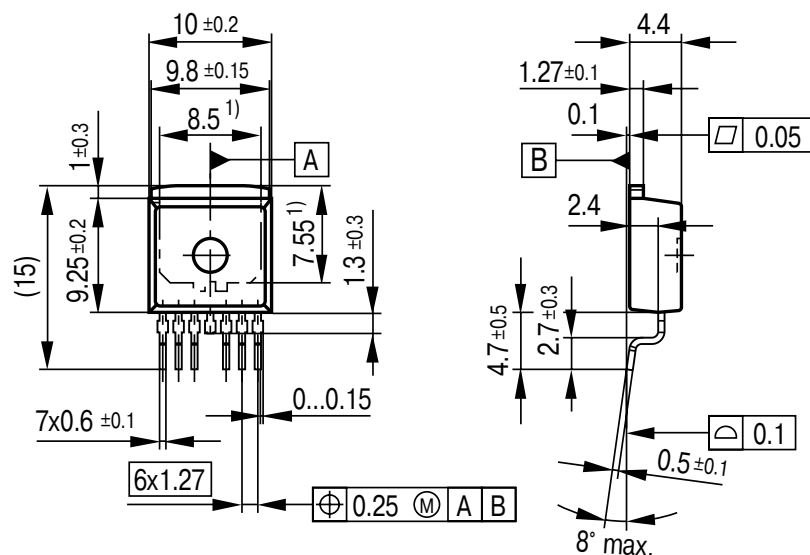


Рис. 3.35. Динамический тепловой импеданс корпуса P-DSO-14-4 при работе с одиночными импульсами.

Тепловая постоянная времени кристалла τ_D лежит в диапазоне нескольких миллисекунд, в то время как постоянная времени выводной рамки — в диапазоне сотен миллисекунд, а печатной платы — в диапазоне сотен секунд.

Пример расчёта

В качестве примера возьмём результаты теплового расчёта для корпуса P-TO263-7 (см. Рис. 3.36 и Табл. 3.2).



¹⁾ Обычные
Все металлические поверхности облужены, за исключением кромки реза.

Рис. 3.36. Размеры корпуса P-TO263-7-3.

Таблица 3.2. Параметры корпуса P-TO263-7-3

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
Кристалл			
Площадь	A_D	5	мм ²
Толщина	d_D	360	мкм
Теплопроводность кремния	L_{Si}	150	Вт/(м·К)
Тепловое сопротивление кристалла	R_{thD}	0.48	К/Вт
Плотность кремния	ρ_{Si}	2.33	г/см ³
Масса кристалла	m_D	4.2	мг
Удельная теплоёмкость кремния	c_{Si}	≈ 7.0	Вт·с/(г·К)
Теплоёмкость кристалла	C_{thD}	≈ 3	мВт·с/К
Тепловая постоянная времени кристалла	τ_D	≈ 1.5	мс
Охладитель			
Площадь (эффективная площадь: 64 мм ²)	A_{HS}	14	мм ²
Толщина	d_{HS}	1.27	мкм
Теплопроводность меди	L_{Cu}	384	Вт/(м·К)
Тепловое сопротивление охладителя	R_{thHS}	0.24	К/Вт
Плотность меди	ρ_{Cu}	8.93	г/см ³
Масса охладителя	m_{HS}	0.8	мг
Удельная теплоёмкость меди	c_{Cu}	0.385	Вт·с/(г·К)
Теплоёмкость охладителя	C_{thHS}	310	мВт·с/К
Тепловая постоянная времени охладителя	τ_{HS}	70	мс

Тепловое сопротивление крепления кристалла и пластмассы корпуса не учитываются, поскольку они никак не влияют на расчёт R_{thj-c} . Однако для полноты вычислений ниже приведён список значений данных параметров:

$$\begin{aligned} R_{thDB} &= 0.01...0.1 \text{ K/Вт}, \\ C_{thDB} &= 0.1...0.5 \text{ мВт с/К}, \\ \tau_{DB} &= 1...50 \text{ мс}, \\ R_{thM} &= 100 \text{ K/Вт}, \\ C_{thM} &= 0.64 \text{ Вт с/К}, \\ \tau_M &= 64 \text{ с}. \end{aligned}$$

где DB — крепление кристалла,
M — пластмассовая оболочка.

При помощи измерений, описанных далее, можно определить фактическую величину теплового сопротивления. Для нахождения значения R_{thj-a} мы должны знать разность температур кристалла T_j и окружающей среды T_A . Тогда

$$R_{thj-a} = \frac{T_j - T_a}{P_V}.$$

Мощность тепловых потерь P_V и температура окружающей среды T_A могут быть рассчитаны или определены в термокамере.

Измерение значения температуры кристалла (T_j) потребует небольшой хитрости, так как для этого на кристалле должен быть установлен датчик температуры, показания которого можно было бы снимать во время работы прибора. Для измерения температуры большинства современных приборов можно использовать диод подложки на любом выводе ИС (состояния, сброса и т.д.). Сначала измеряется значение прямого падения напряжения на диоде при постоянном токе. Затем, зная, что температурная зависимость прямого падения напряжения на диоде имеет отрицательный температурный коэффициент, примерно равный -2 мВ/К , по измеренному прямому падению на диоде можно определить соответствующую температуру кристалла.

Этапы расчёта

В качестве примера рассмотрим расчёт для стабилизатора напряжения TLE 4269 в виртуальном устройстве.

1. Измерение калибровочной кривой

Калибровочная кривая измеряется в термокамере с циркулирующим воздухом. Тепловые потери должны поддерживаться на минимально возможном уровне, для этого температура кристалла поддерживается равной температуре окружающей среды. На **Рис. 3.37** приведена калибровочная кривая для стабилизатора напряжения TLE 4269 GM (корпус P-DSO-14-4), полученная с помощью диода, подключённого к выводу «сброс» (RO), 7-й вывод корпуса. На **Рис. 3.38** представлена схема для проведения измерений.

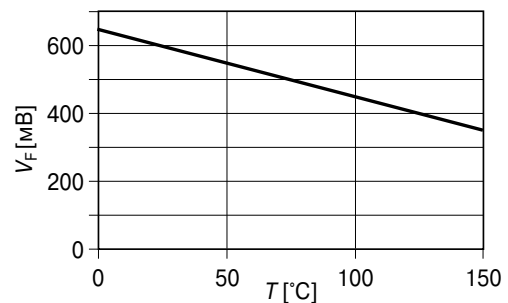


Рис. 3.37. Калибровочная кривая для микросхемы TLE 4269 GM при $I_{RO} = -500 \text{ мА}$ (ток, потребляемый по седьмому выводу, RO).

2. Введение заранее заданных потерь в прибор при $T_a = +25^\circ\text{C}$

Если ключ S_1 замкнут и выходное напряжение $V_Q = 5 \text{ В}$, то выходной ток стабилизатора равен $I_Q = V_Q/R_L = 5/35 \text{ А}$.

Тепловые потери $P_V = (V_i - V_Q) \cdot I_Q$ в кристалле стабилизатора напряжения будут составлять порядка 1 Вт.

Измерение падения напряжения на диоде $V_F = V_{F25}$ при $T_a = +25^\circ\text{C}$ даёт результат $V_{F25} = 600 \text{ мВ}$.

3. Изменение температуры окружающей среды (например, до $+85^\circ\text{C}$)

Так как ключ S_1 остаётся замкнутым, то потери в стабилизаторе остаются равными $P_V = 1 \text{ Вт}$.

Измерение падения напряжения на диоде V_{F85} при $T_a = +85^\circ\text{C}$ даёт результат $V_{F85} = 400 \text{ мВ}$.

4. Определение температуры кристалла T_j для $T_a = +85^\circ\text{C}$ и $P_V = 1 \text{ Вт}$.

Калибровочная кривая позволяет нам определить $T_j = +125^\circ\text{C}$ при $V_F = 400 \text{ мВ}$.

5. Расчёт сопротивления R_{thj-a}

Точное значение теплового сопротивления для реального прибора рассчитывается

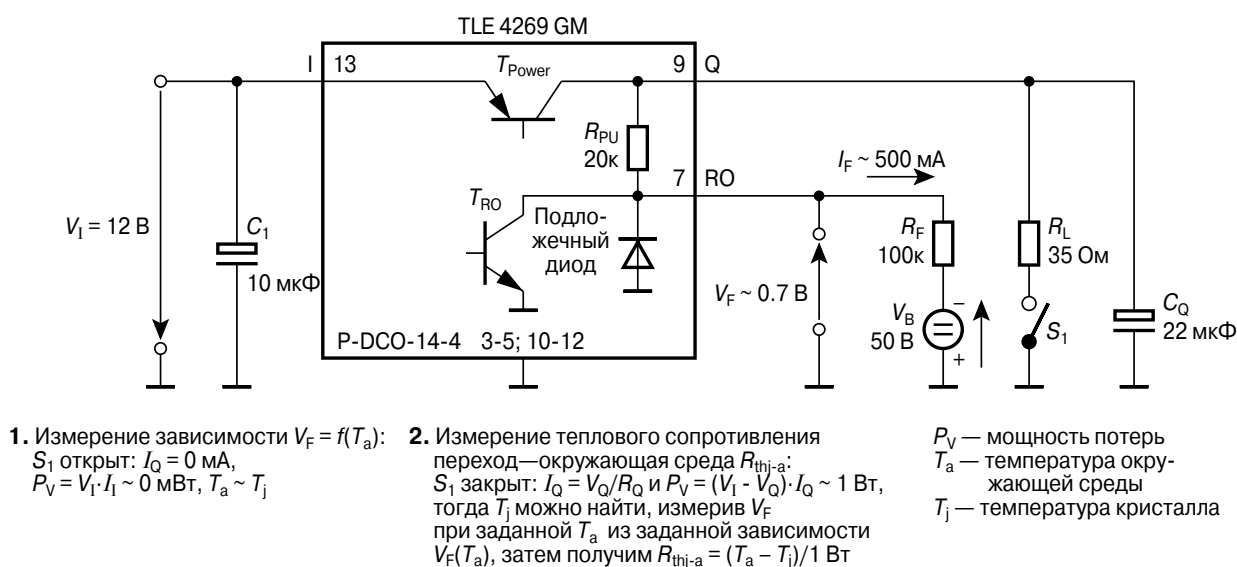


Рис. 3.38. Схема измерительной установки для стабилизатора TLE 4269 GM.

из полученных величин по следующей формуле:

$$R_{thj-a} = \frac{T_j - T_a}{P_V}.$$

Такие параметры, как, например, скорость потока воздуха, могут изменяться без снижения точности измерений. Например, $R_{thj-a} = (125^\circ\text{C} - 85^\circ\text{C})/1 \text{ Вт} = 40^\circ\text{C}/\text{Вт} = 40 \text{ К}/\text{Вт}$.

3.5.4. Анализ тепловых процессов в корпусах полупроводниковых приборов методом конечных элементов

При применении метода конечных элементов можно избежать масштабных изменений температуры. Для определения данных для расчёта теплового сопротивления в программу моделирования вводятся геометрические размеры корпуса и кристалла, который устанавливается в данном корпусе. В тех случаях, когда проволочные соединения играют важную роль, они также учитываются при моделировании. На Рис. 3.39 в верхнем левом углу показаны модели корпусов с теплоотводящей пластиной с установленным кристаллом, в сборе и без пластмассовой оболочки. Ниже слева этот корпус установлен на печатную плату, рядом с ней можно увидеть модель работающего прибора без пластмассовой оболочки. Справа можно увидеть полусимметричную модель прибора в корпусе SO улучшенным теплоот-

водом, как в пластмассе, так и без неё.

Дополнительные возможности моделирования при помощи метода конечных элементов показаны на Рис. 3.40. Температуры отдельных компонентов — кристалла, выводной рамки, пластмассовой оболочки и соединительных контактов — могут рассматриваться отдельно или в комплексе. Это позволяет получать необходимую информацию во время проектирования самого корпуса и для целей практического использования продукции. Более того, появляется возможность оптимизации всего устройства, не прибегая к созданию дорогого прототипа.

Для получения данных, пригодных для использования в повседневной практике, для разных типов корпусов были созданы по три различных печатных платы. Они отличаются размером площадей теплоотвода с длиной стороны a , к которым крепятся теплоотводящие части корпуса (теплоотводящая пластина корпуса P-TO-252 или центральные выводы корпуса P-DSO-14-4) (см. Рис. 3.41).

Моделирование методом конечных элементов позволяет получить следующие статические тепловые сопротивления:

- R_{thj-a} (сопротивление кристалл — окружающая среда или система — окружающая среда),
- а также следующие входящие в него сопротивления:
- R_{thj-c} (сопротивление кристалл — корпус) для корпусов с охлаждающей площадкой

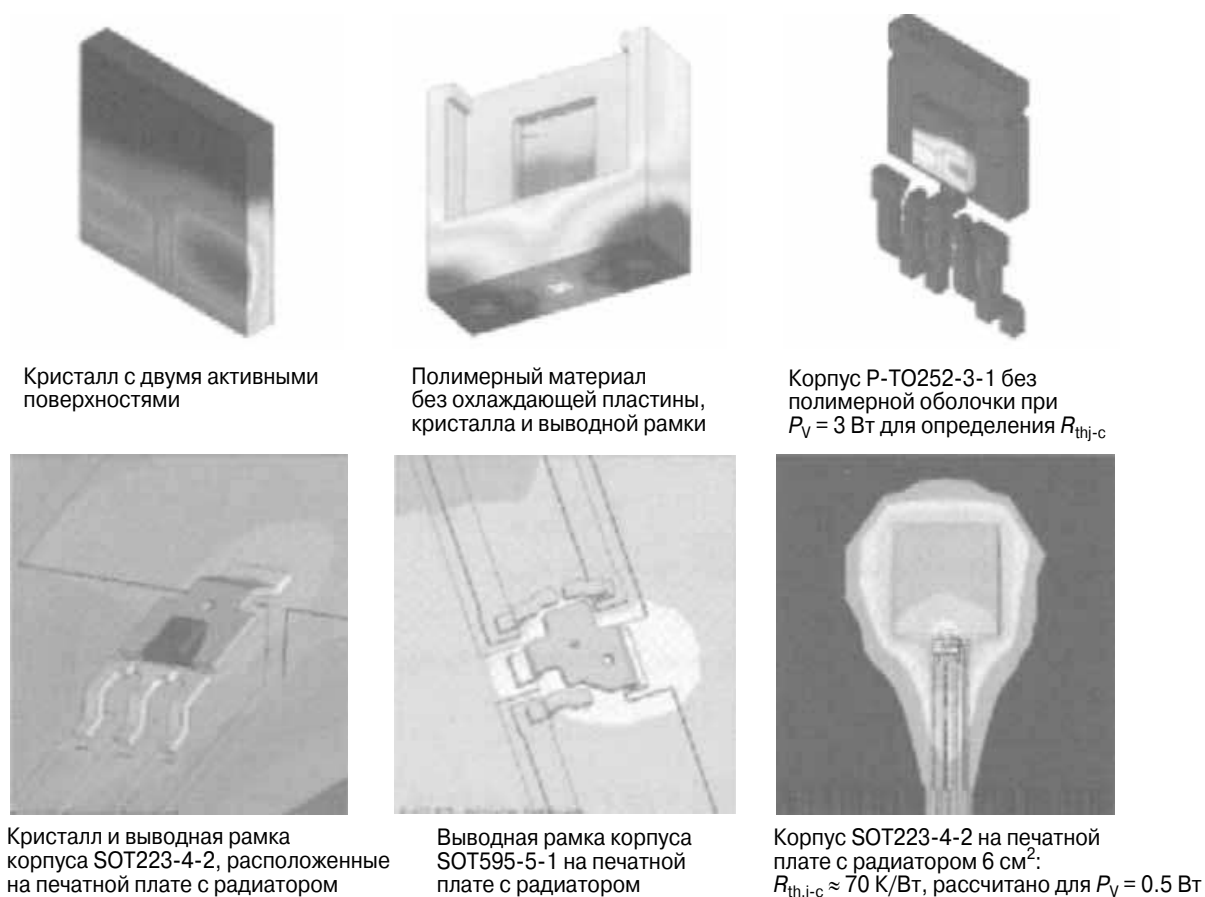


Рис. 3.39. Анализ методом конечных элементов открывает множество интересных возможностей.

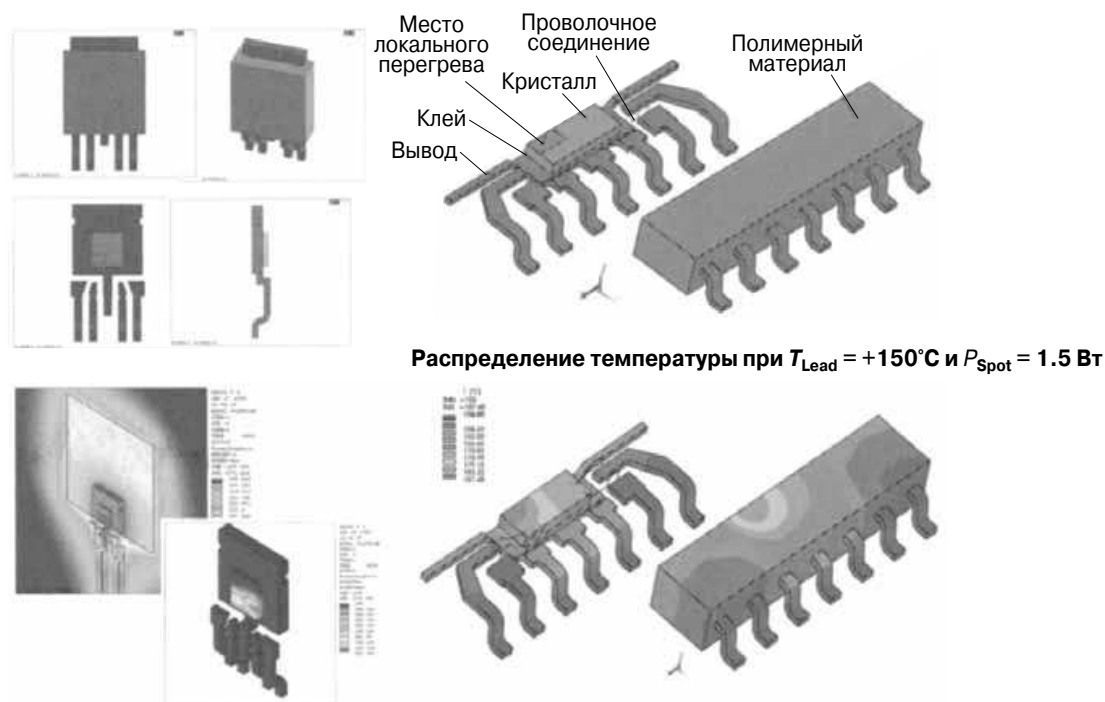


Рис. 3.40. Результаты моделирования методом конечных элементов: слева — корпус для автоматического монтажа; справа — корпус SO с расширенным диапазоном температур.

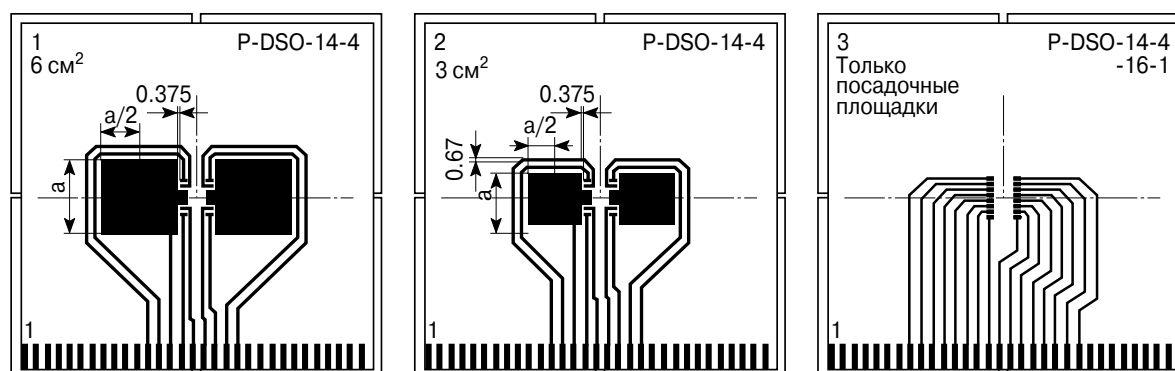
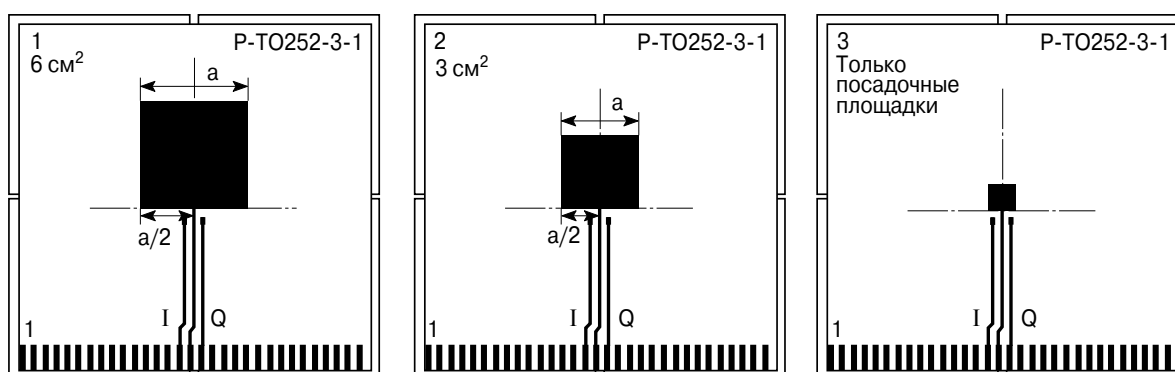
Плата для измерения R_{th} корпуса P-DSO-14-4 LP 1.0Плата для измерения R_{th} корпуса P-TO252-3-1 LP 1.1

Рис. 3.41. Печатные платы для измерения теплового сопротивления система — окружающая среда как функции от площади медной площадки на печатной плате.

или

- R_{th-pin} (сопротивление кристалл — вывод корпуса) для корпусов, не имеющих охлаждающих площадок для монтажа.

Поскольку значения этих сопротивлений зависят от площади активной поверхности кристалла, для каждого типа корпуса был промоделирован кристалл среднего размера ($> 2 \text{ мм}^2$). Так как сопротивление кристалла мало по сравнению с сопротивлением печатной платы, то для устройств со средней мощностью потерь ($< 5 \text{ Вт}$), этой погрешностью можно пренебречь.

Если построить зависимость статического теплового сопротивления R_{th-a} (кристалл — окружающая среда) от площади охлаждающей поверхности печатной платы, то получим кривую, которая чрезвычайно важна для применения прибора (см. Рис. 3.42).

Оценив площадь поверхности охлаждения в реальном устройстве, пользователь таким образом может определить ожидаемое значение R_{th-a} , при этом следует иметь

в виду, что значения, представленные на этом графике, рассчитаны для неподвижного воздуха и без учёта какого-либо теплового излучения.

Таким образом, приведённые значения представляют наихудший случай. В реальных устройствах значения теплового сопротивления будут значительно ниже. Например, при скорости потока воздуха 500 футов в минуту значение R_{th-a} для корпуса P-DSO-14-4 будет примерно на 30% ниже (Рис. 3.43).

Метод анализа конечных элементов может также использоваться для анализа динамических тепловых процессов. Динамическое тепловое сопротивление определяется как отношение разности температур за время t_p :

$$\Delta T = T_j - T_a.$$

Если провести моделирование переходного процесса методом конечных элементов, то можно с лёгкостью получить зависимость $Z_{th-a} = f(t_p)$ (зависимость динамичес-

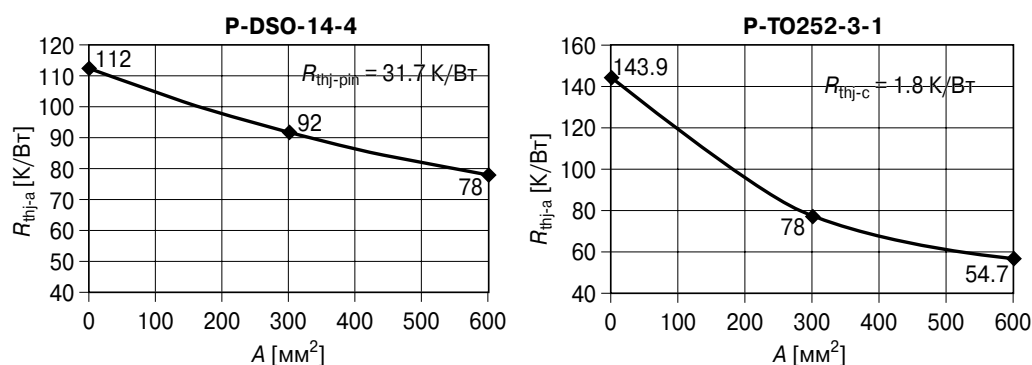


Рис. 3.42. Зависимость теплового сопротивления кристалл — окружающая среда R_{thj-a} от площади охлаждающей поверхности A .

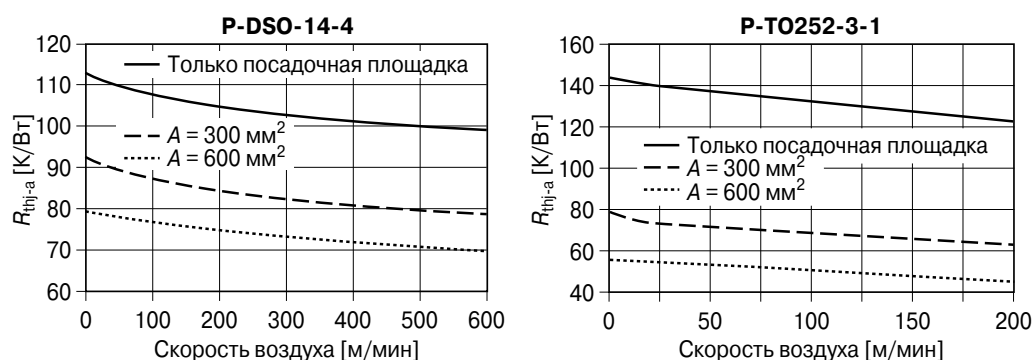


Рис. 3.43. Зависимость теплового сопротивления кристалл — окружающая среда от скорости воздушного потока.

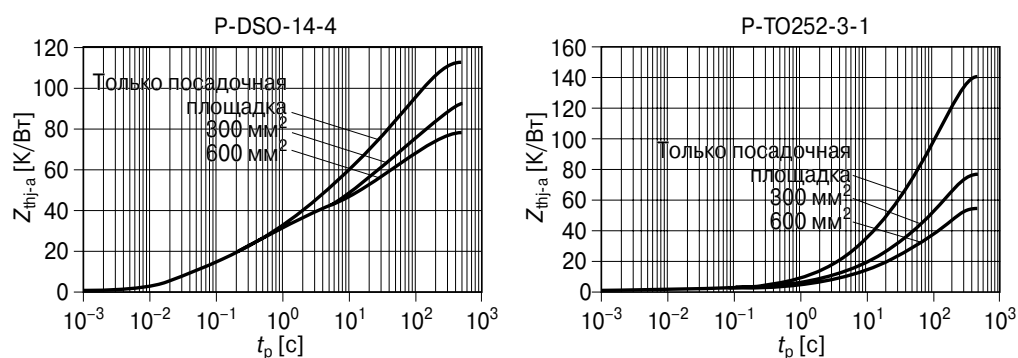


Рис. 3.44. Тепловые импедансы корпусов P-DSO-14-4 и P-TO-252 (D-Pack) для различных конфигураций печатных плат.

кого теплового сопротивления от длительности импульса тока). Используя эту зависимость, можно рассчитать максимальные значения температуры.

Для наглядности проведем расчёт температур, используя следующие данные:

- корпус P-TO-252 (D-Pack);
- площадь охлаждающей поверхности 3 см^2 ;
- мощность потерь $P_V = 1 \text{ Вт}$;

- длительность импульса $t_p = 100 \text{ с}$;
- температура окружающей среды $T_a = +85^\circ\text{C}$.

Из средней кривой, приведённой на Рис. 3.44, найдем значение R_{thj-a} при длительности импульса $t_p = 100 \text{ с}$, которое составляет примерно 50 К/Вт . Зная значение этого сопротивления, найдём изменение температуры $\Delta T = P_V \cdot R_{thj-a} = 50 \text{ К}$.

Таким образом, получаем максимальное значение температуры кристалла $T_{j\max}$:

$$T_{j\max} = 85^{\circ}\text{C} + 50^{\circ}\text{C} = 135^{\circ}\text{C}.$$

3.5.5. Спецификация на тепловые характеристики и тип корпуса

Для того чтобы предоставить потребителю необходимые данные по применению приборов, компания Infineon выпускает спецификации на корпуса силовых полупроводниковых приборов с их тепловыми характеристиками и всеми важными параметрами. Например, в спецификации на корпус P-DSO-14-4 сначала приводятся все размеры корпуса и посадочных площадок на плате. Далее представлены различные типы печатных плат, для которых было проведено моделирование. За ними следуют карты теплового распределения, и, наконец, в графической форме приведены результаты моделирования методом конечных элементов.

На графике зависимости статического теплового сопротивления $R_{\text{thj-a}}$ от площади A охлаждающей поверхности печатной платы также показаны зависимости сопротивления $R_{\text{thj-c}}$ (кристалл — корпус) или $R_{\text{thj-pin}}$ для корпуса SO.

Кроме того, в спецификации пользователь найдёт зависимость динамического теплового импеданса $Z_{\text{thj-a}}$ от длительности единичного импульса t_p для трёх разных размеров охлаждающей поверхности печатной платы.

Следует ещё раз отметить, что представленные данные соответствуют наихудшему случаю, так как в них не учитывается теплоотдача конвекцией и излучением. Таким образом, используя указанные данные, потребитель всегда имеет некоторый запас. Если компоновка очень плотная, то требуется более детальное моделирование.

3.5.6. Специальные параметры корпусов силовых полупроводниковых приборов для автомобильной электроники

Полевые транзисторы и IGBT

Приборы MOSFET и SmartFET для силовых приложений выпускаются в обычных мощных корпусах. На **Рис. 3.45** представлены основные типы этих корпу-

сов. У некоторых корпусов пластмассовая оболочка показана прозрачной, чтобы можно было увидеть внутреннюю структуру прибора.

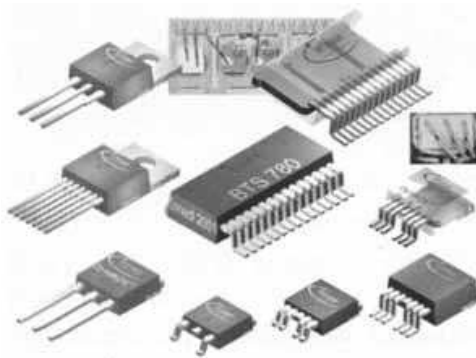


Рис. 3.45. Корпуса с теплоотводом.

Поскольку благодаря совершенствованию полупроводниковой технологии сопротивление открытого канала снижается, заметным становится вклад корпуса в сопротивление прибора. Поэтому, с одной стороны, возрастает диаметр проволоочных выводов от кристалла к рамке, используется несколько параллельно включённых проволоочных соединений. С другой стороны, для снижения сопротивления вертикального канала толщина кристалла силовых МОП-транзисторов уменьшается до значения менее 100 мкм.

В большинстве современных устройств требуются корпуса для поверхностного монтажа. Компания Infineon предлагает любые стандартные корпуса приборов и, кроме того, свои собственные разработки. Например, корпус TO252-15 имеет три изолированных друг от друга теплоотводящих посадочных места для кристаллов и прекрасно подходит для реализации полумостовых схем (см. также подраздел 3.6.4).

С недавнего времени для коммутации сверхвысоких мощностей и токов в автомобильной электронике, так же как и в промышленной электронике, стали использовать сборки из нескольких МОП-транзисторов (обычно соединяются вместе 6 ключей, образующие трёхфазный полумост). Если автомобили перейдут на напряжение 42 В, то эти новые приборы окажутся очень полезными и будут производиться большими партиями.

Интеллектуальные ключи (SmartFET)

Для реализации многоканальных ключей требуются корпуса, у которых имеется более 7 выводов. Поэтому линейка мощных корпусов была дополнена корпусом Power SO. Компания Infineon может предложить любые типы корпусов, имеющие до 100 выводов. На **Рис. 3.46** представлены типичные представители этого семейства корпусов.

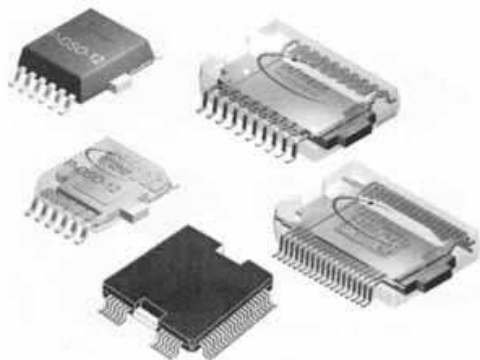


Рис. 3.46. Основные виды корпусов Power SO.

Не всегда нужно рассеивать большую тепловую мощность, а во многих случаях это может быть нежелательным из-за того, что рассеиванию тепла в окружающей среде препятствуют конструктивные характеристики приборов (пластиковые корпуса). Кроме того, не всегда требуется очень высокая теплоёмкость мощных корпусов, поскольку это приводит к появлению очень больших тепловых потерь в аварийных ситуациях (короткое замыкание или перегрузка), которые затем должны быть рассеяны через печатную плату.

Если требуется оптимально использовать материал, то очевидно, что вес теплоотвода надо уменьшать. Кроме того, во многих случаях для обеспечения нормального режима работы прибора достаточно иметь небольшую теплоёмкость, как, например, при включении электронных ламп накаливания. Они прогреваются пиковыми токами в течение нескольких десятков миллисекунд, после чего по ним протекает рабочий ток, величина которого на порядок меньше величины этих пиков. В таких условиях при снижении сопротивления в открытом состоянии за счёт использования большего количества кремния, устройство сможет работать при значительно более высоких тепловых сопротивлениях. Компания Infineon

отразила эту идею в девизе «Кремний вместо теплоотвода».

В результате были разработаны корпуса SO с улучшенными тепловыми характеристиками. Данные корпуса имеют точно такие же размеры, как и стандартные корпуса SO. Однако их внутреннее строение сильно отличается. Часть выводов соединяется непосредственно с выводной рамкой (кристаллодержателем) и используется для теплоотвода. На **Рис. 3.47** представлены некоторые из модернизированных корпусов SO.



Рис. 3.47. Примеры корпусов с улучшенным теплоотводом, производимых компанией Infineon.

Оптимальный по цене корпус был получен в результате комбинации усовершенствованной SO-технологии и разварки кристалла толстой алюминиевой проволокой. Данная технология была с большим успехом применена компанией Infineon в серии микросхем BTS77xx семейства SO TrilithIC (это можно увидеть в частично открытом корпусе прибора, показанном в верхнем правом углу на **Рис. 3.47**).

Интеллектуальные силовые ИС и ИС интеллектуальных систем питания

Как и для многоканальных ключей, для интеллектуальных силовых ИС требуются корпуса с большим количеством выводов. В данном случае выбор между корпусом с теплоотводящей пластиной или корпусом с улучшенным теплоотводом осуществляется в зависимости от приложения.

Чем сложнее ИС, тем больше в ней источников тепла. Для производителей сложных электронных блоков управления целесообразным является создание виртуального прототипа с использованием теплового моделирования. Это позволяет получить предварительную оценку многих взаимодействий между интегрированными подсистемами.

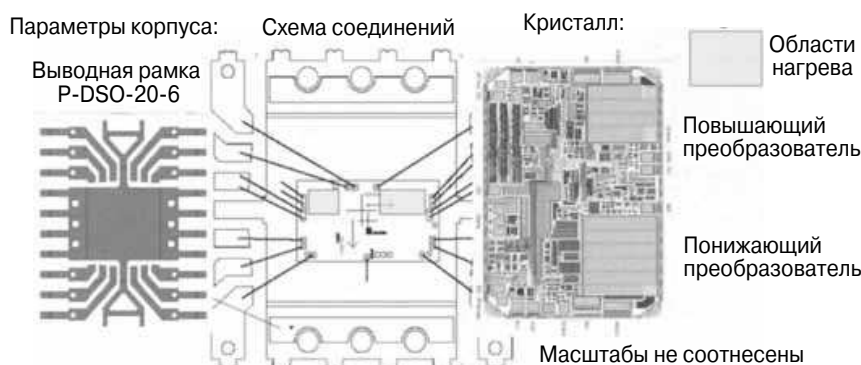


Рис. 3.48. Параметры моделирования микросхемы TLE6711.

Тем не менее, работа электронного блока управления должна быть промоделирована в условиях эксплуатации. Компания Infineon предлагает подобную услугу, которая для самих заказчиков иногда может оказаться слишком дорогостоящей.

Используя параметры конкретного применения, например вольтамперные характеристики, тип материала печатной платы, место установки соединителя (может использоваться для охлаждения), тип корпуса (например, в худшем случае — это закрытый пластмассовый корпус, не имеющий контакта с шасси), инженеры компании Infineon проводят разбиение устройства на функциональные блоки. При этом обсуждаются с заказчиком или даются ответы на следующие вопросы:

- Какое количество силовых транзисторов, ключей, мостовых схем требуется?
- По какой технологии будут изготовлены данные приборы?
- Каково должно быть значение сопротивления в открытом состоянии (малым или большим)?
- Какие типы корпусов наилучшим образом удовлетворяют всем этим требованиям?

Затем оптимизируется размещение приборов на печатной плате. В тех случаях, когда условия применения определяются совместно с заказчиком, он предоставляет профиль распределения температуры внутри электронного блока управления, поперечные разрезы и максимальные температуры для отдельных приборов. Также, если требуется, может быть проведено моделирование работы в переходных режимах.

Теперь покажем результаты моделирования типового электронного блока управления. Для того чтобы провести моделирование, требуются соответствующие модели от-

дельных ИС, печатной платы, корпуса и соединителей. В качестве примера на Рис. 3.48 представлена ИС понижающего/повышающего импульсного источника питания TLE6711GL со всеми требуемыми данными.

В модели учтены параметры выводной рамки, пластмассовой оболочки и структура ИС со всеми источниками потерь. Результаты моделирования можно увидеть на Рис. 3.49 и Рис. 3.50.

Прямоугольники с высокой температурой — это приборы, рассеивающие тепло (в данном примере — микросхемы, диоды и дроссели импульсных источников питания). Соединитель для жгута проводов можно обнаружить в виде вытянутого «холодного» прямоугольника, расположенного вдоль нижней кромки печатной платы. В этом примере ИС 3 с температурой кристалла $+180^{\circ}\text{C}$ почти перегрета. Однако участок наибольшей плотности выделяемой мощности на печатной плате находится около ИС 1.

Вид сбоку добавляет больше информации о направлении тепловых потоков, распространяющихся внутри пластикового корпуса путём конвекции (Рис. 3.50). Таким образом, например, можно увидеть, что конвекционный купол над микросхемой ИС 1 простирается до крышки корпуса. Улучшить данную ситуацию можно путём изменения расположения приборов. Поскольку электрические характеристики приборов зависят от температуры (например, сопротивление в открытом состоянии $R_{\text{он}}$ ДМОП-транзисторов удваивается при изменении температуры от -40 до $+175^{\circ}\text{C}$), желательно связать моделирование электрической схемы с тепловым моделированием устройства. Это достигается при помощи динамической модели, например такой, как

Вид со стороны монтажа; наихудший случай; коннектор остаётся холодным при $T_a = +85^\circ\text{C}$

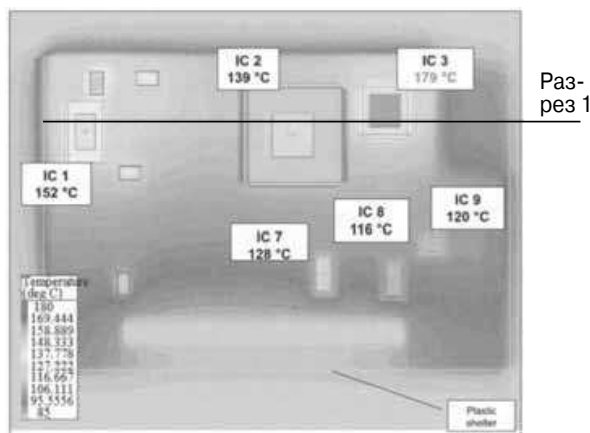


Рис. 3.49. Результаты теплового моделирования автомобильного электронного блока управления (вид сверху).

Разрез 1; наихудший случай; коннектор остаётся холодным при $T_a = +85^\circ\text{C}$

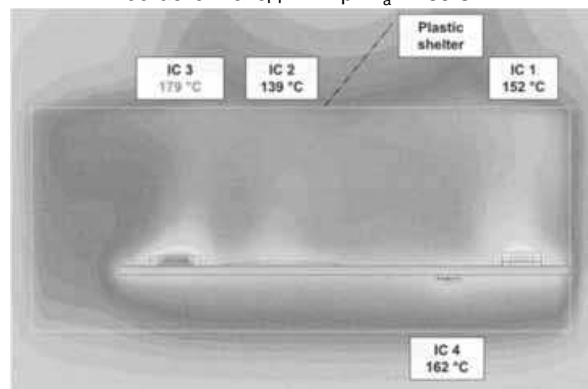


Рис. 3.50. Вид сбоку в плоскости разреза 1 электронного блока управления.

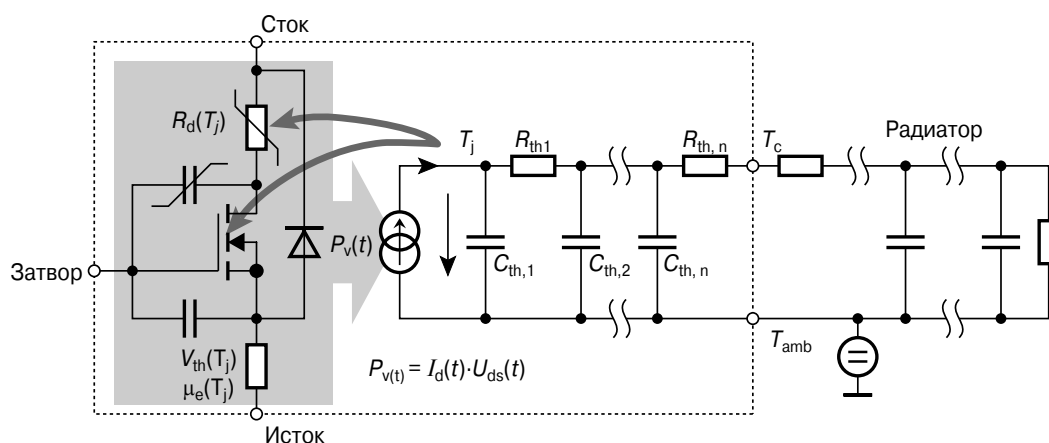
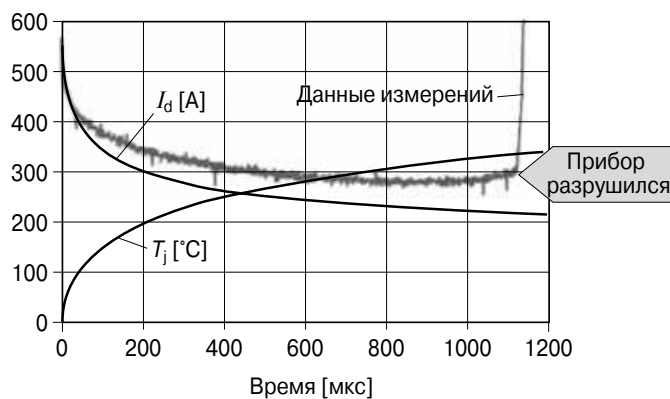


Рис. 3.51. Электротепловая модель на примере силового МОП-транзистора для моделирования в программах PSpice/Saber.

Характеристики, полученные при моделировании и измерении токов в режиме короткого замыкания вплоть до разрушения прибора (BUZ 11S)



Измеренное распределение температуры в кристалле MOSFET непосредственно перед разрушением

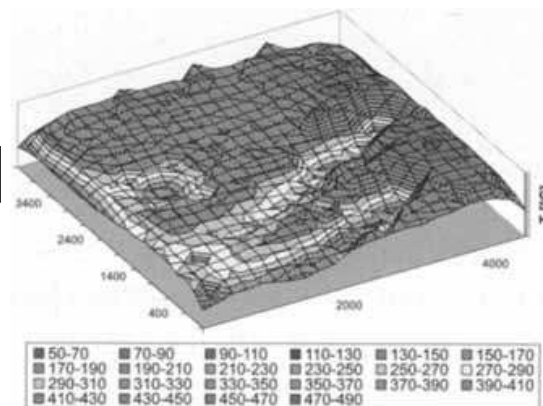


Рис. 3.52. Измерение распределения температуры в силовом МОП-ключе при высоких токах.

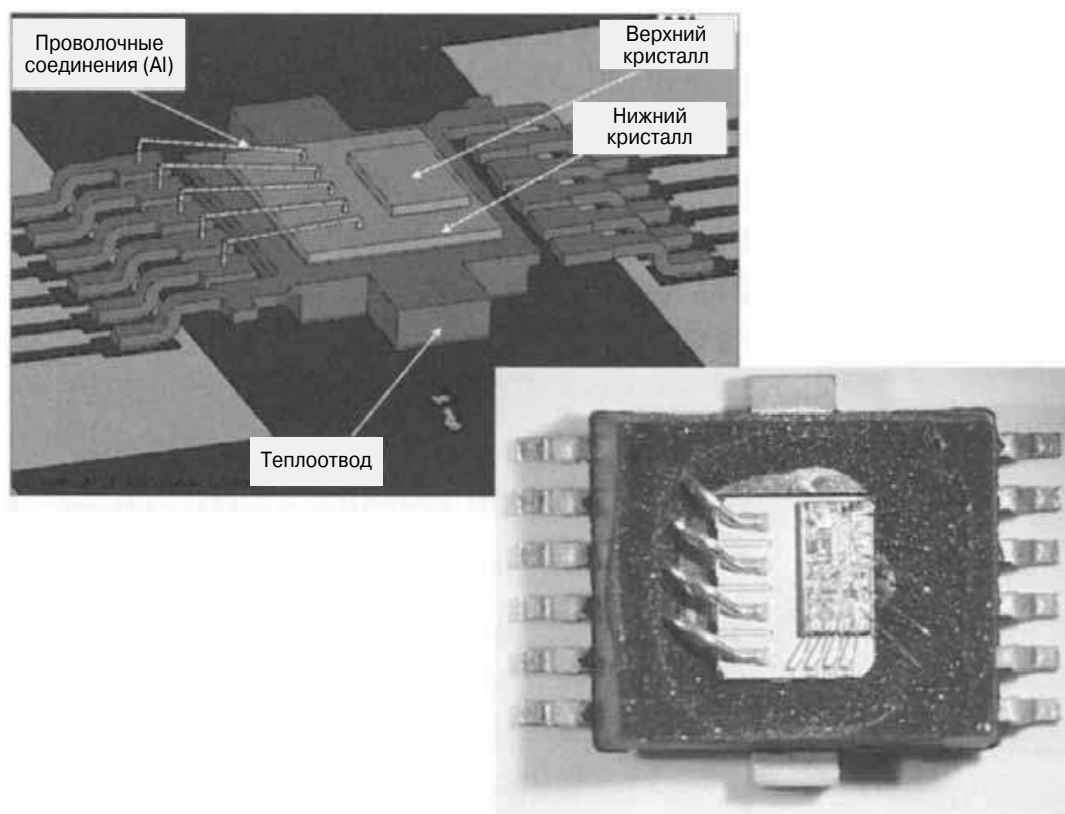


Рис. 3.53. Сильноточный ключ — модель и ее реальное воплощение по технологии «кристалл на кристалле».

приведена на **Рис. 3.51**. Компания Infineon предлагает подобные модели для всех стандартных приборов.

Непосредственная обратная связь температуры кристалла T_j и электрического параметра R_{on} позволяет промоделировать внешние охлаждающие устройства и, в конечном счёте, рассчитать их размеры.

Ещё одной сложной задачей является моделирование или измерение предельных значений параметров силового прибора. На **Рис. 3.52** представлены результаты измерения распределения температуры или тока в МОП-транзисторе при больших токах. Можно увидеть неравномерности распределения температуры из-за наличия контакта затвора и рассеяния тепла проволочными проводниками. Имея такие результаты, можно создать модель, которая позволит оптимизировать плотность компоновки элементов.

3.5.7. Многокристальные корпуса и тенденции развития

Компания Infineon разработала технологию «кристалл на кристалле», которая является основой для производства сильноточ-

ных ключей и мостовых схем для электродвигателей. На **Рис. 3.53** представлен один из современных сильноточных ключей типа PROFET, рассчитанный на импульсные токи до 100 А.

Базовый кристалл может быть изготовлен по силовой ДМОП-технологии с использованием только нескольких фотолитографий. На **Рис. 3.53** слева видно, что соединение истока с четырьмя внешними выводами осуществляется при помощи четырёх толстых алюминиевых проводников, что позволяет проверить каждый проводник. «Верхний» кристалл прикрепляется к базовому кристаллу таким образом, чтобы обеспечивалась необходимая теплопроводность. Он подключается к нескольким внешним выводам золотыми соединительными проводниками, которые являются настолько тонкими, что практически не видны на рисунке (и поэтому их можно не учитывать в тепловой модели). Кроме того, имеются соединения между кристаллами, по которым осуществляется управление затвором и измерение тока.

Конечно же, данная технология хорошо подходит и для следующего поколения вы-

соко интегрированных системных ИС. Например, силовая/высоковольтная ИС может нести на себе сверхсложный кристалл микроконтроллера. На **Рис. 3.54** представлена такая система, реализованная в одном корпусе.



Рис. 3.54. Система в одном корпусе, изготовленная по технологии «кристалл на кристалле», корпус T-SSOP-20.

В ближайшем будущем системы с высокой степенью интеграции потребуют создания новых корпусов, которые можно будет встраивать в устройства как мехатронные элементы. Это означает, что должны быть получены более низкие тепловые сопротивления для корпусов с большим количеством выводов. Не забудем упомянуть корпус в размер кристалла (chip-scale). Размер этого корпуса всего лишь незначительно превосходит

размер кристалла. Корпус типа VQFN с открытой выводной рамкой (выводная рамка доступна для пайки с нижней части корпуса) является хорошим примером применения данной технологии.

В заключение, на **Рис. 3.55** представлены зависимости между количеством выводов и рассеиваемой мощностью. В диапазоне малых мощностей используются стандартные и усовершенствованные корпуса SO. В них в основном выпускаются сложные ИС. На другом краю шкалы мощности лежат корпуса с теплоотводящей пластиной, в которых выпускаются силовые модули (обычно это сборки из шести транзисторов или IGBT) для ключевых и мостовых схем.

Все чаще применяются бескорпусные микросхемы. Однако данный метод требует «дорогой сборки в чистом помещении». То же самое можно сказать о монтаже методом перевернутого кристалла (flip-chip), при котором в ходе дополнительных этапов при изготовлении полупроводниковой пластины на кристалл в местах соединений наносятся шарики припоя. Таким образом, кристалл может быть перевернут и припаян прямо к носителю (в общем случае, к дорогостоящей керамической подложке). Основным преимуществом подобной технологии является то, что контактные площадки могут находиться в любом месте на поверхности кристалла. С одной стороны, при

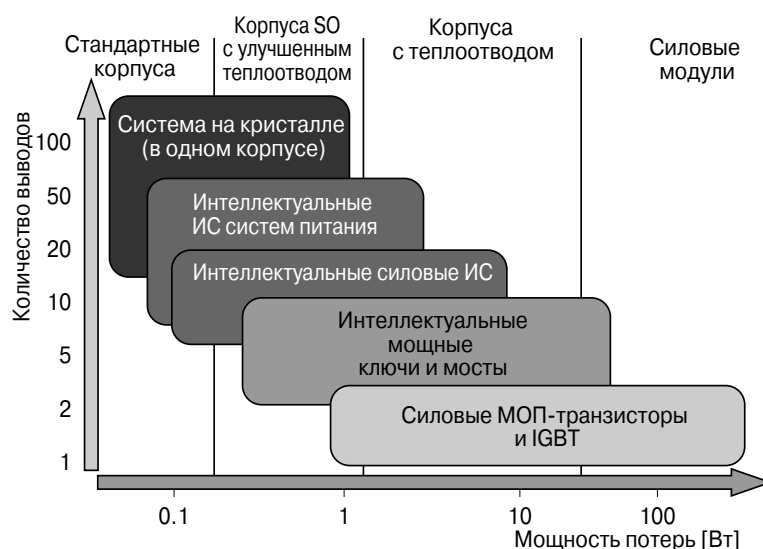


Рис. 3.55. Зависимость количества выводов от мощности приборов для различных групп продукции.

современных, широко используемых методах сборки контактные площадки должны располагаться по периметру кристалла. С другой стороны, организация охлаждения перевёрнутых кристаллов затруднена из-за того, что тепло будет проводиться только через шарики припоя. Частично эта проблема снимается заливкой кристалла специальным теплопроводящим веществом. Другой проблемой, которой нельзя пренебрегать, является гарантия производителем работоспособности кристалла.

3.6. Мощные приборы для автомобильной электроники

3.6.1. MOSFET и IGBT

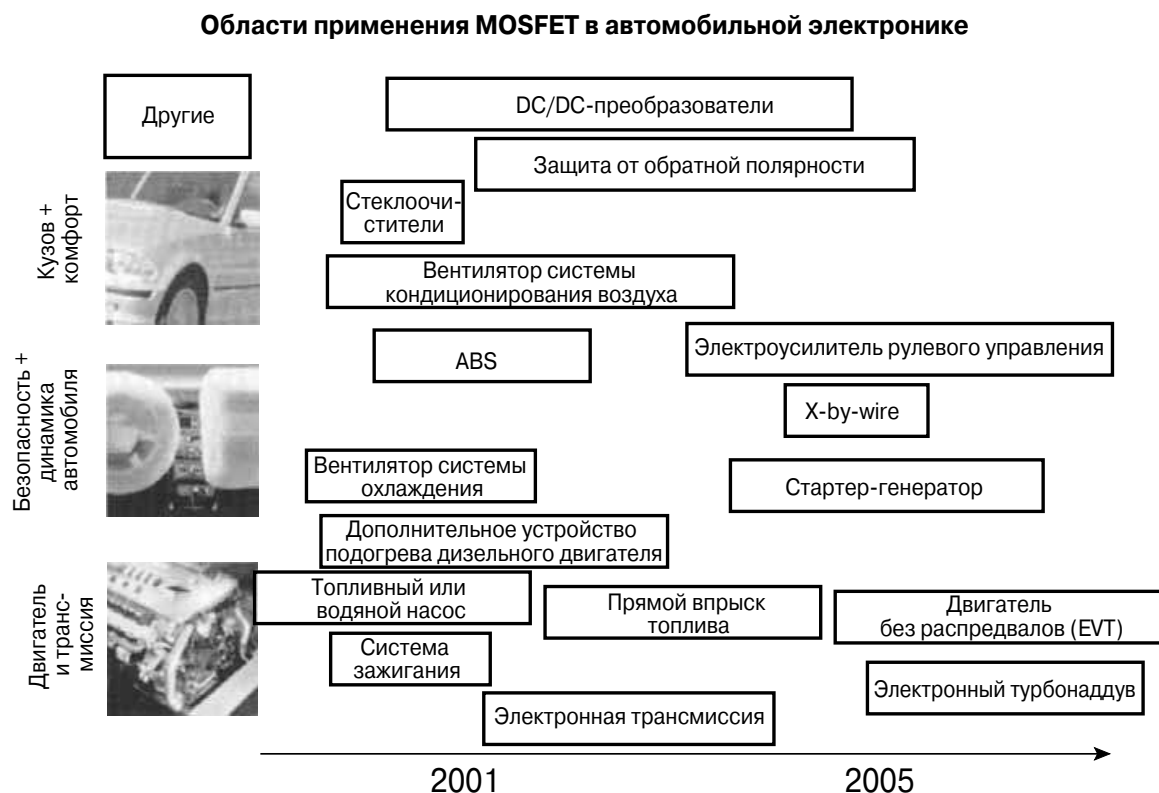
Среди силовых полупроводниковых приборов наиболее широкое применение имеют силовые МОП-транзисторы. Пользователям требуется устройство, характеристики которого близки к идеальному ключу. В открытом состоянии падение напряжения на нём должно быть как можно меньше. Оно определяется сопротивлением между стоком и истоком в открытом состоянии, которое обозначается $R_{DS(on)}$ или R_{on} .

С другой стороны, когда ключ находится в закрытом состоянии, транзистор должен надёжно выдерживать максимально возможные высокие напряжения и не пропускать обратные токи. Эти параметры характеризуются напряжением пробоя стока — исток, V_{BRDS} , и током утечки. Переключение идеального ключа может осуществляться без энергозатрат. В реальных МОП-транзисторах каждый раз при выполнении операции переключения требуется перемещение заряда конечной величины.

В автомобилестроении коэффициент полезного действия оказывает непосредственное влияние на потребление топлива, поэтому МОП-транзисторы с малым сопротивлением $R_{\text{он}}$, незначительными токами утечки во всем диапазоне напряжений питания и соответствующей характеристикой переключения будут находить широкое применение в данной области.

На **Рис. 3.56** показаны наиболее важные области применения.

Тогда как DC/DC-преобразователи встраиваются в массовые устройства все меньшего размера, в высокоточных устройствах, например в стартер-генераторе



автомобиля, для получения приемлемых значений R_{on} требуется параллельное соединение множества транзисторов, управляемых одним контроллером.

Многие электронные устройства в автомобилях заменяют традиционные механические или гидравлические решения. Так называемый комплект вспомогательных агрегатов (ременный привод помпы, генератор, насос гидроусилителя руля и другие блоки) может быть полностью заменён электрическими приводами. Для линейных приводов, например клапанного позиционера, также требуются МОП-ключи. Коротко говоря, всюду, где требуется механическая сила, сейчас можно найти «электронный мускул» — устройство, которое управляет электрическим током и, следовательно, электромагнитным устройством позиционирования.

В ближайшем будущем автомобильные контроллеры будут работать, используя распределённый интеллект (распределённое управление). При данном подходе электроника будет находиться непосредственно в исполнительном устройстве. Объединение механических и электронных компонентов образует мехатронные компоненты. Ключи с ещё более низким сопротивлением делают возможным создание новых устройств с более высоким потребляемым током; 12-вольтовая сеть бортового питания автомобилей подошла к своим физическим границам. Поэтому, начиная с 2005 года, напряжение питания увеличилось более чем в три раза — до 42 В, таким образом, уровни мощностей, которыми можно управлять, возрастают почти на порядок. Поскольку по МОП-технологии едва ли возможно получить ключи с ещё более низким сопротивлением, следует больше внимания уделить технологии корпусирования.

Первый этап — оптимизация технологии изготовления соединений. В компании Infineon было разработано специальное сильноточное тройное соединение Power bond. На **Рис. 3.57** показаны температуры отдельных частей корпуса при работе с высокими токами. Как видно из рисунка, соединительный проводник является «слабым звеном» всей системы.

В настоящее время для работы при сверхвысоких токах в одном модуле размещают несколько МОП-транзисторов. Если даже этого недостаточно, то проволочные

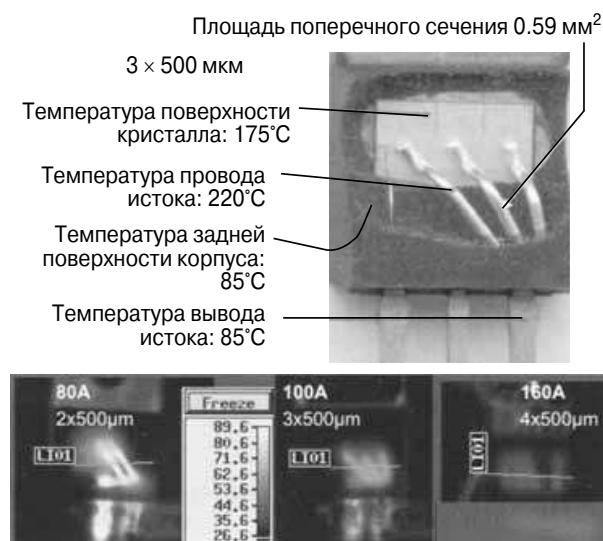


Рис. 3.57. Технология Power bond позволяет значительно повысить токи, используя обычные корпуса TO220 и D-Pack.

проводники придётся заменить плоскими соединителями. На **Рис. 3.58** показан экспериментальный корпус без проволочных соединений для полумостового модуля на МОП-транзисторах (два МОП-транзистора включены последовательно).

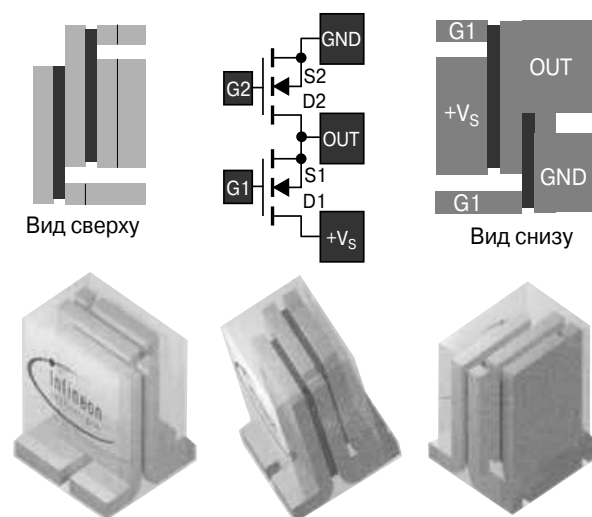


Рис. 3.58. Экспериментальный корпус для полумостовых МОП-модулей без использования проволочных соединений.

Почему эта сборка из двух МОП-транзисторов является настолько важной? С точки зрения эффективности автомобильных устройств одним из наиболее важных финансово-экологических факторов является потребление топлива. Поэтому

почти все процессы преобразования энергии необходимо производить в импульсном режиме. При этом автономный режим работы реализуется при помощи синхронных выпрямителей. Почти во всех устройствах, будь то управление электродвигателем или повышающий/понижающий преобразователь, используются полумостовые схемы на МОП-транзисторах.

Условия эксплуатации приборов в автомобилях являются очень жёсткими — это касается и диапазона рабочих температур, и бросков напряжения, и токов короткого замыкания. Как следствие, особое внимание следует уделить области безопасной работы (SOA) современных транзисторов. Поэтому компанией Infineon была разработана и адаптирована под требования автомобильной электроники серия транзисторов OptiMOS. Данные транзисторы могут спокойно работать при температуре кристалла вплоть до $+200^{\circ}\text{C}$. По другой специальной технологии были разработаны приборы IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor — биполярный транзистор с изолированным затвором) для систем зажигания. Эти транзисторы могут выдерживать высокие напряжения и пропускать большие мощности.

Если требуется увеличить функциональные возможности устройства, то в одном корпусе необходимо реализовать дополнительные функциональные блоки. Это привело к появлению интеллектуальных ключей.

3.6.2. Транзисторы SmartFET и SmartIGBT

При использовании силовых МОП-транзисторов для управления затвором и проверки состояния прибора требуются дополнительные элементы. Когда нижние ключи работают с низкой частотой переключения, сигнал на затвор транзистора может подаваться напрямую со стандартного порта контроллера. На более высоких частотах и при управлении верхним ключом нагрузочная способность по току и максимальное напряжение серийно выпускаемых контроллеров могут оказаться недостаточными. Определение таких состояний прибора, как перегрузка по току, резкое отключение нагрузки, перегрев и короткое замыкание, может быть довольно затратным делом. Проблема может быть решена при помощи дополнительной схемы драйвера с

диагностическими функциями. Во многих случаях экономически выгодным решением является использование интеллектуальных полевых транзисторов (SmartFET) или интеллектуальных IGBT (SmartIGBT). В этих приборах коммутирующие функции объединяются с диагностическими либо по технологии «кристалл на кристалле», либо при помощи монолитной конструкции.

Компания Infineon предлагает очень широкий спектр интеллектуальных ключей.

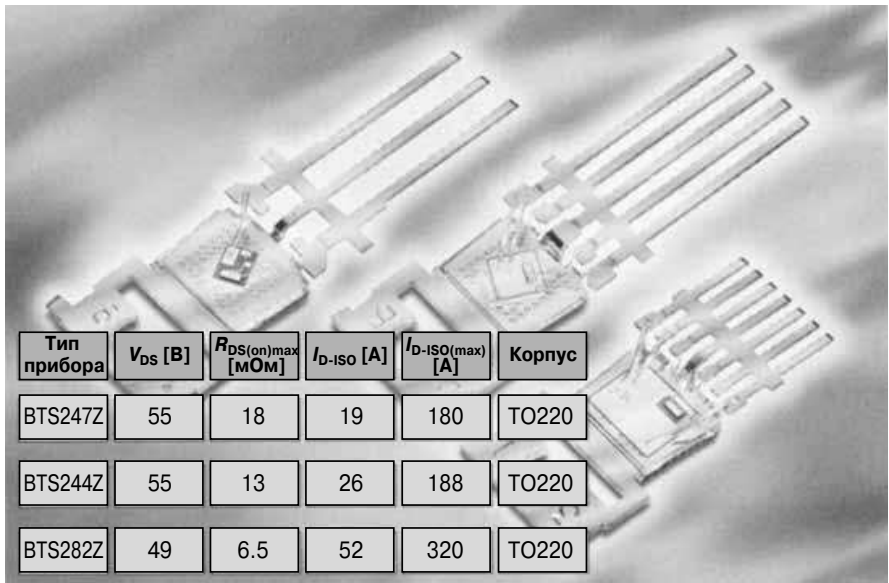
Приборы типа TempFET были первыми в мире интеллектуальными ключами, имеющими защитные функции. При перегреве кристалл контроллера, приклеенный к силовому чипу, ограничивает напряжение на затворе. С внешней стороны этот прибор нельзя отличить от обычного МОП-транзистора, и он очень прост в использовании. На **Рис. 3.59** показаны наиболее важные быстродействующие TempFET-транзисторы — Speed TempFET. Для того чтобы лучше были видны элементы конструкции, приборы на данном рисунке представлены без пластмассовой оболочки.

HITFET

Часто в дополнение к измерению и контролю температуры прибора требуется измерение тока и перенапряжений. Прибор с этими функциями всегда остаётся в области безопасной работы (SOA). Примером подобных приборов является семейство HITFET (от *англ.* Highly Integrated FET — полевой транзистор с высокой степенью интеграции), выпускаемое компанией Infineon. Блок-схема типового представителя этого семейства приборов приведена на **Рис. 3.60**.

Кроме драйвера, управляющего затвором силового МОП-транзистора, в данном приборе имеется схема, которая производит измерение тока стока силового транзистора при помощи специальных датчиков. В дополнение к этому в прибор встроена защита от перенапряжения. Все защитные схемы, за исключением входной схемы защиты от статических разрядов (ESD), передают соответствующие сигналы на блок управления затвором.

На **Рис. 3.61** представлена линейка этих приборов, оптимизированных для применения в автомобильной электронике.



Тип прибора	V_{DS} [В]	$R_{DS(on)max}$ [МОм]	I_{D-ISO} [А]	$I_{D-ISO(max)}$ [А]	Корпус
BTS247Z	55	18	19	180	TO220
BTS244Z	55	13	26	188	TO220
BTS282Z	49	6.5	52	320	TO220

Рис. 3.59. Speed TempFET — быстродействующие защищённые нижние ключи в корпусах с 3, 5 и 7 выводами.

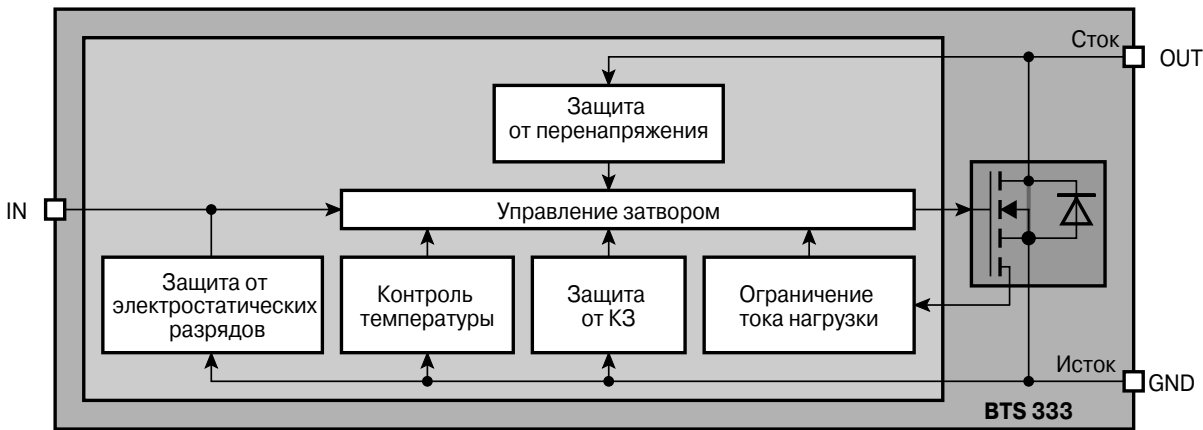


Рис. 3.60. Блок-схема транзистора HITFET с драйвером и диагностическими блоками.

		Одноканальный		Двухканальный	
		Запираемый	С перезапуском	Запираемый	С перезапуском
R_{ON} [МОм]	2000		BTS3205		
	500		BSP75		BTS3408
	200	BTS3110	BSP76		BTS3410
	100	BTS3118	BSP77, BTS118		
	50	BTS3134	BSP78, BTS134		
	28	BTS3142	BTS142		
	18		BTS333		

Рис. 3.61. Семейство транзисторов HITFET для автомобильной электроники.

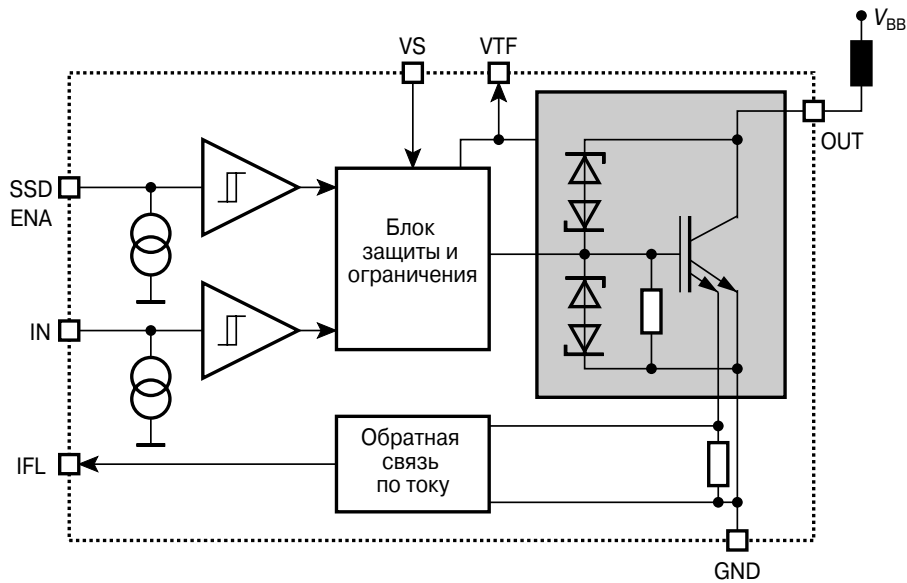


Рис. 3.62. Блок-схема интеллектуального IGBT (BTS2145), выполненного по технологии «кристалл на кристалле».

Семейство состоит из одно- и двухканальных ключей, некоторые из которых имеют схемы защиты с защёлкой, а другие — схемы защиты с автоматическим опросом датчиков (с повторным запуском). В то время как ключи с более высоким сопротивлением (от 100 мОм до 2 Ом) изготавливаются по технологии SPT (Smart Power Technology), для производства приборов со сверхнизким сопротивлением применяется технология с вертикальным протеканием тока.

Интеллектуальные IGBT

В некотором отношении интеллектуальные IGBT являются особым вариантом нижних ключей. В автомобильной электронике они используются для управления катушкой зажигания. В современных автомобилях высокое напряжение, в основном, вырабатывается централизованно с помощью стандартных IGBT, а затем распределяется. Это требует использования очень дорогой высоковольтной разводки. Для того чтобы снизить затраты, были разработаны катушки зажигания, которые устанавливаются прямо на свечи зажигания (индивидуальные катушки зажигания) и управляются интеллектуальными драйверами. Поскольку интеллектуальные драйверы являются более надёжными и позволяют уменьшить размеры, а, следовательно, и вес

готового устройства, они имеют огромное преимущество перед обычными дискретными приборами. Компания Infineon разработала интеллектуальный IGBT BTS2145, изготовленный по технологии «кристалл на кристалле». На **Рис. 3.62** приведена блок-схема данного прибора.

В дополнение к универсальному диагностическому интерфейсу он содержит все необходимые схемы для защиты IGBT от перенапряжений, перегрузки по току и перегрева. Внутреннюю структуру данного прибора можно увидеть на **Рис. 3.63**.

Верхний кристалл SPT4/90V, совместимый с питанием 42 В

Основной кристалл IGBT

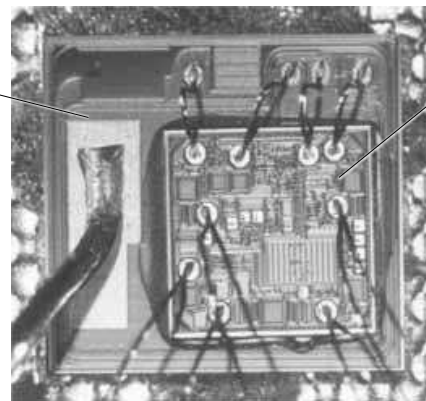


Рис. 3.63. Внутренняя структура интеллектуального IGBT BTS2145.



Рис. 3.64. PROFET в качестве верхнего ключа заменяет реле, имея значительно более высокую надёжность.

PROFET

Интеллектуальная технология позволяет реализовать в верхних ключах преимущества и оптимальный с точки зрения затрат уровень интеграции одного или более ключей с драйверами, схемами преобразования уровня, схемами защиты и средствами диагностики. С увеличением сложности микросхем диагностика приобретает ключевую роль. Без применения указанной функции, даже на сегодняшний день, будет почти невозможно осуществлять быстрые и экономически эффективные ремонтные работы. Компания Infineon разработала широкий ассортимент ключей с диагностическими функциями для работы в качестве верхних ключей — это так называемые PROFET (от *англ.* PROtected FET — защищённые полевые транзисторы). Кристаллы данных приборов изготовлены по интеллектуальной технологии, с вертикальным протеканием тока.

Поскольку в автомобиле очень большое количество функций децентрализовано, в нём требуется большое количество подобных ключей с диагностическими функциями почти для всех систем. Схема включения, а также преимущества использования данного семейства ключей представлены на **Рис. 3.64**.

Однако основной областью применения данных приборов является кузовная электроника, поскольку PROFET превосходно подходит для включения электронных ламп накаливания, электродвигателей и резистивных нагрузок.

Они могут использоваться для коммутации номинальных токов вплоть до 50 А. Во

многих приложениях, в частности при включении ламп, применение теплоотводов не требуется, поскольку большая мощность выделяется только во время включения. За счет ограничения импульсных токов может быть уменьшено поперечное сечение проводов, а, следовательно, в конечном итоге могут быть уменьшены вес оборудования и расход топлива. Также без особых проблем возможна работа в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Даже дорогостоящие предохранители во многих случаях могут быть заменены более дешёвыми. Тем не менее, высокие значения импульсной мощности приводят к высоким тепловым нагрузкам на приборы. Эти циклы нагрева и охлаждения требуют использования надёжных в эксплуатации корпусов и применения ноу-хау в области топологии силовых микросхем. Типовая блок-схема ключа PROFET с четырьмя коммутируемыми выходами представлена на **Рис. 3.65**.

Как и в случае HITFET, ключи семейства PROFET имеют встроенные датчики тока, напряжения и температуры. Однако блок управления затвором является значительно более дорогостоящим, поскольку для уменьшения сопротивления МОП-транзистора в открытом состоянии напряжение от источника питания должно подаваться на затвор через генератор подкачки заряда. Для того чтобы снизить общую стоимость прибора, все требуемые схемы интегрируются в одном корпусе. Безопасная коммутация индуктивных нагрузок обеспечивается благодаря специальной схеме на базе стабилитрона. Характерным дополнительным элемен-

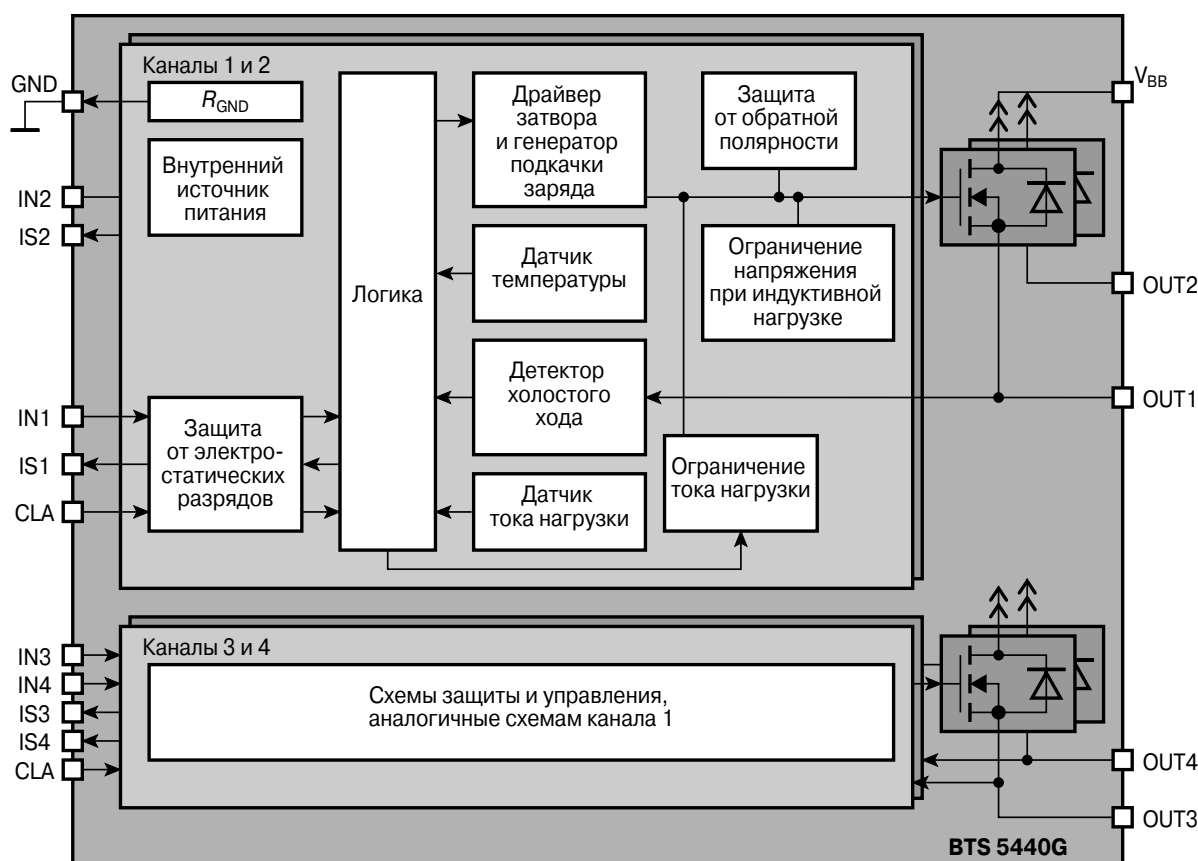


Рис. 3.65. Блок-схема стандартного 4-канального ключа PROFET BTS5440.

том является схема защиты от обратного напряжения. Она гарантирует, что в случае изменения полярности напряжения модуль не получит тепловых повреждений.

Сигнализация каскада управления (микронтроллера) осуществляется путём дискретизации аналогового выходного тока или посредством одного или более флагов состояния цифровых выходов. Выходы флагов выполняются по схеме с открытым стоком; таким образом, если потребуется, то можно считывать сигналы нескольких флагов, используя один порт ввода/вывода (схема wired OR — монтажное ИЛИ). Технология последнего поколения Smart5 даже позволяет встраивать в монолитную ИС последовательный периферийный интерфейс (SPI). В стадии разработки находятся соответствующие многофункциональные ключи, которые, например, осуществляют комплексное управление включением фар автомобиля.

Если требуются ещё более высокие токи, то для производства сильноточных PROFET используется технология «кристалл на кристалле». В данных приборах ин-

теллектуальный верхний кристалл приклеивается к кристаллу силового МОП-транзистора. Это позволяет с помощью выпускаемой компанией Infineon уникальной ИС BTS555 коммутировать токи до 1000 А. В частности, при отключении таких больших токов дополнительной проблемой является индуктивность проводов источника питания, поскольку накопленная в ней энергия, например при коротком замыкании, должна быть рассеяна прибором PROFET.

Сильноточные PROFET являются хорошим примером того, как за счёт гибкого использования технологий изготовления полупроводниковых пластин (front-end) и технологий корпусирования (back-end) можно производить продукцию, оптимизированную по стоимости. Например, теперь можно коммутировать полное напряжение источника питания в автомобиле, т.е. напряжение на выводных клеммах аккумуляторной батареи. Это позволяет осуществлять управление питанием многих, ранее независимых нагрузок.

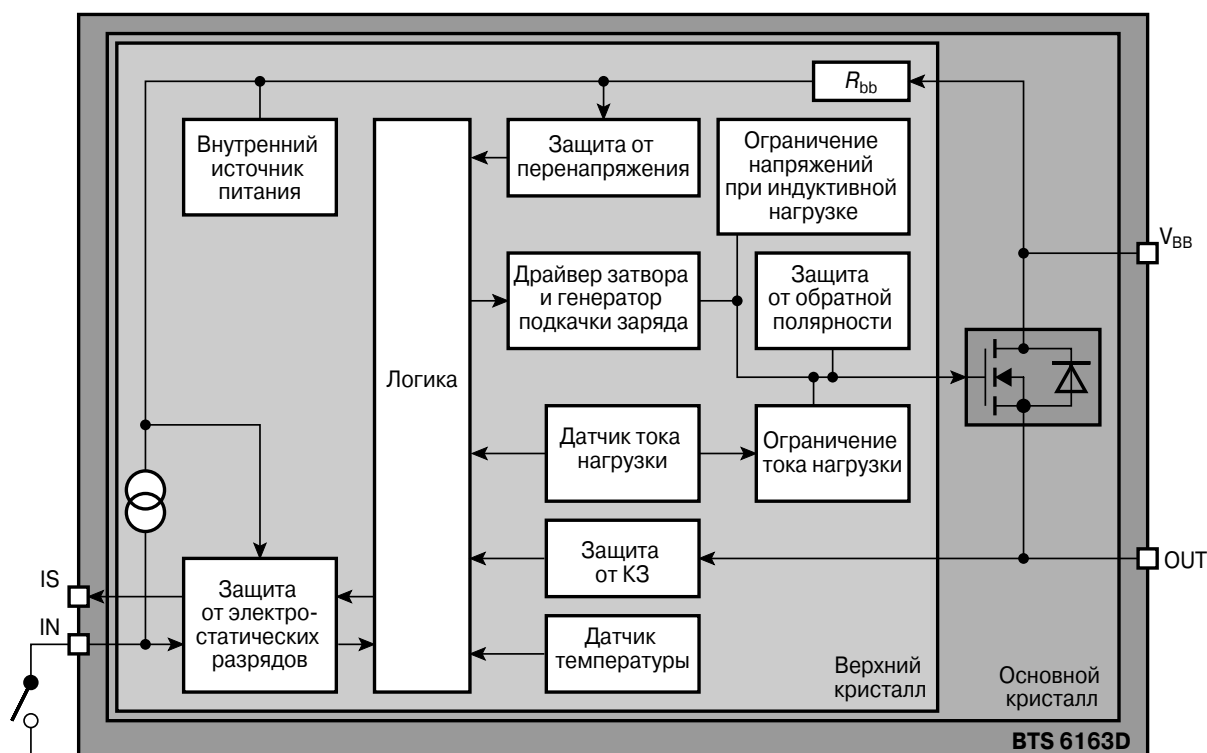


Рис. 3.66. Блок-схема сильноточного PROFET — BTS6163D.

Блок-схема сильноточного PROFET приведена на Рис. 3.66. Этот прибор представляет одно из последних поколений и поставляется в компактном и недорогом корпусе D-Pack. Более того, данный прибор может применяться в автомобилях с 42-вольтовым питанием.

Прибор включается путём подключения входного вывода IN к земле.

Выход IS при подключении к нему резистора на землю позволяет в реальном времени измерять текущее значение выходного тока. В Табл. 3.3 приведены основные характеристики приборов семейства BTS61xx.

Компания Infineon предлагает очень широкий ассортимент серийно выпускаемых приборов. На Рис. 3.67 представлена древовидная схема выбора PROFET в корпусе с теплоотводом. Данная схема упрощает поиск необходимой для пользователя продукции.

Древовидная схема выбора прибора в корпусе с улучшенным теплоотводом (усовершенствованные корпуса SO) приведена на Рис. 3.68.

Конечно, для создания полумостовых и мостовых схем возможно совместное использование приборов HITFET и PROFET. В 1998 году компания Infineon выпустила на рынок устройства подобного типа под наименованием ThrilithIC.

Таблица 3.3. Параметры приборов семейства BTS61xx

Прибор	$V_{DS(AZ)}$ [В]	$R_{on(max)}$ [мОм]	$I_{L-SC(typ)}$ [А]	Коэффициент преобразования датчика тока	Отключение (перегрев/короткое замыкание)	Тип корпуса
BTS6133D	39	10.0	75	10 000	перезапуск/ перезапуск	DPAK5
BTS6143D	39	10.0	75	10 000	перезапуск/ отключение	DPAK5
BTS6144P	39	9.0	90	12 500	перезапуск/ отключение	DPAK5
BTS6163D	63	20.0	70	9 000	перезапуск/ отключение	TO220/7

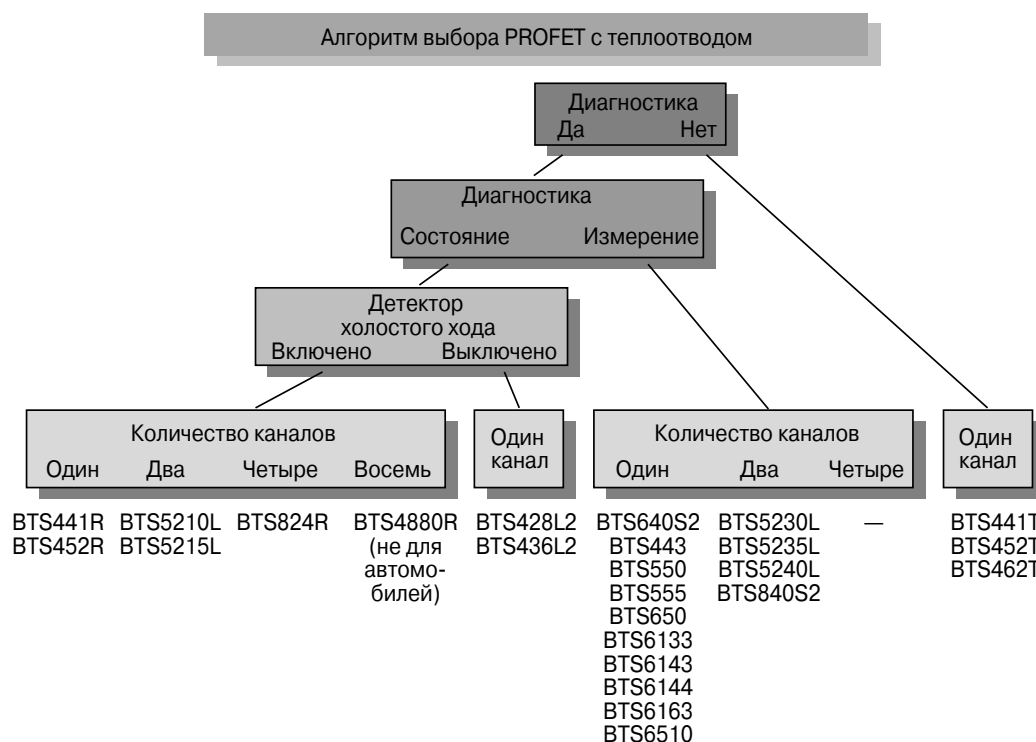


Рис. 3.67. PROFET в корпусах с теплоотводом.

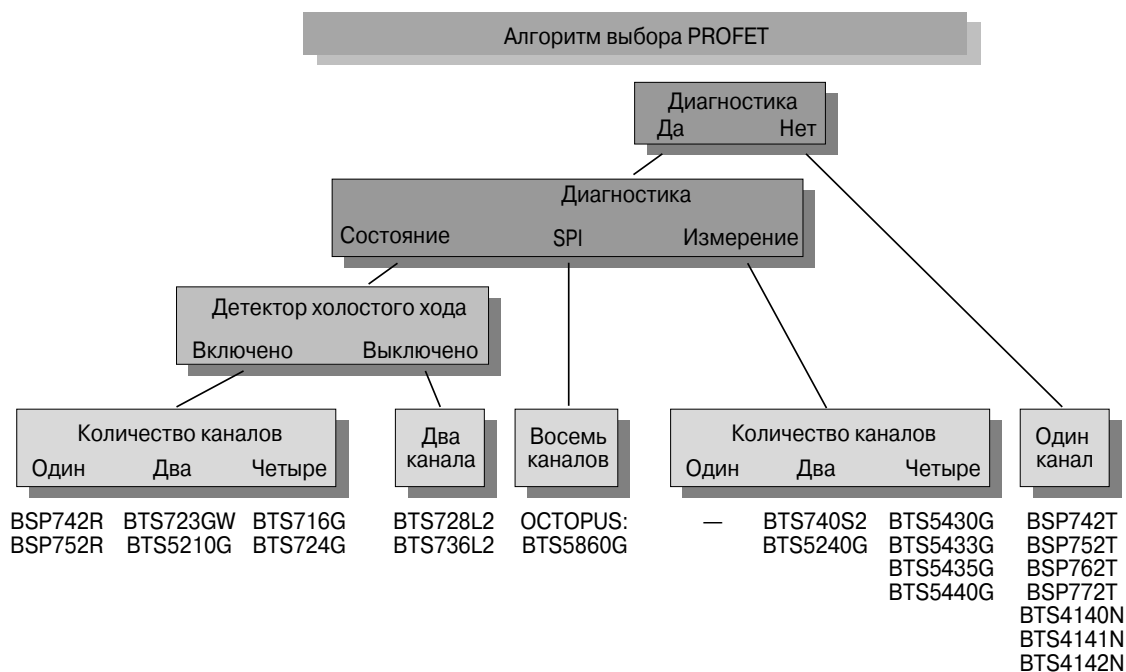


Рис. 3.68. PROFET в корпусах SO с улучшенным теплоотводом.

3.6.3. Многоканальные ключи

В отличие от интеллектуальных ключей, многоканальные ключи изготавливаются по технологии SPT (от *англ.* Smart Power

Technology). Используя эту технологию, можно совмещать в одном корпусе силовые каскады, рассчитанные на постоянный ток вплоть до 5 А (пиковый до 10 А), аналоговые блоки и сложные логические схемы.

Можно сочетать верхние и нижние ключи. В автомобильной электронике многоканальные ключи применяются, в основном, в трансмиссии, в системах управления двигателем и коробкой передач. В области безопасности многоканальные нижние ключи используются для управления клапанами в системе ABS, а также в шасси. В этих устройствах регулирование тока должно осуществляться, главным образом, в высокочастотном импульсном режиме. С точки зрения долговременной надёжности особую проблему представляет наличие больших индуктивностей, поскольку при каждой операции включения или выключения силовой МОП-транзистор должен рассеивать значительную тепловую мощность. Поэтому к ключам предъявляют жёсткие требования по уровню создаваемых помех в процессе переключения (мягкое переключение), диапазону рабочих температур (управление коробкой передач) и диагностическим возможностям. Ниже приведены основные характеристики и особенности многоканальных нижних ключей компании Infineon.

Основные характеристики:

- Комплексная защита:
 - Защита от короткого замыкания и перегрузки
 - Защита от перегрева
 - Защита от перенапряжения
 - Защита от электростатических разрядов
- Ограничение тока
- Обнаружение режима холостого хода
- Прямое параллельное управление 4/6/8/... ШИМ-каналами
- Напряжение питания 5 В
- Совместимость с 3.3-В микроконтроллерами

Особенности:

- SPI-интерфейс
- Метод регулирования тока P&H
- Обнаружение короткого замыкания на землю
- Наличие аварийного вывода FAULT
- Дежурный режим
- Расширенный диапазон напряжения питания (4.5...32 В)
- Программируемый вывод, сигнализирующий о режиме холостого хода
- Контроль значений тока

- Отключение при перегрузке
- Шина микроконтроллера
- Возможность конфигурирования нижнего/верхнего ключа

В устройствах трансмиссии эти микросхемы обычно используются для того, чтобы осуществлять управление всеми нагрузками в диапазоне от нескольких миллиампер до нескольких ампер, от простых устройств ввода/вывода до ШИМ-устройств. В кузовной электронике многофункциональные ключи используются как драйверы реле и в различных маломощных устройствах. В общем случае от них требуется только выполнение функций ввода/вывода.

Для наибольшего охвата рынка компания Infineon разработала широкую линейку многоканальных нижних ключей, которые поставляются в самых разнообразных корпусах. Продукция компании представлена на **Рис. 3.69**.

Имеются все типы ключей, от простых двухканальных ключей до сложных ключевых систем для управления двигателем в современных автомобилях. Благодаря жёстким требованиям автомобильных спецификаций (широкий диапазон рабочих напряжений и температур, и т.д.), эти современные компоненты вполне могут также использоваться в промышленной и бытовой электронике.

Последнее поколение приборов данного типа содержит схемы точной регулировки тока, которая, например, необходима в новых системах управления коробкой передач.

Для увеличения возможного числа потребителей, некоторые из указанных новых приборов могут быть сконфигурированы как нижние ключи или верхние ключи. Это позволяет использовать их при создании мостовых схем или высокоэффективных синхронных выпрямителей.

В 1996 году компания Infineon выпустила на рынок первый в мире четверть-мостовой ключ TLE6230-6, совмещающий верхние и нижние ключи. Он состоит из шести верхних и шести нижних ключей, управление и диагностику которых можно осуществлять через последовательный интерфейс. На **Рис. 3.70** представлены различные варианты подключения выходов этого прибора.

Данный прибор предназначен для применения в кузовной электронике. Например, TLE6208-6 может квази-синхронно

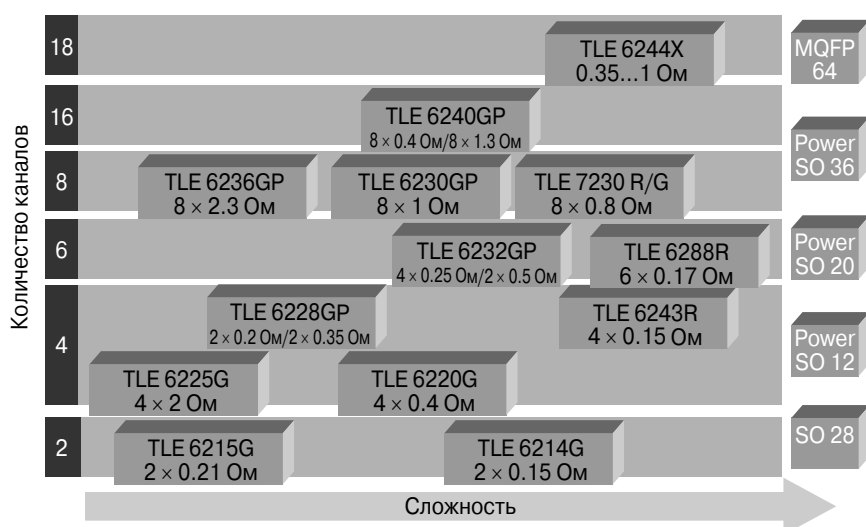


Рис. 3.69. Линейка нижних ключей, производимых компанией Infineon.

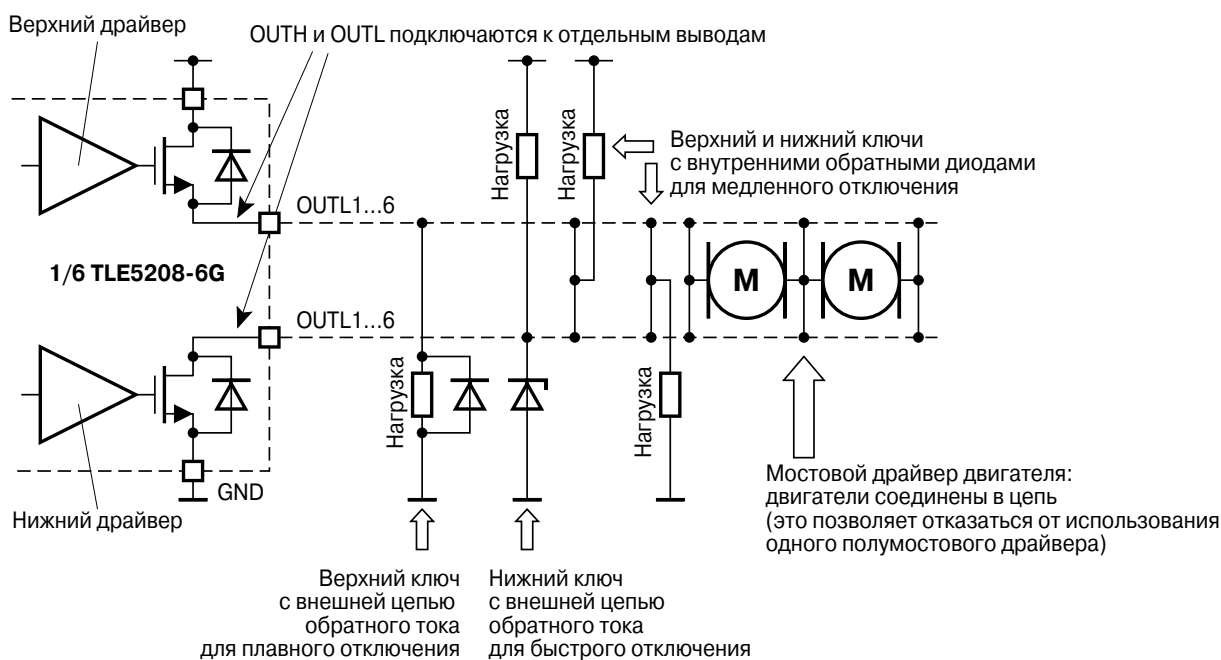


Рис. 3.70. Возможные варианты использования четверть-мостового ключа TLE6308-6.

управлять пятью электродвигателями системы кондиционирования. Кроме того, он подходит для управления реле или для включения и выключения элементов электронного блока управления (управление электропитанием), например датчиков и т.д. Так как в автомобилях используется множество реверсивных электроприводов, для электронного управления ими требуется большое количество мостовых ИС управления двигателями.

3.6.4. Мостовые схемы

В настоящее время в автомобилях резко возросло количество электроприводов. В зависимости от того, как работает электродвигатель — реверсивно или нереверсивно — требуются различные схемы драйверов. На Рис. 3.71 показаны различные схемы управления электродвигателями. Нереверсивные схемы управления, представленные на Рис. 3.71 (А, Б и В), конечно же, могут быть собраны и с использованием верхних ключей.

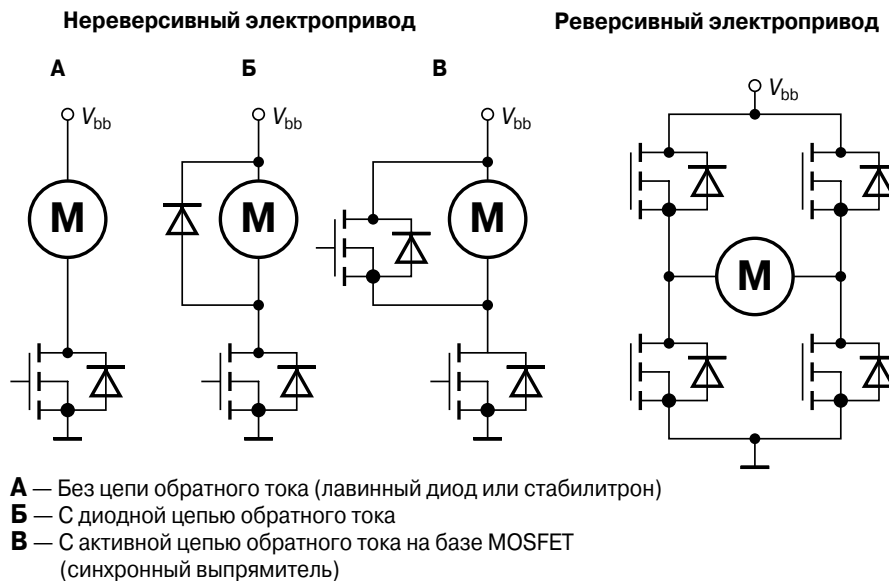


Рис. 3.71. Схемы приводов для электродвигателей постоянного тока.

Нереверсивные устройства могут быть собраны на основе как верхних, так и нижних ключей. В режиме высокочастотной ШИМ используются полумостовые схемы, так как они обладают более высоким КПД. Для реверсивных электроприводов требуются мостовые схемы. Один нижний ключ и один верхний ключ включены последовательно между источником питания и землёй, формируя полумостовую схему. Следовательно, нагрузка (электродвигатель), включённая между двумя такими полумос-

тами, может питаться как прямым, так и обратным током.

При оценке электропривода наиболее важным параметром является крутящий момент. Для электродвигателя крутящий момент и ток в обмотке ротора прямо пропорциональны друг другу, причём указанная зависимость имеет линейный характер. Это можно увидеть из представленного на **Рис. 3.72** семейства характеристик для электродвигателя постоянного тока.

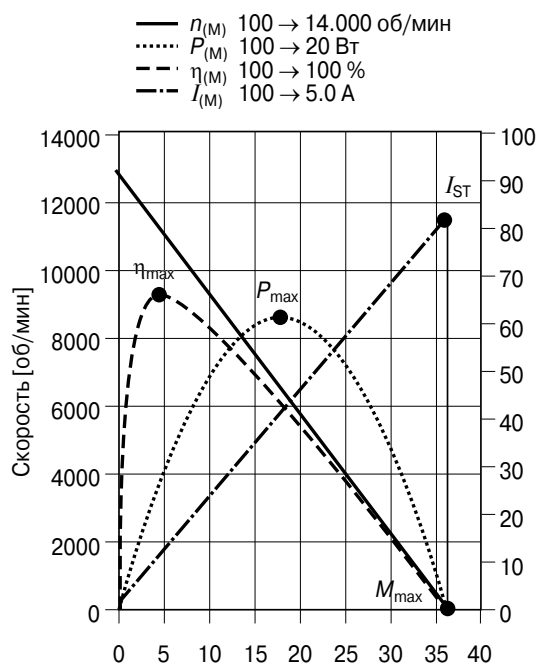


Рис. 3.72. Семейство характеристик для электродвигателя постоянного тока.

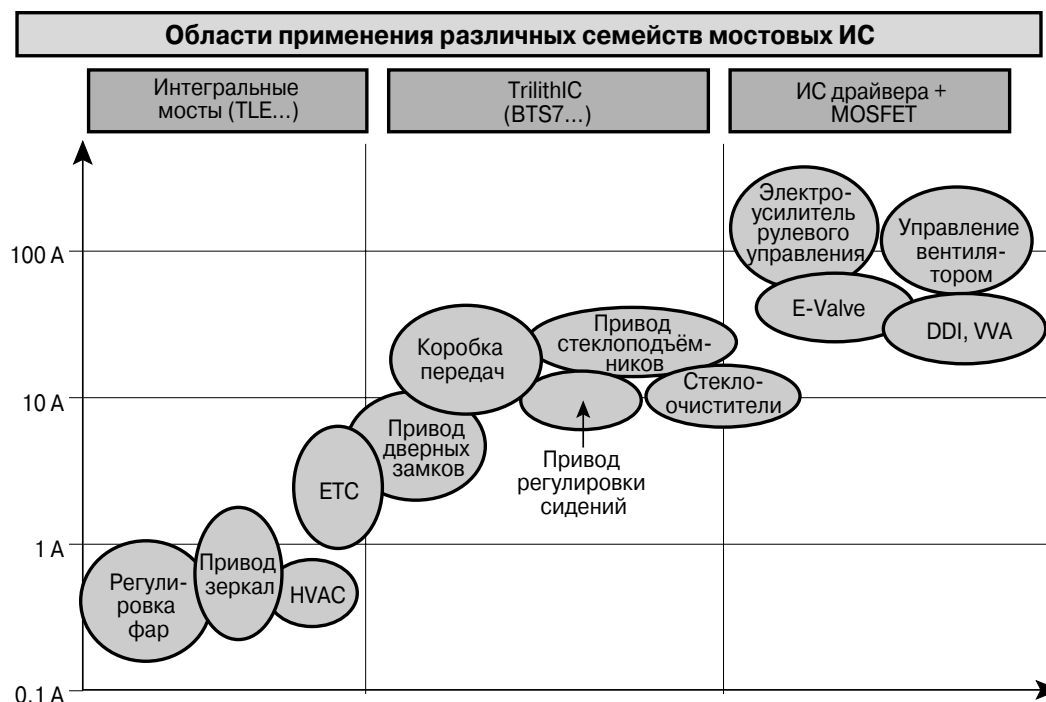


Рис. 3.73. Автомобильные устройства, расположенные в порядке возрастания рабочего тока.

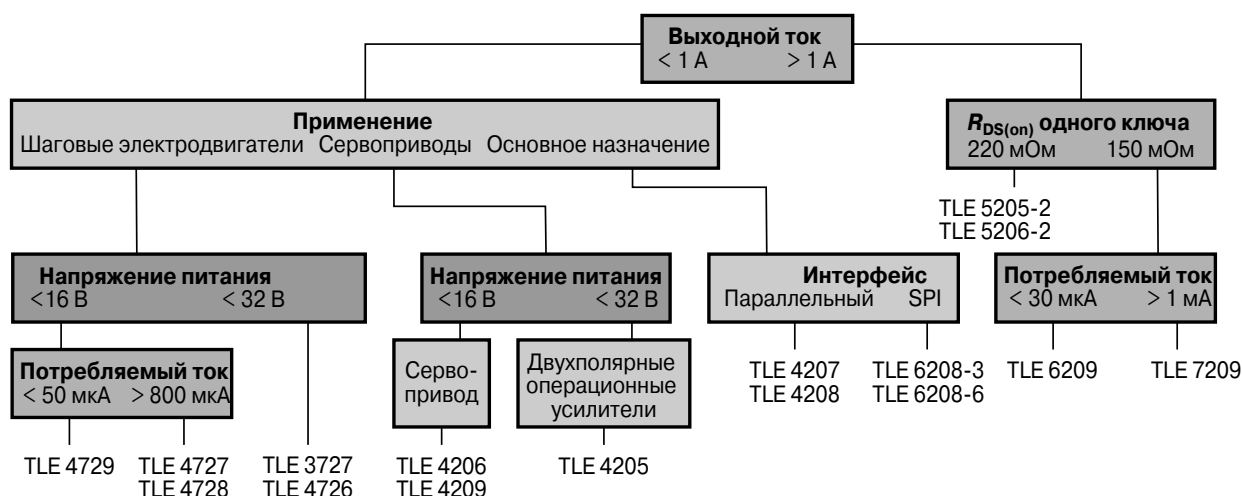


Рис. 3.74. Интегральные мостовые ИС для электродвигателей.

Приведённые характеристики соответствуют обычному маломощному электродвигателю дверного замка. Более подробную информацию можно найти на Web-сайте компании Infineon, в разделе «DC motor drives» («Приводы электродвигателей постоянного тока»).

На Рис. 3.73 представлены устройства автомобильной электроники, расположенные в порядке возрастания номинального тока.

Их можно разделить на три группы, в зависимости от технологий, использующихся для изготовления выходных каскадов.

Электродвигатели с малыми токами, до 10 А, могут управляться монолитными мостовыми ИС, изготовленными по технологии SPT. Данное семейство приборов представлено на Рис. 3.74 в виде древовидной схемы.

На рисунке мостовые схемы управления двигателями с номинальным током более одного ампера расположены справа. В автомобилях эти мостовые схемы используются, например, в электронных дроссельных заслонках (электронная педаль газа, E-GAS). Более значительная группа электроприводов с номинальными токами менее

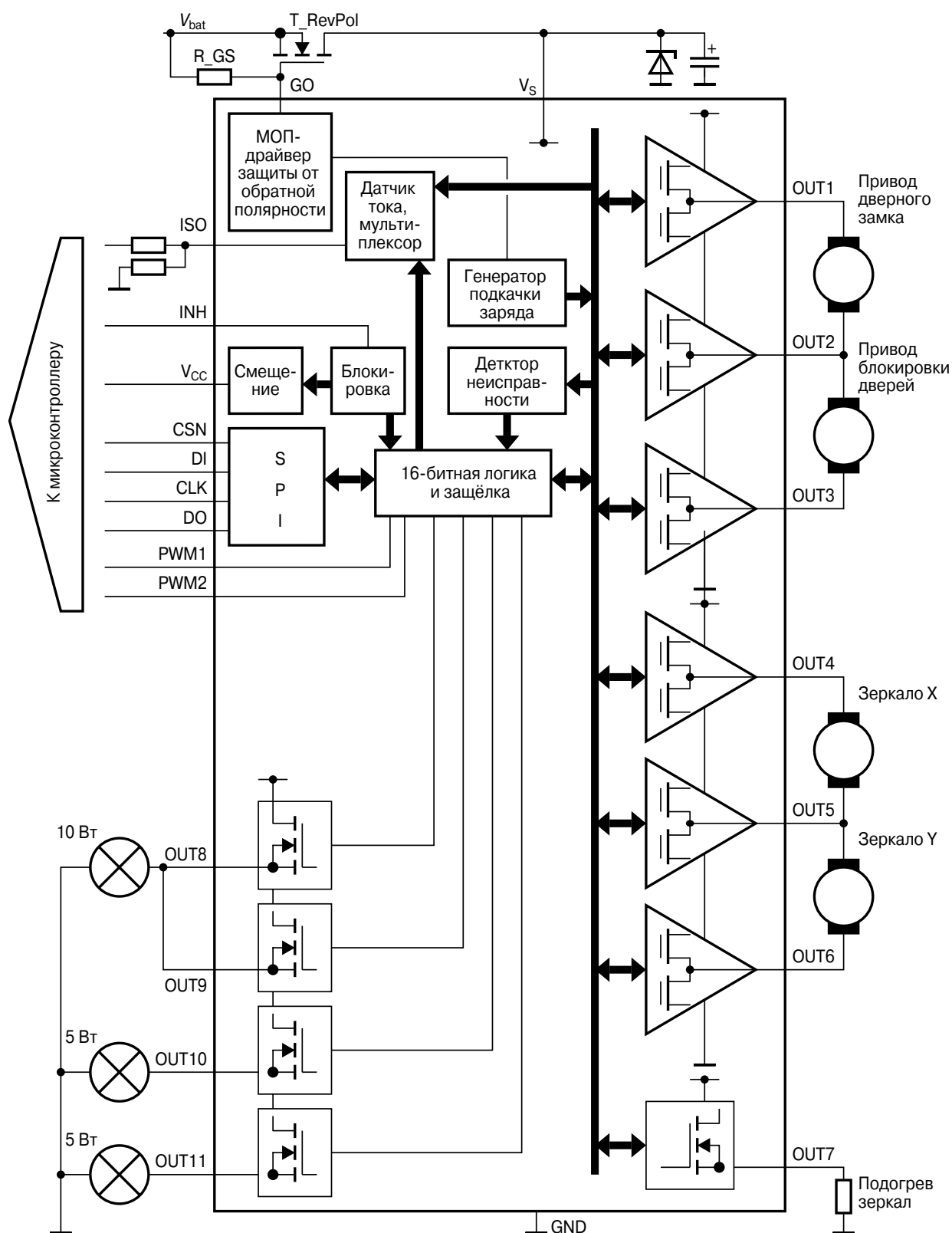


Рис. 3.75. Многофункциональная силовая ИС TLE7201R с интегрированными приводами всех электродвигателей передних дверей автомобиля.

1 А, в свою очередь, может быть разделена на электроприводы сервомоторов (электроприводы с аналоговой обратной связью, например устройство регулирования яркостью фар, наличие которого стало обязательным требованием на территории Евросоюза в 80-х годах прошлого века), стандартные мостовые схемы управления электродвигателями постоянного тока и специализированную группу приводов для шаговых электродвигателей. Приводы шаговых электродвигателей используются для того, чтобы исключить цепи обратной связи, в основном потенциометры, и схемы полного анализа данных. Их основной областью применения являются линейные исполнительные механизмы (шаговые электродвигатели с червячными механизмами, такие как клапанный позиционер) и различные сервоприводы.

Благодаря интеграции этих приборов в электронные контроллеры автомобиля, мостовые схемы объединяются в системные ИС, такие как многофункциональный мост TLE7201R. Блок-схема данного модуля представлена на **Рис. 3.75**.

Для токов от 10 до 100 А необходимо использовать ключи с малым внутренним сопротивлением. Поэтому для формирования мостовых схем управления электродвигателями целесообразно использовать наборы интеллектуальных ключей TrilithIC.

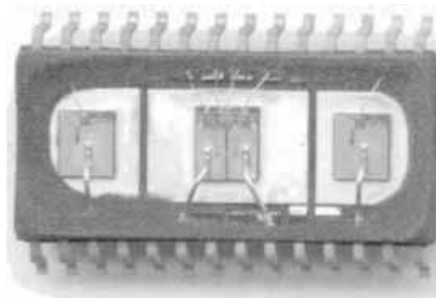
В корпусах SO с улучшенным теплоотводом применяется новый способ проволоочного монтажа кристалла, что позволяет получить более высокие токи и значительно большую надёжность по сравнению с параллельной разваркой несколькими золотыми проволочками. На **Рис. 3.76** показан внутренний вид ИС TrilithIC в корпусе SO28.

Для таких массовых приложений, как стеклоподъёмники, автомобильные люки и устройства регулирования положения сидений, компания Infineon разработала серию ИС BTS78xx семейства TrilithIC.

Второе поколение данных приборов выпускается в специально разработанном для семейства TrilithIC мощном корпусе с тремя отдельно охлаждающимися областями.

Во множестве новых систем, таких как рулевое управление с электроусилителем, регулируемый клапанный механизм (VVT), управление вентилятором, прямой впрыск дизельного топлива и т.д., токи иногда значительно превышают 100 А. К тому же, не-

Новое поколение микросхем имеет алюминиевые соединительные проводники толщиной 250 мкм



Улучшенные характеристики:

- Надёжность
- Распределение тока
- Появилась возможность проведения испытаний
- Качество
- Охлаждение

Рис. 3.76. Сильноточные соединения ИС семейства TrilithIC в корпусе SO28.

обходимо управлять данными токами, используя быстродействующие ШИМ-регуляторы. Это требует больших токов управления затвором и делает необходимым использование ИС МОП-драйверов, которые могут обеспечивать указанные высокие импульсные токи для управления силовыми МОП-транзисторами в полумостовой конфигурации таким образом, чтобы избежать появления сквозного тока (когда оба транзистора одного полумоста находятся в проводящем состоянии). Поскольку многие устройства в автомобиле должны удовлетворять жёстким требованиям стандартов безопасности, требуются дополнительные функции диагностики и защиты.

Компания Infineon подготовила свою собственную широкую линейку сильноточных ключей во главе с драйверами TLE628x, наиболее важные характеристики которых приведены в **Табл. 3.4**.

В заключение на **Рис. 3.77** представлена схема выбора сильноточных приводов электродвигателей.

Слева расположены ИС TrilithIC типа BTS77xx и BTS78xx. Ниже на ветке, находящейся слева, находятся быстродействующие ШИМ-приводы — мосты управления электронной педалью газа, TLE6209 и TLE7209.

Ниже по ветви, относящейся к сильноточным приборам, можно увидеть семейство микросхем МОП-драйверов TLE628xx.

Таблица 3.4. Параметры МОП-драйверов семейства TLE628х

	TLE6280/7GP Трёхфазный драйвер	TLE6283Q Трёхфазный драйвер	TLE6281G Драйвер полумоста	TLE6282G Драйвер полумоста/моста
				
Тип корпуса	Power SO36	MQFP44	SO20	SO20
Напряжение питания, В	12	12	12 и 42	12 и 42
Диагностика	•	•	•	•
Защита от КЗ	•	•	•	•
Рабочий цикл 100%		•	•	•
Датчик тока		•		
Время переключения, нс	300	300	600	600
Область применения	EPS*, система EPHS, управление вентилятором	EPS*, система EPHS, управление вентилятором	Стеклоочистители, коробка передач, стеклоподъемники	EVT, VVA, Common rail

* Система электропневматического переключения.

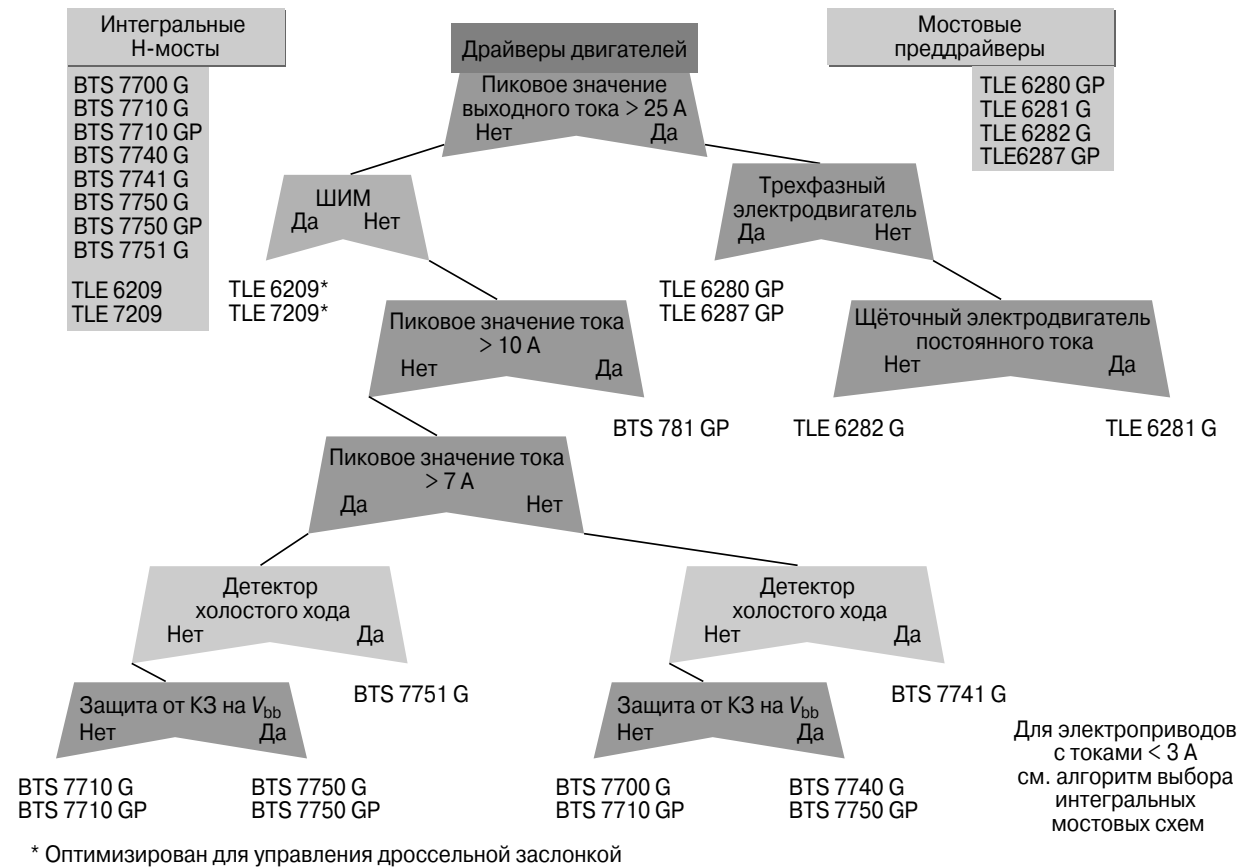


Рис. 3.77. Сильноточные приводы электродвигателей компании Infineon.

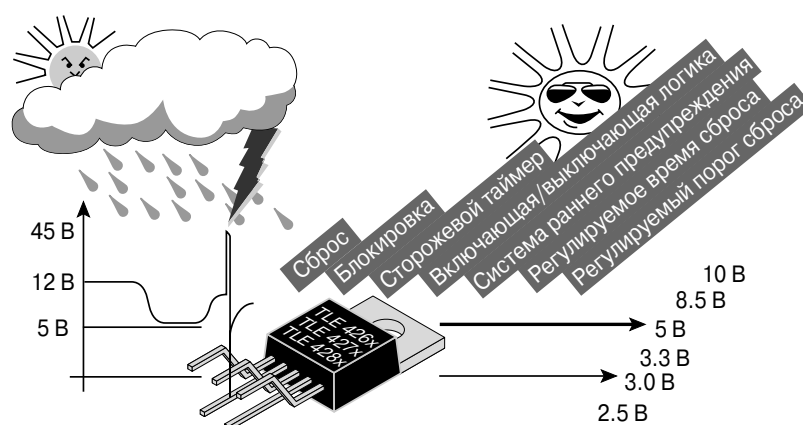


Рис. 3.78. Наиболее важные функции автомобильных стабилизаторов напряжения.

В скором времени данные драйверы будут встраиваться в системные ИС при условии, что гибкость их работы при этом не будет слишком ограничена.

Широкая номенклатура приборов наглядно подтверждает, что электроприводы можно встретить практически в любой системе автомобиля.

3.6.5. Микросхемы источников питания

В эту группу продукции входят аналоговые стабилизаторы напряжения, DC/DC-преобразователи и стабилизаторы тока.

Поскольку для каждого контроллера требуется модуль электропитания, аналоговые стабилизаторы напряжения используются в большинстве систем автомобиля. Назовём наиболее важные:

- Противобуксовочная система и антиблокировочная система тормозов (ABS)
- Система подушек безопасности
- Система обогрева и кондиционирования воздуха
- Система регулировки положения сидений
- Автомобильный радиоприёмник
- Приборная панель
- Дверная электроника
- Система управления двигателем
- Устройства автоматической блокировки двигателя (иммобилайзеры)
- Система бесконтактного отпирания/запирания дверей автомобиля
- Шасси/кузов
- Трансмиссия

Часто стабилизаторы напряжения встраиваются в системные ИС. Это делается в отработанных системах, таких как ABS или система управления подушками безопас-

ности, которые используются в автомобилях уже много лет, постоянно оптимизируются и, следовательно, находятся под высоким ценовым давлением.

При более высоких токах все чаще используются DC/DC-преобразователи из-за меньших потерь мощности. Совсем недавно, с массовым внедрением светодиодов в автомобили, для их управления стали применяться стабилизаторы постоянного тока.

Стабилизаторы напряжения, используемые в автомобилях, должны выдерживать жёсткие условия окружающей среды и подавлять помехи по питанию. Из Рис. 3.78 видно, что стабилизатор напряжения должен защищать чувствительную электронику, микропроцессор или интеллектуальный датчик от перегрева и колебаний напряжения, а также контролировать их состояние при помощи различных диагностических систем.

Наиболее важными контрольно-диагностическими функциями стабилизаторов напряжения компании Infineon являются система раннего предупреждения, сторожевой таймер и сброс. Например, система раннего предупреждения позволяет отслеживать состояние аккумуляторной батареи, выявляя падение напряжения ниже заданного уровня, и, следовательно, инициировать процедуру сохранения данных, прежде чем произойдет сброс системы схемой защиты от падения напряжения. Сторожевой таймер проверяет процессор на «зацикливание» и, в случае необходимости, выводит его из бесконечного цикла выполнения программы путём сброса.

В автомобильной электронике во многих устройствах значительную роль играет собственный ток потребления. В частности,

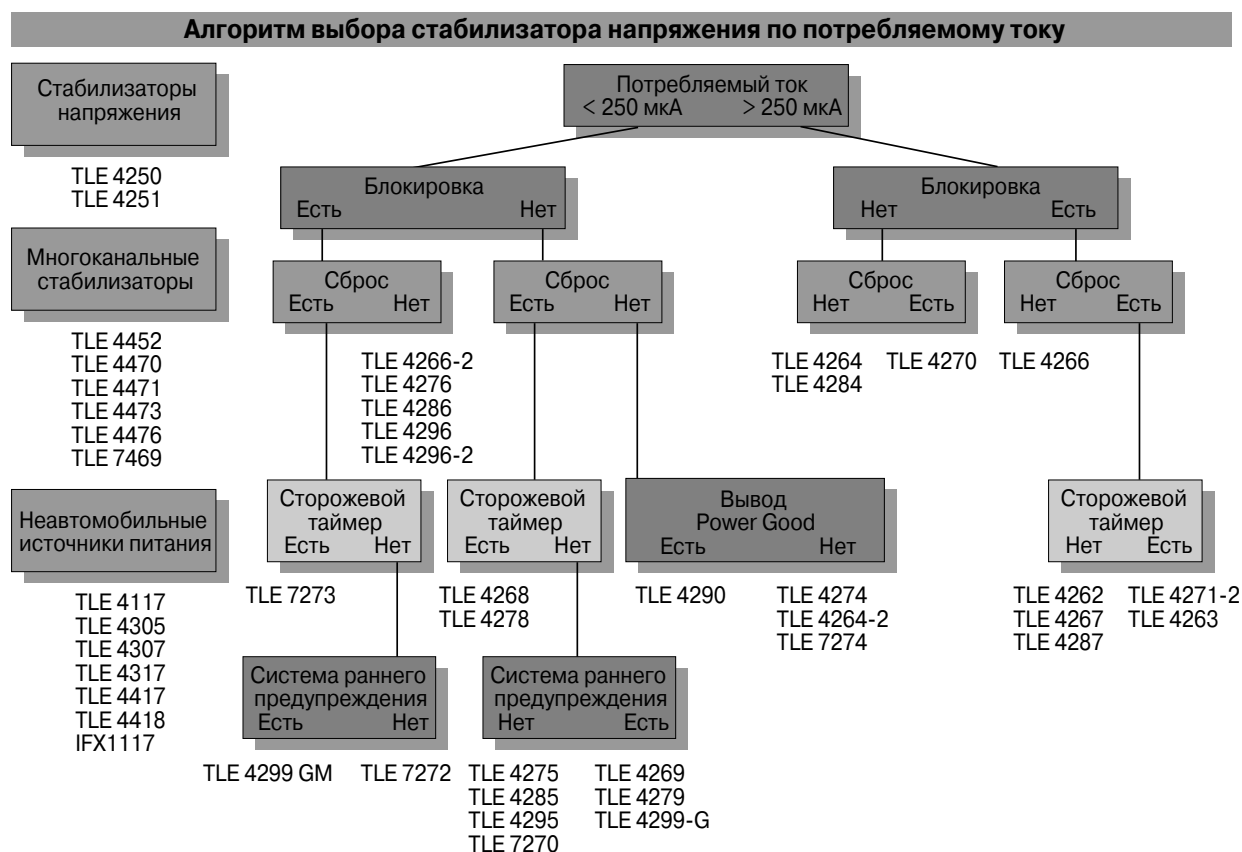


Рис. 3.79. Выбор стабилизатора напряжения по потребляемому току.

системы, которые остаются в рабочем состоянии, когда автомобиль находится на стоянке, разрабатываются, исходя из критерия минимального потребления тока. Таким образом, древовидная схема выбора, представленная на **Рис. 3.79**, в самом верху разделяется на две ветви: на стабилизаторы с низким потребляемым током и стабилизаторы с высоким потребляемым током.

Сильно разветвленное дерево говорит о том, что линейка стабилизаторов напряжения, представленная компанией Infineon, может удовлетворять фактически любым требованиям заказчиков, производящих автомобильное электрооборудование. В верхнем левом углу представлены следящие стабилизаторы напряжения (voltage tracker), которые используются в качестве буферов для питания дополнительных устройств. На **Рис. 3.80** представлены различные варианты применения этих универсальных устройств. Помимо одноканальной модели, в разработке находятся ещё две модели: TLE 4252 — с одним выходом на 200 мА и TLE 4452 — с двумя выходами по 200 мА.

Основное достоинство применения данных устройств состоит в том, что в случае короткого замыкания на выходе следящего стабилизатора основное напряжение питания не изменяется. Кроме того, дополнительное преимущество заключается в распределении тепловых потерь на печатной плате между несколькими приборами. Основной областью применения следящих стабилизаторов напряжения компании Infineon, являются, например, контроллеры датчиков. Поскольку выходное напряжение следящего стабилизатора можно отключить путём подачи запрещающего сигнала, потребляемый ток, а с ним и расход топлива, может быть снижен. Конечно же, существует также возможность использовать следящие стабилизаторы в качестве верхних ключей для коммутации малых нагрузок.

Древовидная схема, приведённая на **Рис. 3.81**, позволяет пользователю подобрать подходящее устройство по известному выходному току. Обе схемы выбора с последними данными можно найти в Интернете.

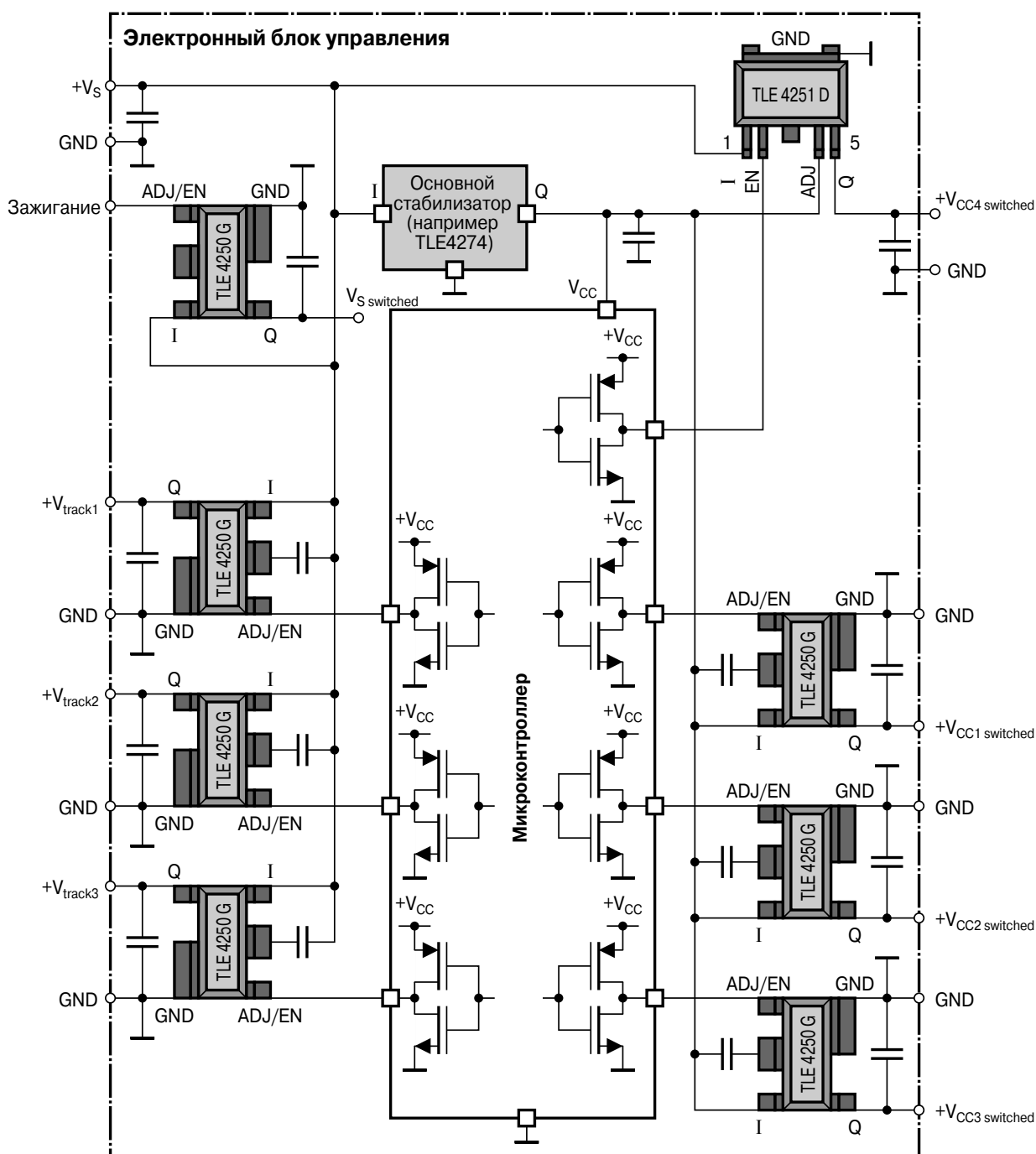


Рис. 3.80. Пример использования следящих стабилизаторов напряжения TLE 4250 и TLE 4251 для получения равномерного распределения тепловых потерь на печатной плате.

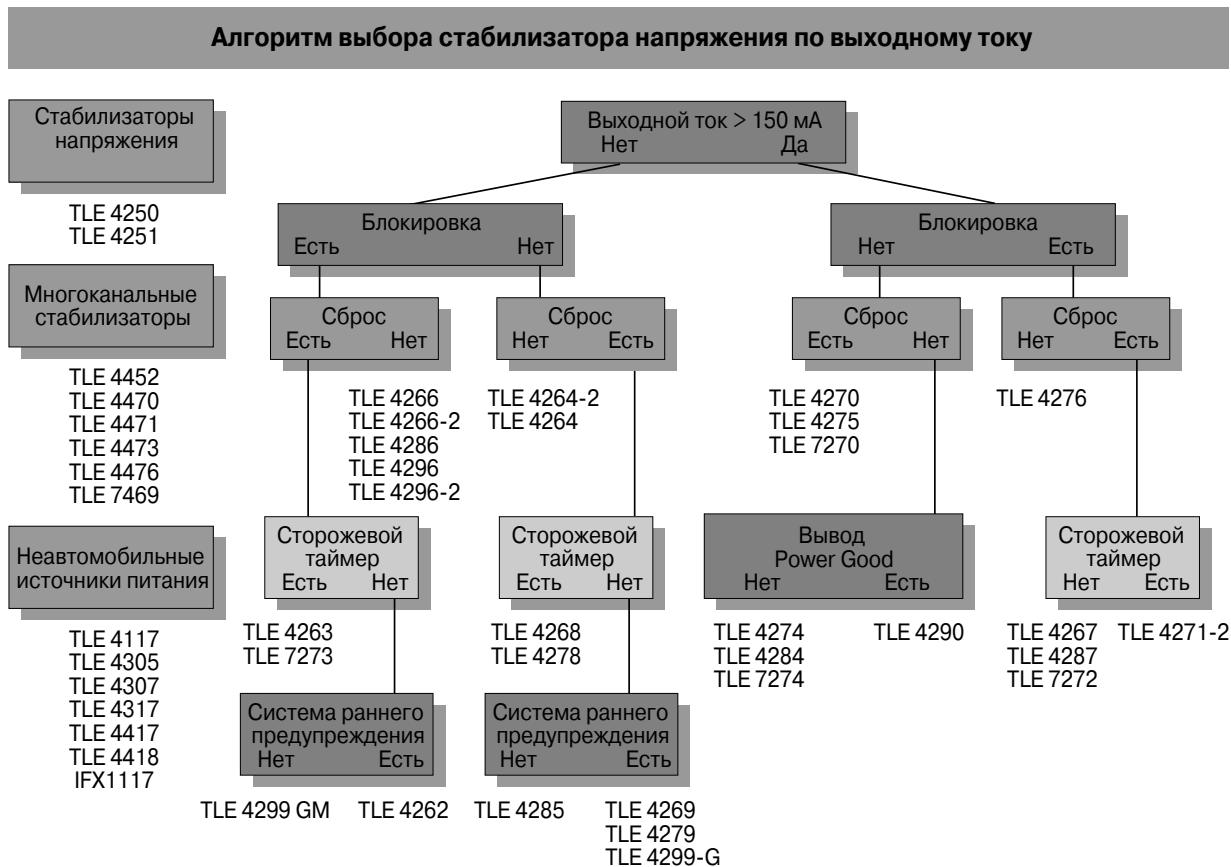


Рис. 3.81. Выбор стабилизаторов напряжения по выходному току.

DC/DC-преобразователи для автомобильной электроники

Во многих системах автомобиля (трансмиссия, система безопасности и информационно-развлекательные системы) используются всё более мощные процессоры, потребление тока растёт, а вместе с ним растут и потери в аналоговых стабилизаторах. Поэтому выгоднее использовать импульсные стабилизаторы — так называемые DC/DC-преобразователи. Они делятся на понижающие, которые понижают напряжение, и на повышающие, которые создают более высокое выходное напряжение, чем напряжение источника. На **Рис. 3.82** приведено сравнение коэффициентов полезного действия стабилизаторов (аналоговых/импульсных) для типового устройства управления двигателем.

Солидный прирост в КПД уравнивает дополнительные затраты на организацию импульсного режима работы при выходных токах уже порядка 1 А. С вводом в

автомобилях напряжения питания 42 В DC/DC-преобразователи потеснят аналоговые стабилизаторы во всём диапазоне токов. Именно поэтому компания Infineon уже сейчас разработала линейку DC/DC-преобразователей, поддерживающих входное напряжение 42 В. На **Рис. 3.83** представлены основные типы DC/DC-преобразователей.

Здесь можно увидеть простые интегральные понижающие преобразователи (TLE6365 и TLE6372), а также комбинацию понижающего и повышающего преобразователей (TLE6363). Кроме того, на **Рис. 3.83** представлены драйверы для внешних p -канальных МОП-транзисторов (TLE6389) и стабилизаторы напряжения с более сложной структурой с вторичными аналоговыми стабилизаторами.

Блок-схема и основные особенности стабилизатора TLE6368 представлены на **Рис. 3.84.**

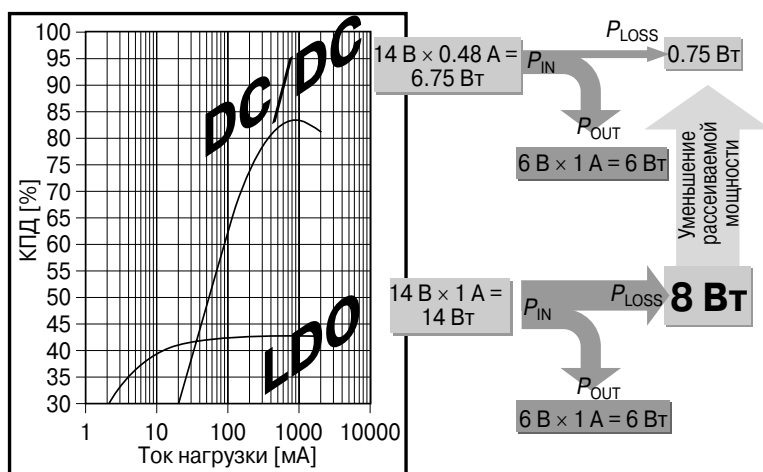


Рис. 3.82. Сравнение коэффициентов полезного действия аналогового стабилизатора и DC/DC-преобразователя.

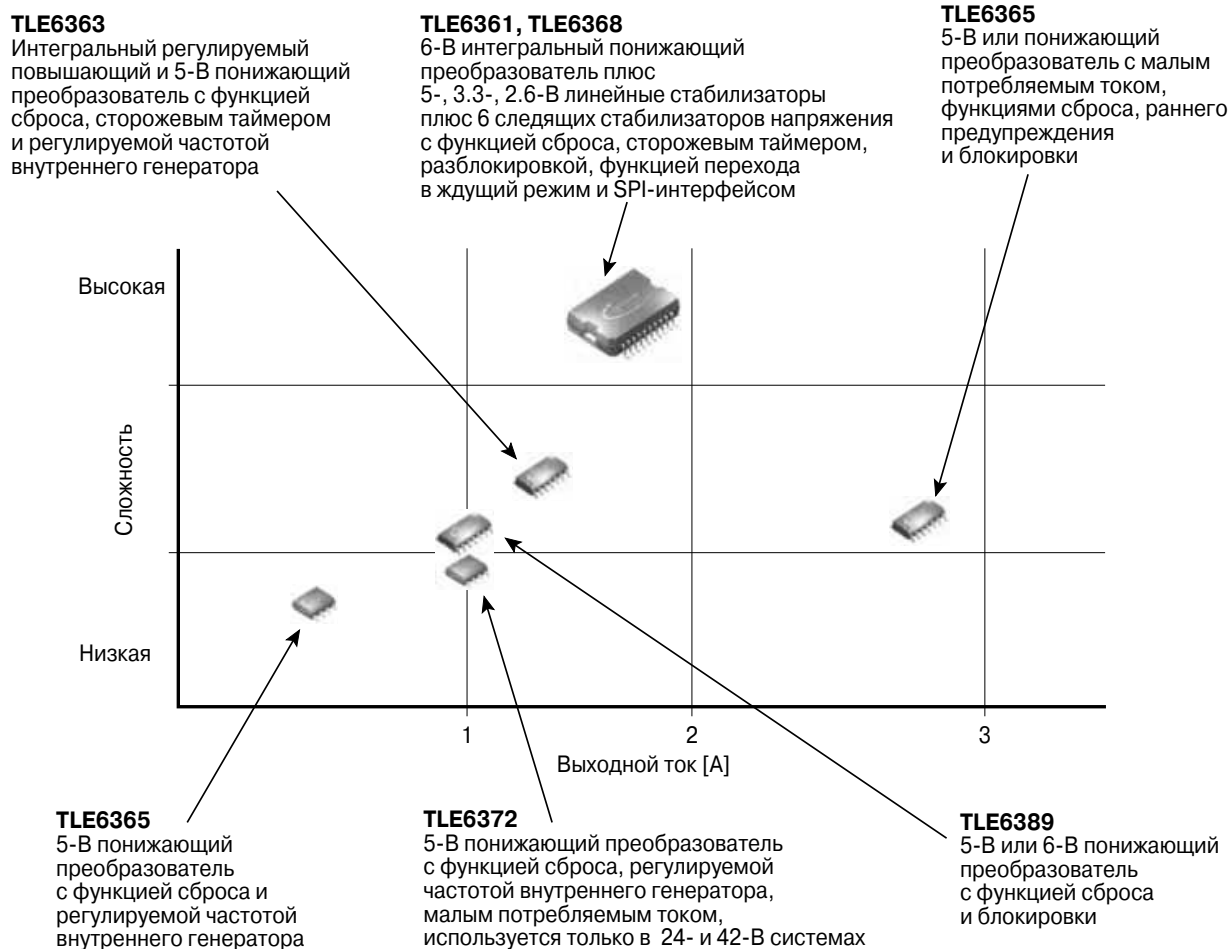


Рис. 3.83. Основные типы DC/DC-преобразователей для автомобильной электроники.

TLE6368 — источник питания для 32-битных микроконтроллеров; входное напряжение 12 и 42 В

- ☑ Прибор аналогичен TLE 6361
- ☑ Минимальное входное напряжение 5.5 В
- ☑ Линейные стабилизаторы напряжения:
 - 5 В, 800 мА
 - 2.6 или 3.3 В, 400 мА
 - 2.6 В или 3.3 В, 300 мА
- ☑ Включение следящих стабилизаторов при пуске
- ☑ Отключение сторожевого таймера при пуске
- ☑ Задержка сброса при пуске – 8 мс

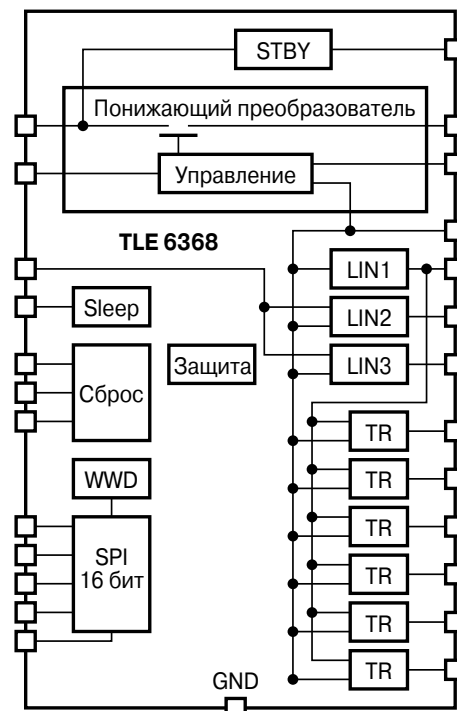


Рис. 3.84. Стабилизатор напряжения TLE6368 для питания автомобильных устройств с мощными процессорами.

Стабилизаторы тока для управления светодиодами

Серия стабилизаторов тока TLE424x охватывает другую широкую область применения — управление светодиодными лампами в автомобилях. Последнее поколение мощных светодиодов может заменить электронные лампы накаливания во множестве устройств. Поскольку светодиоды достигают своей рабочей яркости намного быстрее, чем лампы накаливания, они прекрасно подходят для повторителей стоп-сигналов. Кроме того, конструктивные характеристики светодиодов являются более предпочтительными (свобода выбора конструкции и глубина установки).

ИС TLE4240 от Infineon — первый в мире стабилизатор тока для светодиодов — уже широко используется в различных устройствах. Его основные преимущества:

- стабилизация постоянного тока;
- обеспечение постоянной яркости светодиодов;
- длительный срок службы;
- наличие диагностических функций.

На **Рис. 3.85** показано, что, помимо поддержания постоянной яркости, происходит и повышение надёжности (при помощи

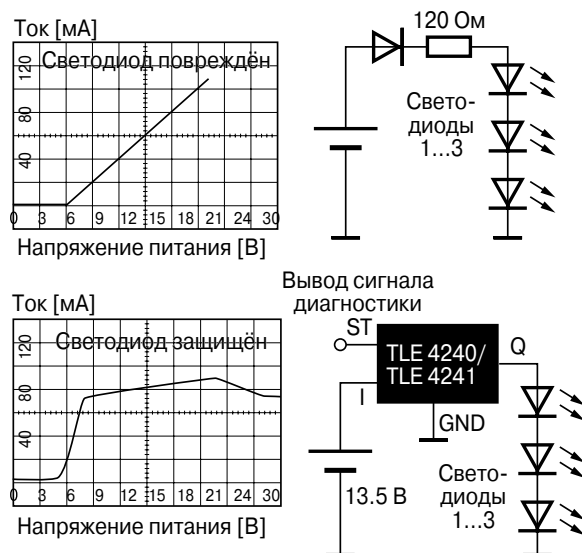


Рис. 3.85. Сравнение драйвера светодиодов с простым ограничителем тока, в качестве которого используется последовательно включённый резистор.

стабилизации тока светодиод можно эффективно защищать от перегрузок) по сравнению с простыми ограничителями тока с последовательно включённым резистором. Кроме того, микроконтроллер получает информацию о любом разрыве в цепи свето-

диодов в виде сигнала диагностического флага ST.

На **Рис. 3.86** представлена ИС TLE 4241 — драйвер светодиодов с переключаемым уровнем тока и ШИМ-модуляцией входного сигнала. Так как выходной ток стабилизатора может программироваться при помощи внешнего резистора, то он может применяться в задних фарах или повторителях стоп-сигналов и в различных дополнительных устройствах освещения во многих автомобилях.

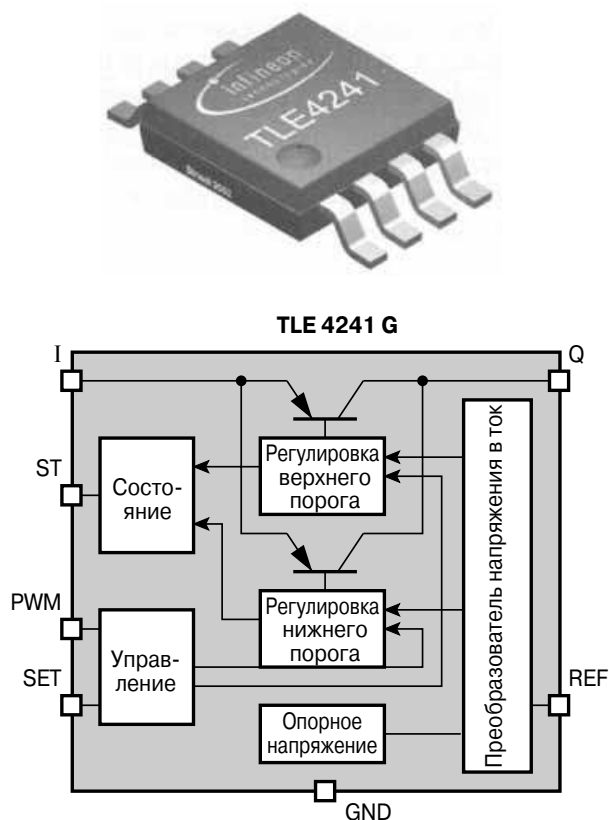


Рис. 3.86. Блок-схема TLE 4241.

В ближайшем будущем для управления светодиодами также в основном будут использоваться импульсные (ключевые) схемы, поскольку в системах освещения потери мощности являются серьёзной проблемой.

3.6.6. Трансиверы

Ещё одной группой приборов с совершенно другими функциональными возможностями являются трансиверы (приёмопередающие устройства), обеспечивающие обмен данными между электронными контроллерами.

Соединяя контроллеры в сеть и используя различные шины передачи данных в автомобилях, можно значительно снизить количество и вес проводов. Поскольку требования к устройствам значительно отличаются, используются различные оптимизированные по стоимости шины. Например, управление двигателем производится в реальном времени, поэтому следует выбрать высокоскоростную шину. Для регулировки зеркала заднего вида или регулировки положения сидений подойдет более медленная шина. На **Рис. 3.87** представлены различные используемые в автомобилях шины передачи данных с основными параметрами.

Различают высокоскоростные, низкоскоростные и LIN-шины. Кроме того, для аудиосистем используются сверхбыстрые шины.

Для того чтобы соединить микроконтроллер с другими устройствами, используют трансиверы (приёмопередающие устройства). Эти ИС служат буфером между чувствительным микроконтроллером и «суровым внешним миром» и должны иметь достаточно мощные выходные каскады, чтобы управлять шиной. Для передачи данных в основном используется неэкранированная витая пара. Помехи минимальны при использовании разнополярных сигналов в двух жилах витой пары. Поэтому к выходным каскадам трансиверов предъявляются строгие требования по симметрии сигналов. Поскольку в автомобилях возникают сильные электромагнитные поля, помехоустойчивость входов и выходов трансивера также является важным параметром. Соответственно, сложно обеспечить надёжную работу трансиверов от разных производителей в одной сети. Для того чтобы гарантировать их совместимость, были разработаны соответствующие тесты. Результаты измерений нескольких высокоскоростных трансиверов представлены на **Рис. 3.88**.

Из рисунка ясно видно, что наилучшие результаты показывает трансивер TLE 6250. Это происходит благодаря наличию специального выходного каскада с хорошей симметрией фронтов импульсов и НИЗКИХ и ВЫСОКИХ уровней сигнала. Рассмотрим основные функциональные блоки трансивера на примере блок-схемы TLE 6250, представленной на **Рис. 3.89**.

Шина CAN подключается слева (выводы CANH и CANL). Микроконтроллер переда-

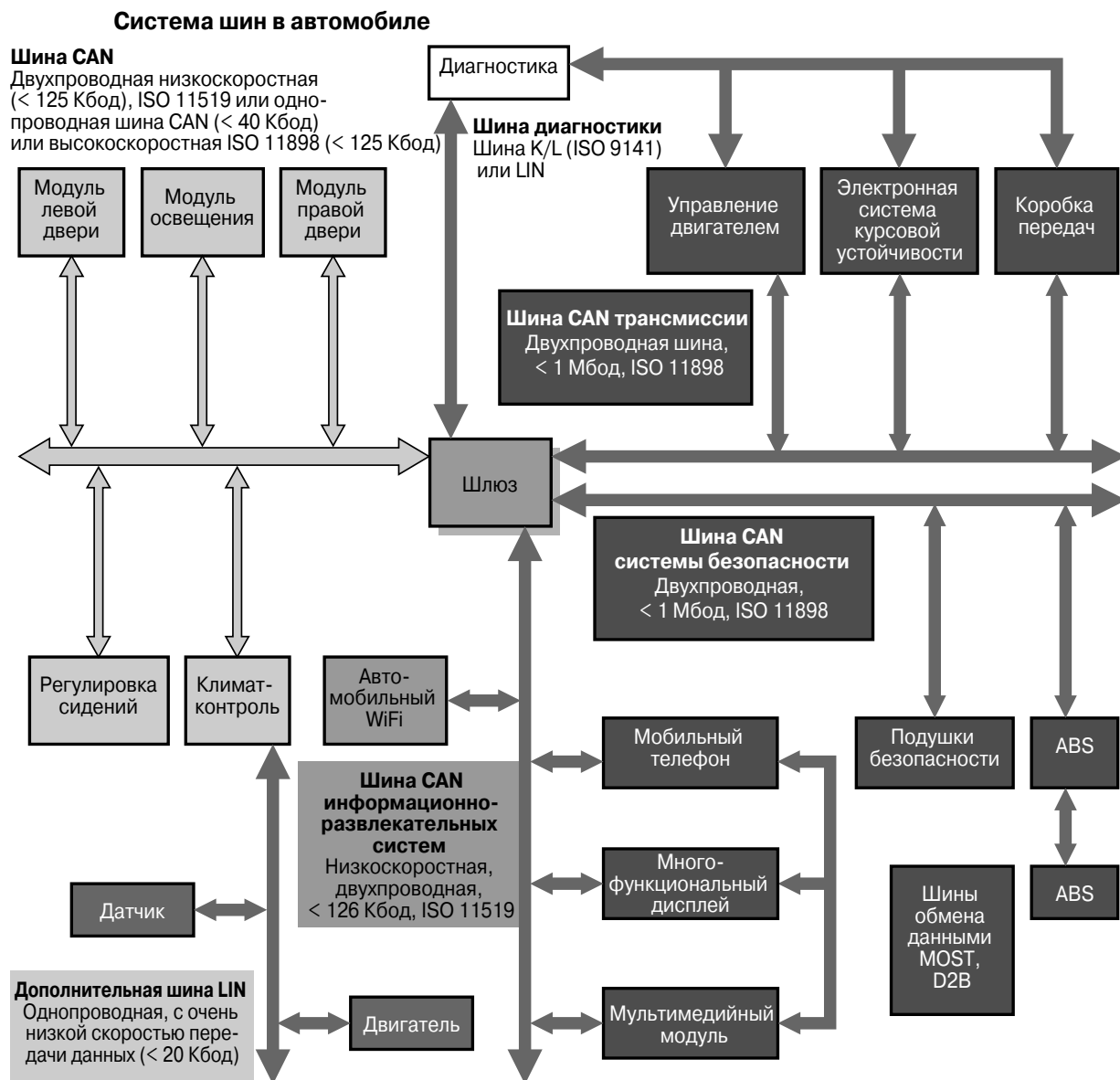


Рис. 3.87. Обзор шин передачи данных в автомобиле.

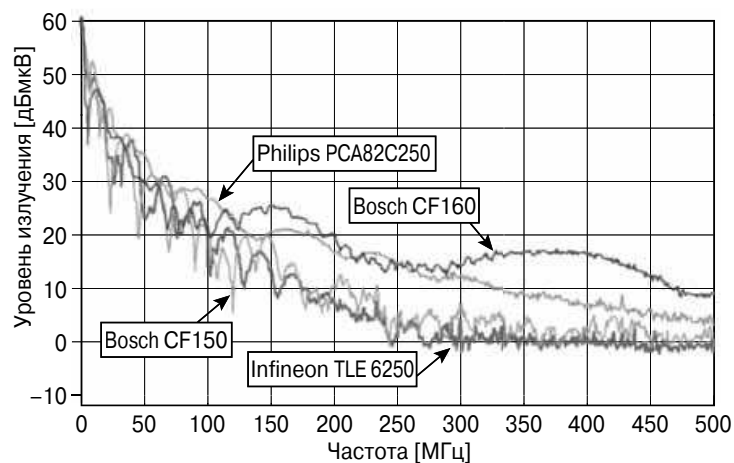


Рис. 3.88. Уровень помех, излучаемых различными высокоскоростными трансиверами.

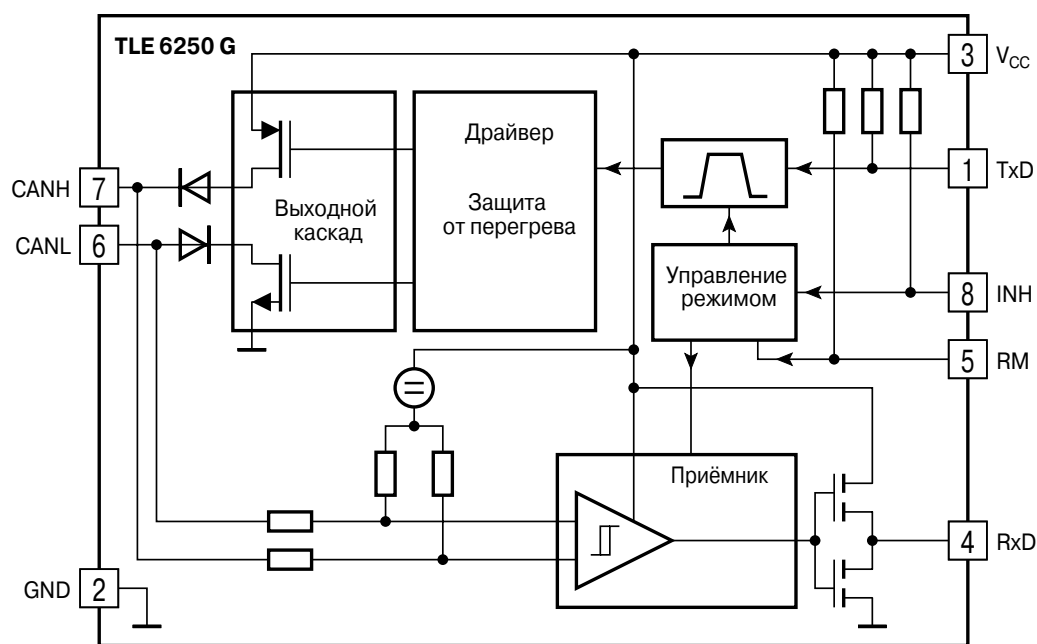


Рис. 3.89. Блок-схема TLE 6250.

ёт данные на шину через логический вход передатчика, TxD, и далее через выходной каскад. Данные, получаемые по шине CAN, считываются приёмником (нижний блок на Рис. 3.89), преобразуются в ассиметричные (относительно вывода GND) сигналы логического уровня и поступают на выход приёмника, RxD.

Компания Infineon разработала и выпустила полный ассортимент CAN-трансиверов. На Рис. 3.90 изображено дерево выбора нужного CAN-трансивера.

Как и стабилизаторы напряжения, CAN-трансиверы используются во многих устройствах, поэтому идея совмещения этих устройств в одном корпусе является

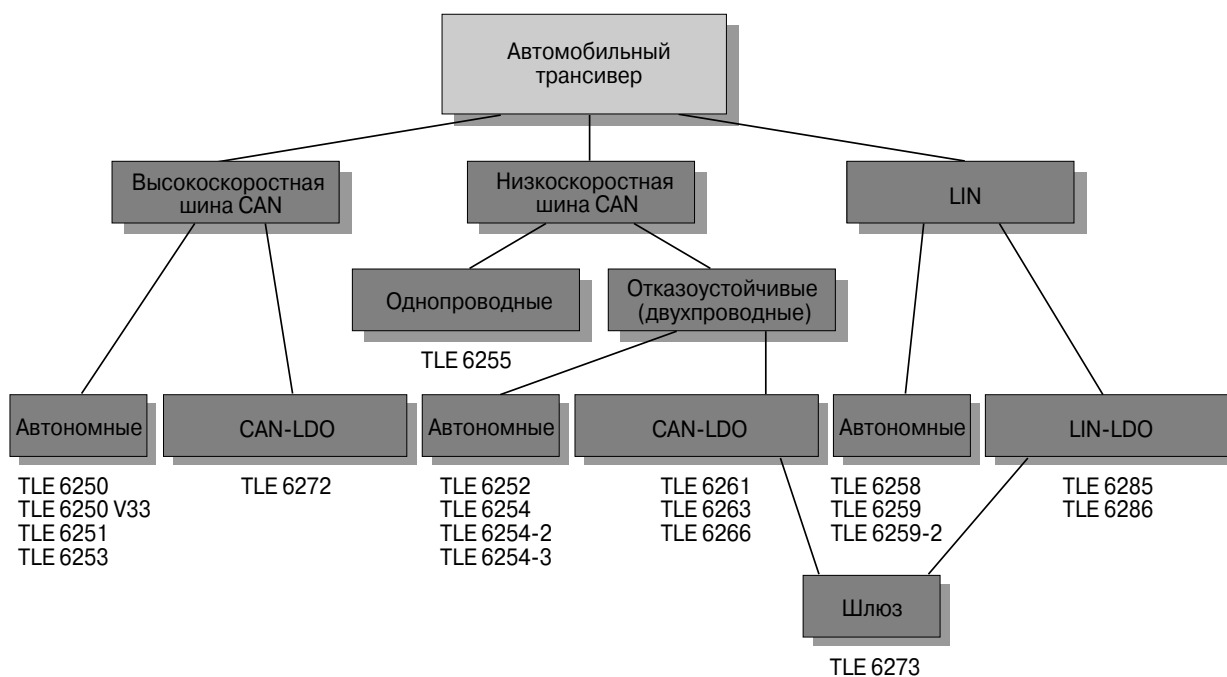


Рис. 3.90. CAN-трансиверы.

очевидной. В компании Infineon данная идея была последовательно реализована для всех трёх типов трансиверов. В каждом случае на втором уровне есть ветвь, позволяющая выбрать между собственно трансивером и CAN-LDO.

Как видно из названия, CAN-LDO содержит не только стандартный CAN-трансивер, но и стабилизатор с низким падением напряжения (LDO), который может использоваться для различных целей.

Например, ИС TLE 6266 была разработана для низкоскоростных помехозащищённых шин. Её блок-схема и основные параметры представлены на **Рис. 3.91**.

ИС CAN-LDO второго поколения будут использоваться, например, в следующем поколении дверных модулей. Их отличительной особенностью является сверхнизкий ток потребления в спящем режиме.

Первое поколение ИС (TLE 6263) уже многие годы используется в серийно производимых дверных модулях (см. **Рис. 3.92**).

ИС TLE 6263 — стандарт для подобных устройств. Вид печатной платы снизу показывает, что элементы установлены на плате только с одной стороны, что помогает снизить затраты. Следующее поколение дверных модулей, помимо TLE 6266, будет включать в себя также многофункциональный мост TLE 7201R, рассмотренный ранее.

ИС TLE 6272, предназначенная для высокоскоростных шин CAN, изготавливается по технологии «кристалл рядом с кристаллом» (chip-by-chip). Кристалл стабилизатора напряжения, изготовленный по традиционной биполярной технологии, совмещается в стандартном корпусе SO-14 с кристаллом трансивера, изготовленным по новейшей технологии SPT. Поскольку кристаллы соединены с выводной рамкой, являющейся кристаллодержателем, только через вывод GND, то ИС имеет очень высокую помехозащищённость, а совместимость с отдельной ИС CAN обеспечивается использованием одного и того же кристалла трансивера. Блок-схема и основные характеристики TLE 6272 представлены на **Рис. 3.93**.

Для устройств, использующих однопроводную шину LIN, была разработана LIN-LDO микросхема TLE 6285. Как и высокоскоростные CAN-модули, она изготовлена по технологии «кристалл рядом с кристаллом» и отличается тем, что имеет сверхниз-

кий ток покоя, так как в ней используется современный стабилизатор напряжения TLE 4299.

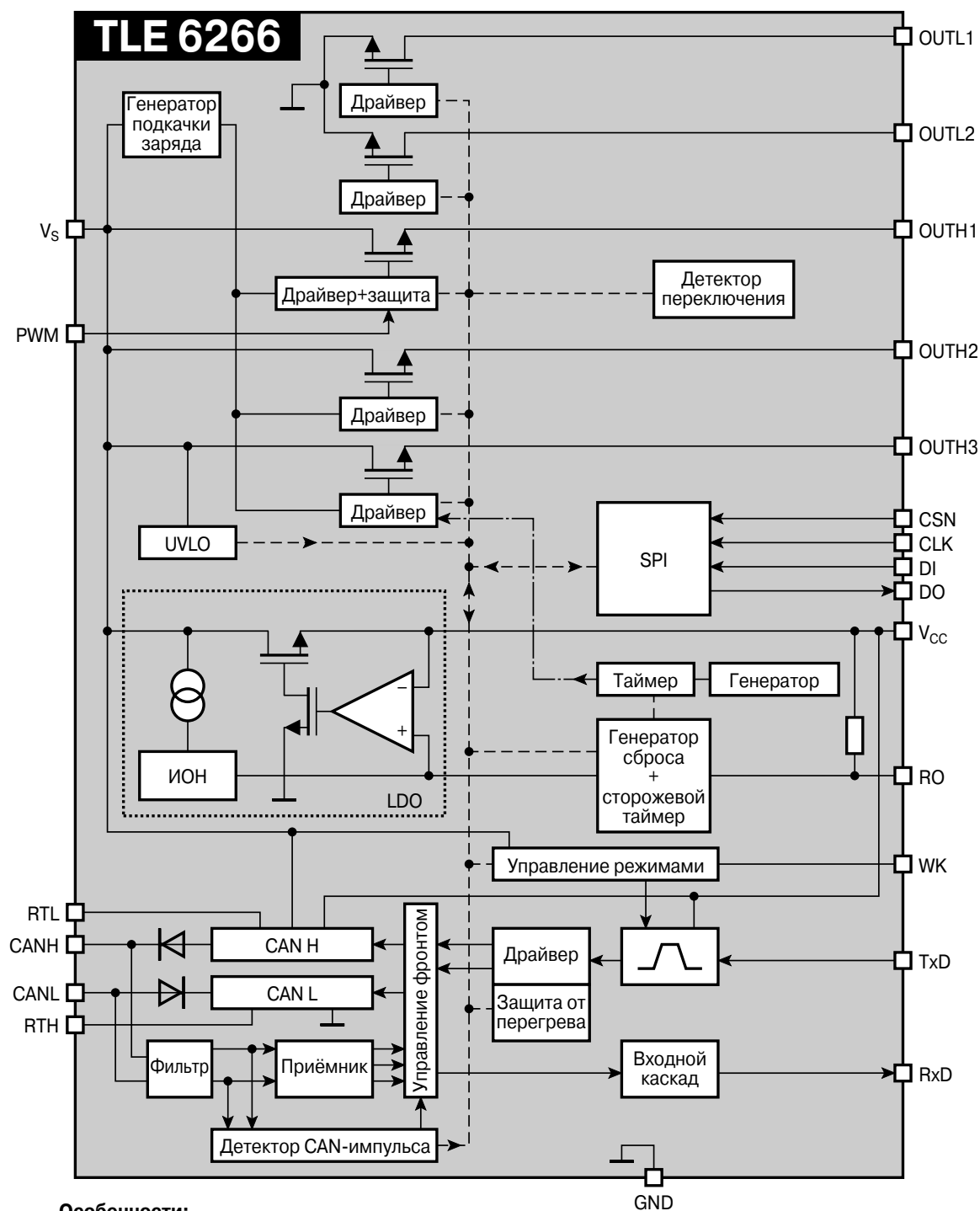
3.6.7. ИС интеллектуальных систем питания

В ближайшем будущем системные интегральные ИС в виде специализированных интеллектуальных силовых ИС выйдут на лидирующие позиции рынка. Например, в дверном модуле автомобиля уже осуществляется интеграция функций источника питания и передачи данных, выполняемых CAN-LDO микросхемой TLE6266 и многофункциональной мостовой ИС TLE7201. В электронном блоке управления можно выделить следующие функциональные блоки: питания, обмена данными, вычислений (+ память), обработки сигналов и исполнительные устройства. На **Рис. 3.21** эти блоки имеют различную окраску в зависимости от типа: цифровой, аналоговый или силовой. Как показано на этом рисунке, разбиение на блоки может быть оптимизировано с использованием ноу-хау как пользователя, так и производителя полупроводниковых приборов. На **Рис. 3.94** представлены различные варианты разбиения (с различным уровнем интеграции).

ИС систем питания применяются в системах, входящих в состав автомобильной электроники уже достаточно долгое время. Одно из наиболее важных применений — контроллер подушек безопасности. На сегодняшний день почти в каждом автомобиле имеются четыре или более подушки безопасности, устанавливаемые в автомобиль серийно. На **Рис. 3.95** представлен полный набор ИС, производимых компанией Infineon для этих целей и пользующийся большим успехом на рынке.

Он состоит из датчиков, микроконтроллера, стабилизаторов напряжения, шинных трансиверов и драйверов поджига пиропатрона. В разработке находится следующее поколение данного набора микросхем, демонстрирующее лидерство компании Infineon на рынке автомобильной электроники.

Другими системами, в которых в больших количествах используются системные ИС, являются антиблокировочная система тормозов (ABS) и электронная система курсовой устойчивости (ESP). Здесь компания Infineon также демонстрирует широкий

**Особенности:**

- Низкоскоростной CAN-трансивер
- Только режим приёма RxD
- Встроенный LDO (50 мА)
- Малый ток потребления
- 16-битный последовательный интерфейс
- Схема сброса
- Сторожовой таймер
- Система раннего предупреждения
- 3 верхних и 2 нижних ключа
- Вход для вывода из «спящего» режима
- Отказоустойчивость
- Корпус P-DSO-28

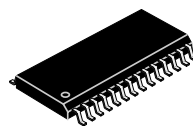
TLE 6266

Рис. 3.91. Низкоскоростная CAN-LDO микросхема TLE 6266 для применения в кузовной электронике.

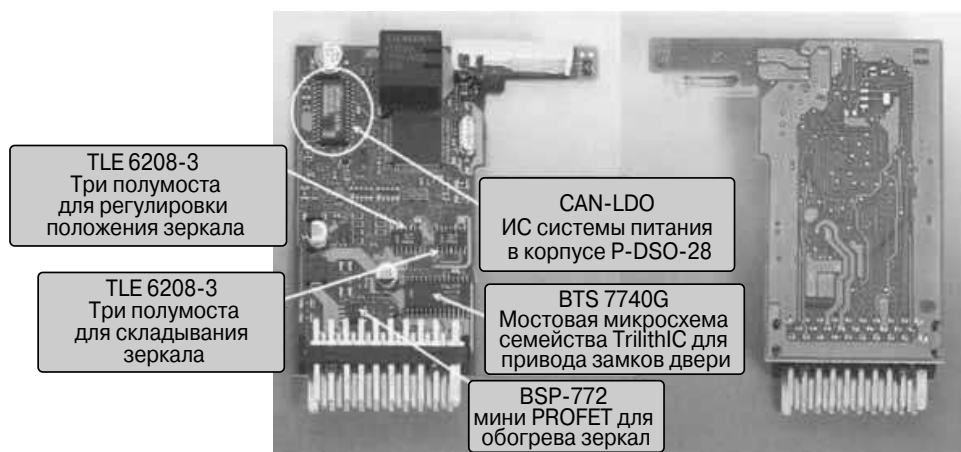
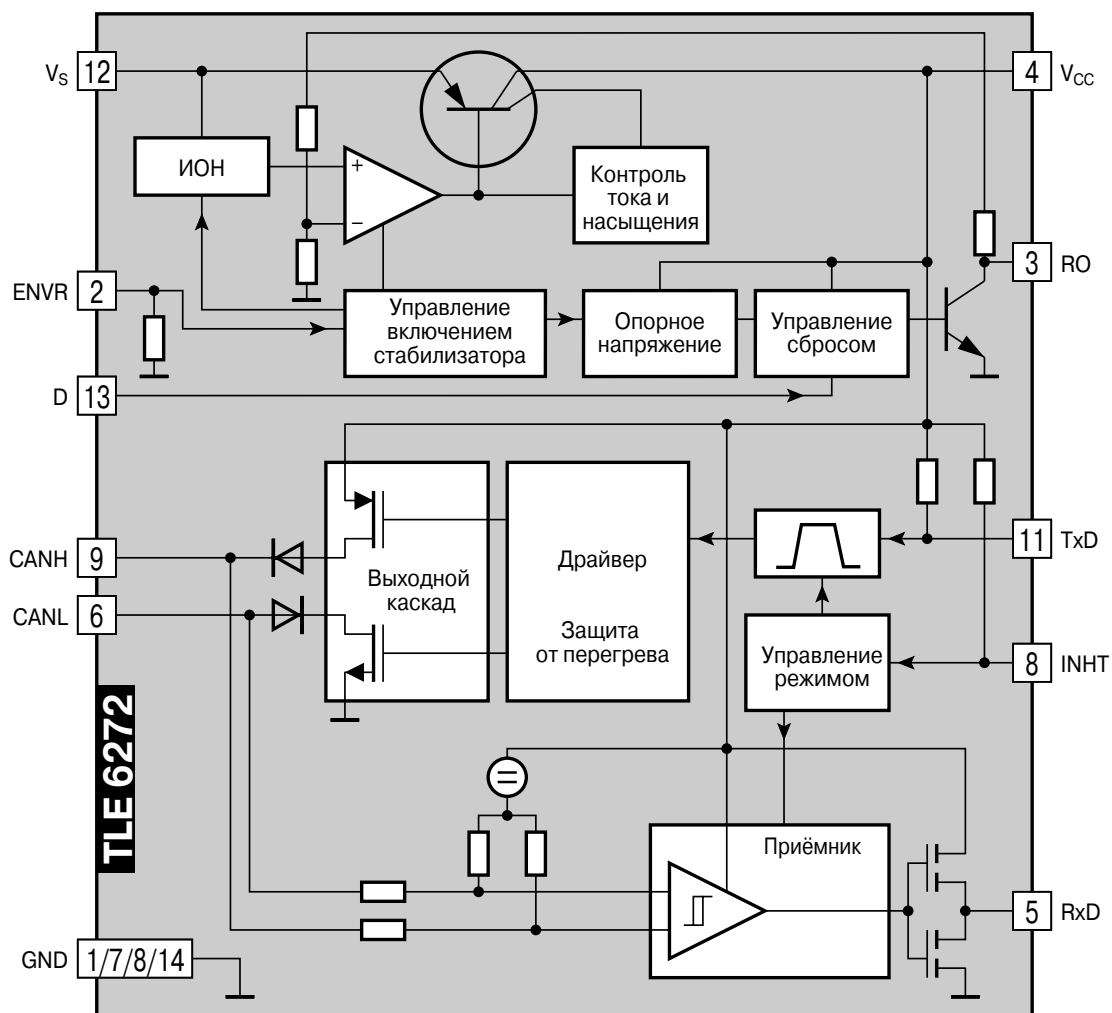


Рис. 3.92. Первое поколение CAN-LDO микросхем Infineon — важная часть набора ИС для дверных модулей.



Особенности:

- Высокоскоростной CAN-интерфейс
- Только режим RxD
- Встроенный LDO (150 мА)
- Малый потребляемый ток
- Вход блокировки LDO
- Регулируемая задержка сброса
- Выход сброса
- Корпус P-DSO14

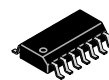


Рис. 3.93. TLE 6272 — высокоскоростная ИС CAN-LDO, изготовленная по технологии «кристалл рядом с кристаллом».



Рис. 3.94. Профессионально проведённое пользователем и изготовителем полупроводниковых приборов разбиение на функциональные блоки является необходимым условием разработки оптимальных наборов ИС.

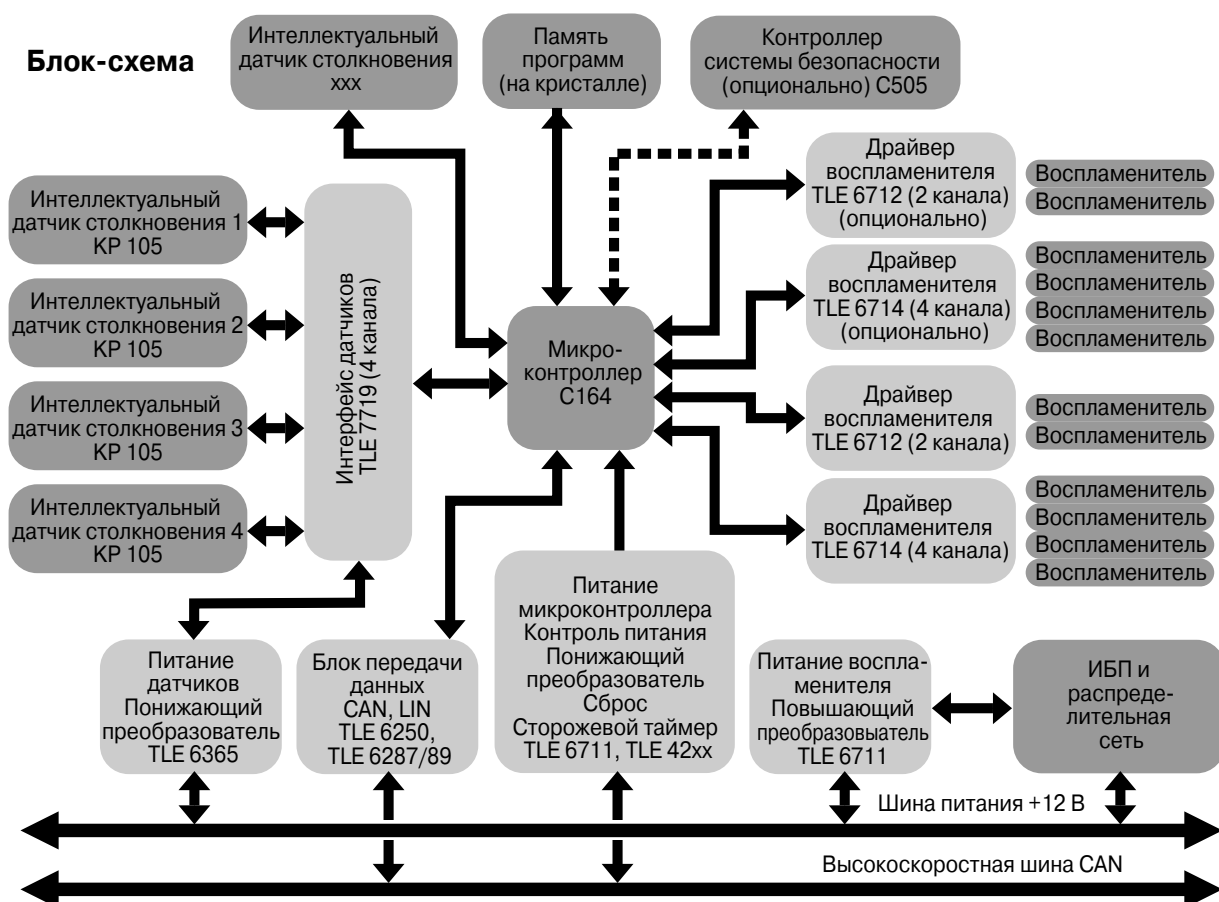


Рис. 3.95. Компания Infineon разработала полный набор ИС для автомобильных систем безопасности.

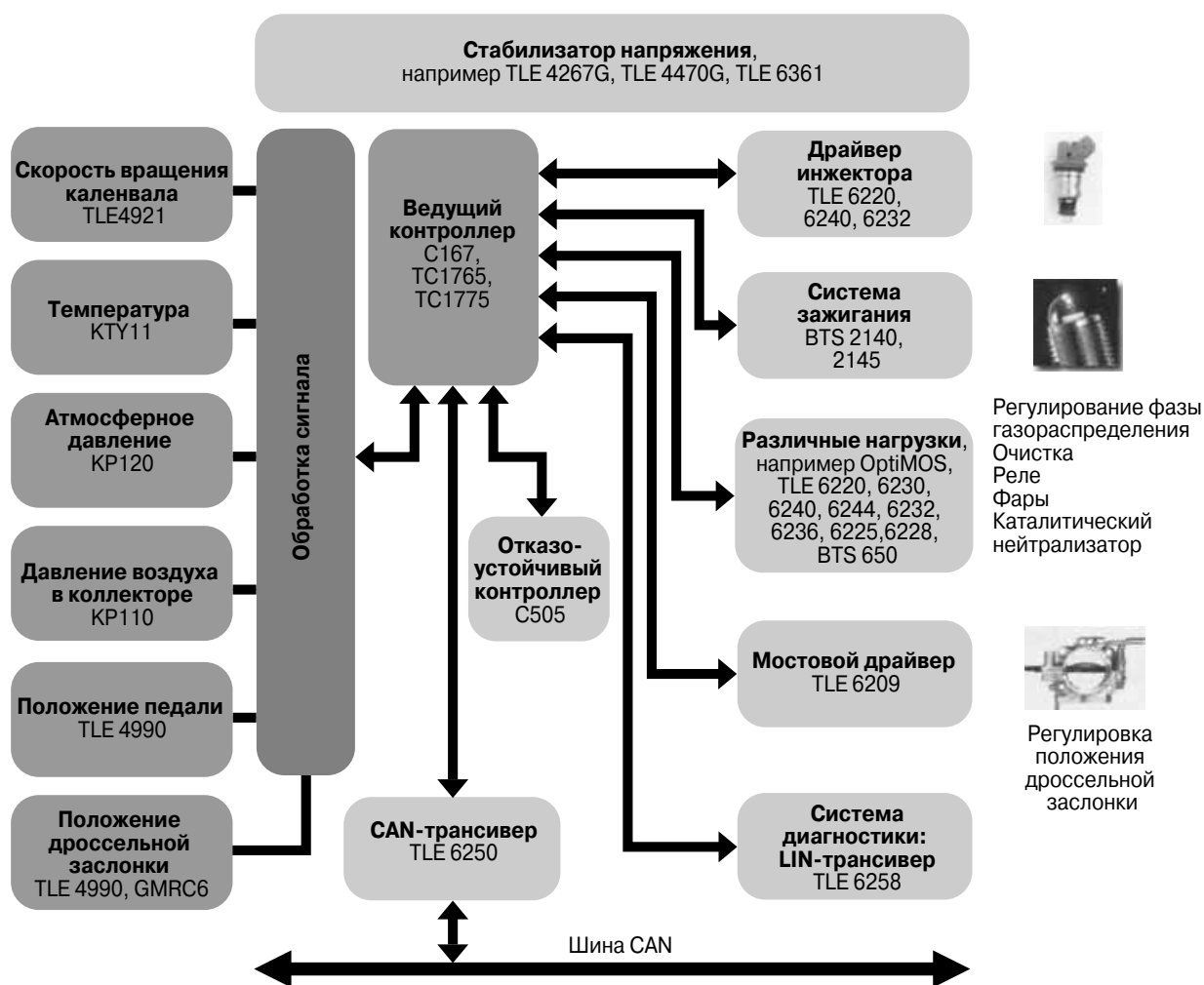


Рис. 3.96. ИС компании Infineon обеспечивают выполнение всех необходимых функций в системе управления двигателем и трансмиссии.

спектр выпускаемых компонентов. Функции питания, передачи данных и преобразования сигналов уже интегрированы с использованием технологии L-chip. Следующим шагом будет интеграция контроллера системы безопасности и/или драйверов (выходных каскадов). Однако из-за ухудшения гибкости системы и из-за концентрации больших тепловых потерь в одном устройстве этот шаг ещё требует тщательного анализа, главным образом, с точки зрения его экономической целесообразности.

Компания Infineon также может предложить полный набор ИС для систем управления двигателем (**Рис. 3.96**). Вокруг микроконтроллера TC1765 или TC1775 расположен ряд силовых ИС, управляющих исполнительными устройствами, блоками напряжения питания и передачи данных.

До нынешнего момента в данных системах микроконтроллеры с высокой степе-

ню интеграции не использовались, поскольку требуемая вычислительная мощность, т.е. сложность, полностью исключала это. Однако для небольших простых устройств такая возможность требует более подробного рассмотрения. Примером подобных встроенных силовых устройств может служить привод электродвигателя (см. «электронный мускул» в подразделе 3.4.5). Блок-схема наиболее важного представителя данной группы устройств, привода бесщёточного электродвигателя постоянного тока, представлена на **Рис. 3.97**. Этот трёхфазный привод бесщёточного электродвигателя постоянного тока заменит традиционный двигатель постоянного тока и множество гидравлических и механических решений в мехатронных устройствах.

Привод с электронным управлением теперь может применяться во множестве устройств. Как альтернатива ремённым приво-

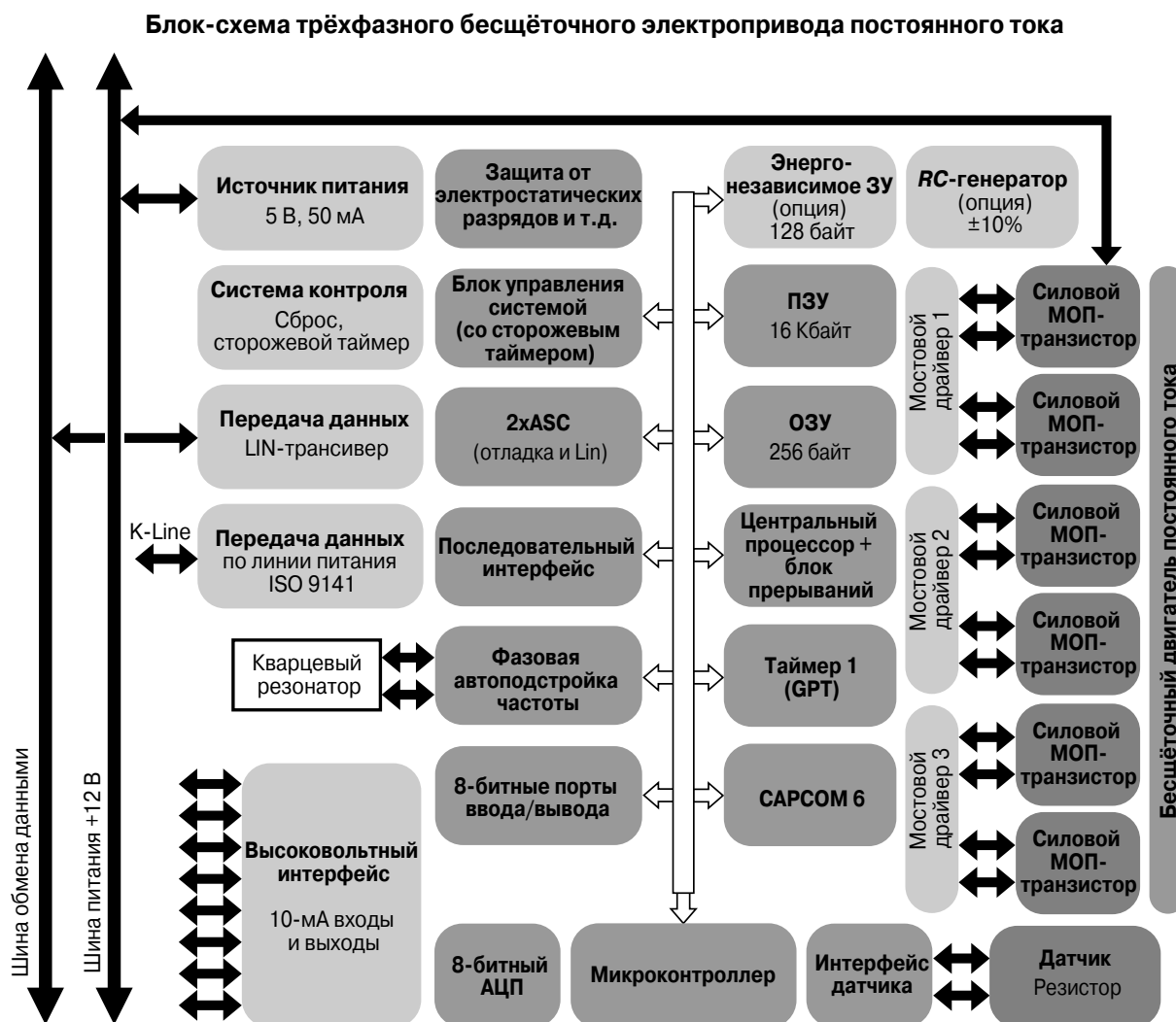


Рис. 3.97. Блок-схема бесщёточного электропривода постоянного тока.

дам и блокам с гидроприводом, он чаще является более дешёвым и почти во всех случаях снижает расход топлива. Сочетая повышенную надёжность и более низкий уровень помех (искрение в щёточно-коллекторном узле является сильным источником помех), не требующие обслуживания бесщёточные приводы постоянного тока будут вытеснять более тяжелые и менее надёжные стандартные двигатели постоянного тока. Заметим, что снижение веса на 100 кг позволяет снизить потребление топлива в обычном автомобиле на 0.3 л на 100 км.

ИС может быть как монолитной, так и двухкристальной или даже состоять из нескольких кристаллов. При этом силовые МОП-транзисторы никогда не устанавливаются в ту же микросхему, а выделяются в специальные модули, как было описано в подразделе 3.6.1.

Интересным вариантом является совмещение высоковольтного кристалла, изготовленного по SPT-технологии, с КМОП-кристаллом высокой степени интеграции. Оба кристалла устанавливаются в одном корпусе. Для этого компания Infineon разработала технологию SOLID, при которой кристаллы электрически соединяются друг с другом без использования соединительных проводов.

Из-за всё большего использования электроники в автомобилях потребность в электроэнергии в течение следующих нескольких лет резко возрастет. На Рис. 3.98 представлена диаграмма изменения мощности и максимального тока генераторов автомобилей среднего класса за последние несколько лет.

Однако при использовании традиционного 14-вольтового источника питания каждый киловатт мощности увеличивает

Изменение требований к параметрам генераторов

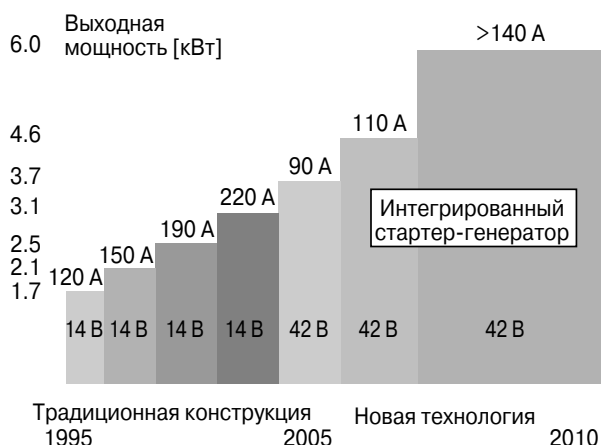


Рис. 3.98. Диаграмма роста энергопотребления в автомобиле.

потребление топлива на 100 км пути на 1.5 л. Если увеличить напряжение генератора до 42 В, то повышение расхода топлива на киловатт мощности может быть уменьшено на 0.3 л — до 1.2 л на 100 км. По этой причине количество используемых электронных приборов значительно увеличится. С применением более мощных генераторов в автомобилях открываются возможности использования новых систем, например электронного клапанного механизма, электроусилителя рулевого управления, электромагнитной тормозной системы или даже электростатических экранов или систем обогрева салона. Для новых, а также для широко распространённых на сегодняшний день устройств, необходимо будет переработать все интеллектуальные силовые ИС с 14 В на 42 В. Компания Infineon является первым в мире производителем полупроводниковых приборов, который это осуществил и, начиная с конца 2002 года, разработал и предоставил для использования необходимые интеллектуальные силовые технологии изготовления ИС и первый полный комплект приборов (см. Рис. 3.99).

Данные ИС полностью охватывают традиционные области применения, такие как кузовная электроника, трансмиссия и система безопасности. Кроме того, они могут использоваться и в новой области — в «электронных мускулах». Справа на рисунке показаны группы приборов, требуемые для указанных областей, с входящими в них ИС и их основными параметрами. Более подробную информацию об этом, а также о всех областях применения можно найти в главе 9.

3.6.8. Тенденции развития автомобильной электроники

В автомобильной электронике силовые полупроводниковые приборы необходимы практически в любой области, где требуются нововведения. С одной стороны, они должны обеспечивать сокращение расходов, а с другой — улучшать характеристики автомобилей. Несомненно, в ближайшем будущем одним из наиболее важных параметров станет эффективность использования топлива. И силовые полупроводниковые приборы могут внести значительный вклад в повышение указанной эффективности.

Мировой рынок автомобильной электроники



Рис. 3.100. Диаграмма развития рынка автомобильной электроники в 2001—2006 годах

Если взглянуть на развитие мирового рынка автомобильной электроники (см. Рис. 3.100), то его рост составляет 9 и более процентов в год (CAGR — совокупный среднегодовой темп роста).

Наиболее важной в настоящее время остаётся область систем безопасности, её ежегодный рост, составляющий 9.1%, является наибольшим. Если рассматривать только силовую электронику без учёта микроконтроллеров, ИС обработки сигналов и датчиков, тогда темпы развития рынка будут значительно выше. А внедрение, начиная с 2006 года, бортового напряжения автомобилей 42 В приведёт к дальнейшему росту объёмов продаж полупроводниковых приборов, поскольку реализация большинства устройств возможна только при использовании напряжения питания 42 В.



Рис. 3.99. Интеллектуальные силовые технологии и устройства, разработанные для бортового напряжения 42 В.

Как говорилось ранее при описании микросхем интеллектуальных систем питания, автомобиль всё больше становится сетью с распределённым управлением. Некоторые из современных контроллеров соединяются только при помощи CAN или аналогичных ей сетей. В ближайшем будущем автомобиль станет «нейронной сетью» на колесах. Контроллеры будут обмениваться данными любого типа почти на любой требуемой скорости, и вычислительная мощность сможет использоваться оптимальным образом.

Конечно же, это обязательно отразится на процессах разработки, проводимых производителями полупроводниковых приборов. В ближайшем будущем они перестанут разрабатывать только специализированные стандартные микросхемы (ASSP), а в большей мере перейдут на разработку систем. Множество примеров системных наборов ИС (чипсетов) было приведено в подразделе 3.6.7. Тенденция показывает появление второго измерения: интеграция аппаратных средств против интеграции устройств, например системы контроля давления в шинах (TPMS).

Заглядывая немного дальше в будущее, можно увидеть третье измерение — интеграцию программного обеспечения. Это даёт нам пространство для разработки новых, важных устройств, например TCG (Telematics Communication Gateway — телематический шлюз).

3.7. Источники питания и устройства электропривода

Современный стиль жизни уже нельзя представить без устройств обеспечения и обработки данных, использующих электроэнергию и её источники. Многие современные устройства питаются либо непосредственно от электрической сети, либо от автомобильного генератора или используют аккумуляторы.

Электрические схемы в современных устройствах развлекательной электроники, устройствах обработки данных или промышленной электроники в большинстве случаев питаются постоянным напряжением в диапазоне от 1 до 12 В. Для того чтобы эти устройства могли работать от общей сети переменного тока, а также для зарядки встроенных аккумуляторов требуются блоки питания.

3.7.1. Типы импульсных источников питания

Традиционные блоки питания состоят из сетевого трансформатора для понижения напряжения и обеспечения гальванической развязки от питающей сети, выпрямителя для получения напряжения постоянного тока и конденсатора большой ёмкости для сглаживания напряжения (**Рис. 3.101**).

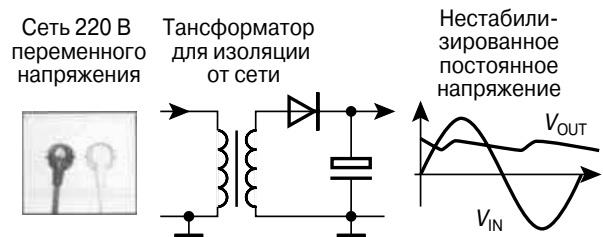


Рис. 3.101. Источник питания без стабилизации выходного напряжения.

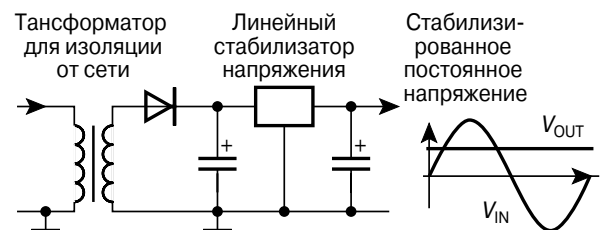


Рис. 3.102. Источник питания со стабилизацией выходного напряжения.

Стабилизированный источник тока или напряжения, выходные параметры которого не зависят от изменений входного напряжения и нагрузки, получается при введении схемы стабилизации. Схемы стабилизации обычно имеют значительные потери и требуют использования больших сетевых трансформаторов (**Рис. 3.102**). Это увеличивает общие потери и вызывает нагрев прибора. В общем итоге, это приводит к неудовлетворительным значениям КПД из-за того, что при возникновении перенапряжений на линии питания линейный стабилизатор напряжения должен рассеять полную разность мощностей.

Традиционные блоки питания всё больше вытесняются импульсными источниками питания (см. **Рис. 3.103**). Импульсные источники питания имеют следующие преимущества:

- меньшие габариты и вес благодаря использованию трансформаторов и конденсаторов меньших размеров;

Основные компоненты традиционного сетевого источника питания



Основные компоненты импульсного источника питания

Рис. 3.103. Компоненты импульсного источника питания имеют меньшую массу и габариты, чем компоненты традиционного источника питания такой же мощности.

- более высокий КПД и, как следствие, меньший нагрев;
- более низкие потери в дежурном режиме;
- возможность работы источника в широком диапазоне входных напряжений (85...245 В);
- наличие электронной защиты, например от короткого замыкания.

В век глобального рынка электронных приборов требуется как можно более широкий диапазон входного напряжения источников питания. Например, устройство, разработанное в Германии, может продаваться и работать в странах с напряжением сети переменного тока 110 В (включая США и Японию) или в Европе или Азии, где напряжение сети переменного тока составляет 220 В.

Все большее количество устройств, находясь в выключенном состоянии, теперь не отключаются от сети переменного тока выключателем электропитания (телевизоры, видеомagniетофоны, персональные компьютеры, зарядные устройства и т.д.). Вместо отключения от сети устройства переходят в дежурный режим, и, следовательно, потребляют незначительное количество энергии. Таким образом, к снижению потребляемой мощности в дежурном режиме предъявляются жёсткие требования, удовлетворение которых стало возможным при использовании импульсных источников питания.

Этому способствуют новые, более эффективные пассивные и активные компоненты.

Примером таких компонентов могут служить инновационные высоковольтные и низковольтные MOSFET (выполненные по технологиям CoolMOS™ и OptiMOS™), новые типы диодов и транзисторов на основе карбида кремния (ThinQ™) и специальные высокоинтегрированные ИС замкнутых и разомкнутых систем управления (CoolSET™).

Принцип действия импульсных источников питания

Импульсные источники питания работают по принципу прерывателей выпрямленного и отфильтрованного напряжения сети на частоте, значительно превышающей частоту сети переменного тока 50 Гц (**Рис. 3.104**).

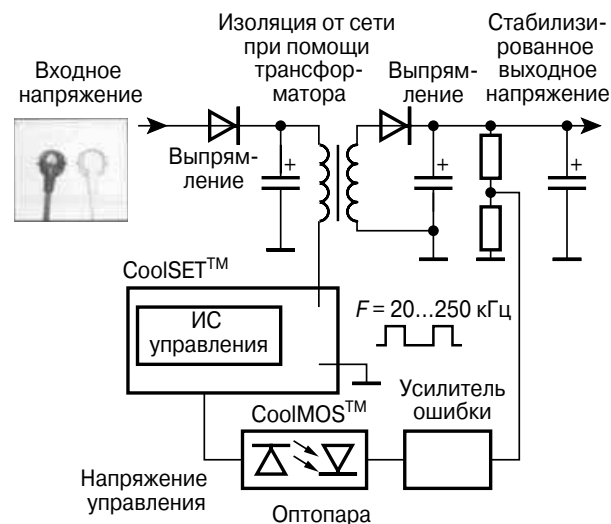


Рис. 3.104. Блок-схема импульсного источника питания.

При работе полупроводниковых компонентов в ключевом режиме присутствуют лишь потери на переключение и потери в открытом состоянии ключа, что является причиной характерного для импульсных источников питания более высокого КПД по сравнению с линейными схемами. Регулирование напряжения осуществляется посредством изменения коэффициента заполнения импульсов при постоянной частоте или изменением частоты при постоянном и переменном коэффициенте заполнения импульсов. Таким способом напряжение может быть преобразовано в напряжение любой другой требуемой формы с последующим выпрямлением.

Частота импульсов, которые могут иметь прямоугольную, трапецеидальную или иногда даже синусоидальную форму, лежит в диапазоне от одного килогерца до сотен килогерц. При таких высоких рабочих частотах могут применяться трансформаторы меньших размеров с ферритовыми сердечниками. Трансформаторы с ферритовыми сердечниками используются не только для того, чтобы осуществить требуемое преобразование напряжения и обеспечить гальваническую развязку от питающей сети, но также и для накопления электромагнитной энергии (в некоторых схемах).

В импульсных источниках питания работа в импульсном режиме приводит к появлению гармонических колебаний, которые могут создавать помехи для приёма радио и ТВ сигналов, а также для передачи данных. Существуют ограничения, устанавливающие максимальный уровень излучаемых помех для всех приборов и систем, генерирующих энергию на высокой частоте.

Импульсный источник питания, питающийся от сети переменного тока и вырабатывающий на выходе напряжение постоянного тока, также называется AC/DC-преобразователем. Если к его входу подключён источник постоянного тока (AC/DC-преобразователь или аккумуляторная батарея), то мы имеем дело с DC/DC-преобразователем, или импульсным стабилизатором. Если напряжение на выходе такого стабилизатора не выпрямлено, то это DC/AC-преобразователь, или инвертор. Если импульсный источник питания питается от сети

переменного тока и на его выходе не происходит выпрямления напряжения, то мы имеем AC/AC-преобразователь, или преобразователь переменного тока.

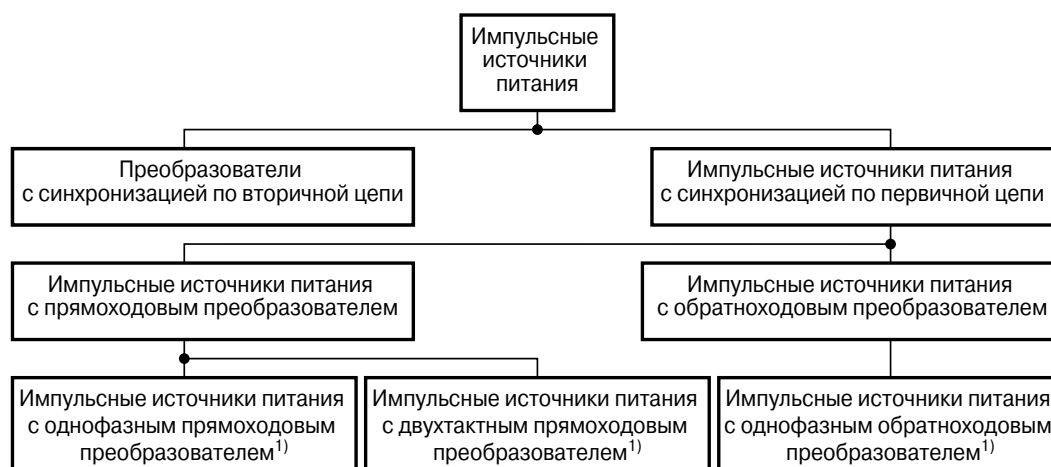
Основные области применения импульсных источников питания:

- Бытовая электроника: телевизоры, DVD-плееры, видеомэгагнитофоны, приставки к ТВ, приёмники спутникового сигнала, зарядные устройства и внутренние источники питания.
- Электронная обработка данных: персональные компьютеры, серверы, мониторы, ноутбуки.
- Системы связи: базовые станции мобильной связи, коммутационные станции, зарядные устройства для мобильных телефонов.
- Промышленная электроника: устройства автоматического управления, измерительное оборудование, дополнительные источники питания, зарядные устройства для аккумуляторных батарей и т.д.

3.7.2. Основные типы импульсных источников питания

Несомненно, принцип действия импульсного источника питания определяет его параметры и стоимость изготовления. В этом разделе будут рассмотрены основные схемы наиболее распространённых AC/DC-и DC/DC-преобразователей.

По принципу действия различают два основных типа преобразователей: прямоходовые и обратноходовые (Рис. 3.105).



¹⁾ С гальванической развязкой от сети или без неё.

Рис. 3.105. Основные типы импульсных источников питания.

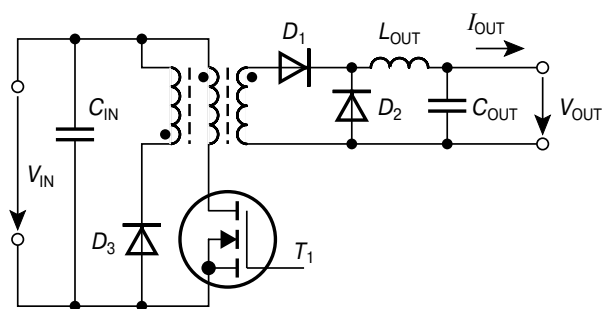
Название прямоходовой преобразователь объясняется временной диаграммой работы схемы, согласно которой передача энергии между первичной и вторичной цепью происходит во время разомкнутого состояния ключа (когда транзистор закрыт). На первичной стороне ток нагрузки накладывается на ток намагничивания. Поэтому должны создаваться условия для размагничивания сердечника трансформатора. В однофазном прямоходовом преобразователе размагничивание происходит во время проводящего состояния полупроводникового ключа. В двухтактных и мостовых схемах проводящее состояние ключей чередуется с небольшой паузой, когда оба ключевых транзистора закрыты.

В обратногоходовом преобразователе энергия накапливается в преобразователе во время проводящего состояния полупроводникового ключа, а затем, когда ключевой транзистор закрыт, передаётся во вторичную цепь.

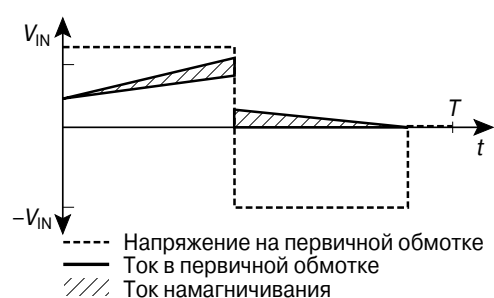
Прямоходовой преобразователь

На Рис. 3.106 показана схема однофазного прямоходового преобразователя.

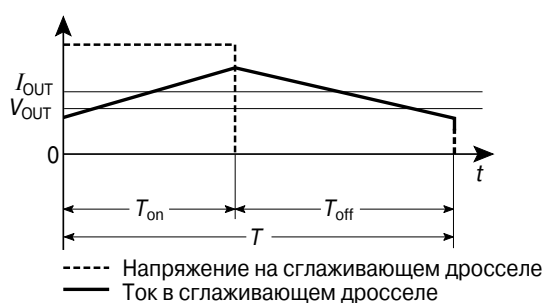
На входе преобразователя установлен сглаживающий конденсатор C_{IN} . Он сглаживает выпрямленное сетевое напряжение, позволяя использовать низкоиндуктивный источник импульсных токов, и поглощает ток намагничивания, возвращающийся от трансформатора. В трансформаторе прямоходового преобразователя для получения высокого коэффициента магнитной связи обмоток используется ферритовый сердечник без воздушного зазора. Первичная обмотка подключена к источнику входного напряжения через транзистор, работающий в ключевом режиме (CoolMOS™). Когда транзистор находится в проводящем состоянии, на вторичной обмотке появляется индуцированное напряжение прямоугольной формы с амплитудой, соответствующей коэффициенту трансформации, которое вызывает протекание тока во вторичной обмотке через выпрямительный диод D_1 и дроссель сглаживающего фильтра L_{OUT} на выходе преобразователя (на Рис. 3.106, б и в — в период времени T_{on}). Ток во вторичной обмотке наводит ток в первичной обмотке с соответствующим коэффициентом трансформации. К этому току, наведённо-



а)



б)



в)

Рис. 3.106. Однофазный прямоходовой преобразователь: а — схема; б и в — диаграммы токов и напряжений в установившемся режиме.

му в первичной обмотке, добавляется так называемый ток намагничивания.

Ток намагничивания должен затухать за время, пока транзистор закрыт. Это осуществляется при помощи размагничивающей обмотки, в качестве которой используется третья обмотка трансформатора. Она имеет то же количество витков, что и первичная обмотка, но изготавливается из проводника с меньшим поперечным сечением, поскольку, пока ключевой транзистор закрыт, по ней протекает только небольшой ток намагничивания. По сравнению с пер-

вичной и вторичной обмотками размагничивающая обмотка имеет обратную полярность, обозначенную на схеме точками в начале каждой обмотки. Размагничивающая обмотка подключается через диод D_3 к источнику входного напряжения. Во время проводящего состояния транзистора на размагничивающей обмотке наводится такое же напряжение, что и на первичной обмотке; таким образом, к диоду D_3 прикладывается обратное напряжение, равное удвоенному напряжению источника.

Пока транзистор закрыт, энергия, накопленная в сердечнике трансформатора в результате протекания намагничивающего тока, должна быть высвобождена, так чтобы ток намагничивания не нарастал до высоких значений, а ферритовый сердечник не входил в насыщение. Для этого во вторичной цепи установлен обратный диод D_2 , через который к дросселю L_{OUT} сглаживающего фильтра протекает ток, когда напряжение на вторичной обмотке падает до нуля или становится отрицательным. На это время диод D_1 отключает цепь протекания тока во вторичной цепи от трансформатора, что позволяет изменять полярность напряжения на обмотках.

Теперь ток намагничивания возвращается через диод D_3 и размагничивающую обмотку в сглаживающий входной конденсатор. В результате чего к транзистору в качестве блокирующего напряжения будет приложено удвоенное входное напряжение. Размагничивание сердечника трансформатора будет полным, если площадь под кривой напряжения первичной обмотки за время размагничивания, по крайней мере, будет равна соответствующей площади для проводящего состояния ключевого транзистора. Поэтому длительность открытого состояния ключевого транзистора однофазного прямоходового преобразователя не должна составлять более 50% от периода коммутации.

Сглаживающий дроссель L_{OUT} выходного фильтра генерирует постоянный поток энергии, связанный с током или напряжением, которое появляется на вторичной обмотке трансформатора в течение периода T_{on} , когда транзистор находится во включённом состоянии, и ограничивает скорость нарастания тока в трансформаторе. Сглаживающий конденсатор C_{OUT} , установленный на выходе схемы, сглаживает

пульсации тока дросселя и выполняет функции накопителя энергии при изменении нагрузки. Передаточная характеристика прямоходового преобразователя описывается следующей формулой:

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{T_{on}}{T},$$

где n_1 — количество витков в первичной обмотке,

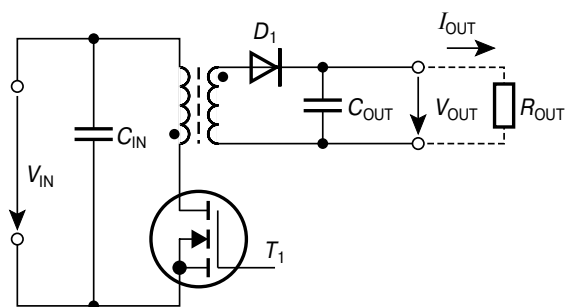
n_2 — количество витков во вторичной обмотке.

Обратноходовой преобразователь

Эти преобразователи также имеют конденсатор C_{IN} на входе, сглаживающий выпрямленное сетевое напряжение и позволяющий использовать источник импульсных токов с малой индуктивностью. В отличие от однофазного прямоходового преобразователя, в данном преобразователе ток намагничивания не возвращается обратно во входной конденсатор, а переходит в сглаживающий выходной конденсатор C_{OUT} (Рис. 3.107).

В простейшем виде обратноходовой преобразователь имеет две обмотки с противоположной полярностью. Когда транзистор T_1 (CoolMOS™) находится во включённом состоянии, напряжение между анодом и катодом диода D_1 имеет отрицательную полярность, т.е. ток во вторичной обмотке трансформатора отсутствует. Ток намагничивания протекает по первичной обмотке. В обратноходовом преобразователе используется ферритовый сердечник с воздушным зазором, в результате чего в обмотках трансформатора протекают значительно большие индуктивные токи, создающие магнитное поле в воздушном зазоре. Кроме того, когда ключ замкнут, в трансформаторе обратноходового преобразователя накапливается энергия (преимущественно в воздушном зазоре).

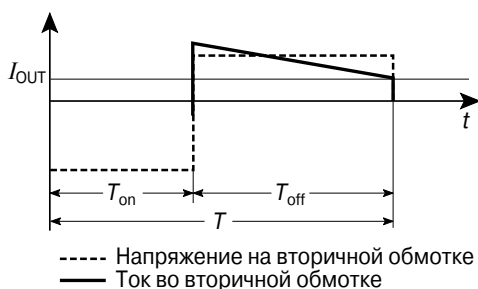
Когда транзистор закрыт, к обмоткам приложено обратное напряжение. Напряжение на вторичной обмотке возрастает до тех пор, пока выпрямительный диод D_1 не перейдёт в проводящее состояние, т.е. до значения выходного напряжения V_{OUT} . Поскольку магнитный поток в трансформаторе постоянно изменяется, то, начиная с момента отключения транзистора, во вторичной обмотке будет протекать ток, соот-



а)



б)



в)

Рис. 3.107. Обратногоходовой преобразователь: а — схема; б и в — диаграммы токов и напряжений при трапецеидальной форме тока в обмотках трансформатора.

ветствующий току первичной обмотки, преобразованному с коэффициентом трансформации. По этой причине диод D_1 должен проводить ток напрямую к конденсатору C_{OUT} , который может принимать большие токи.

Когда транзистор закрыт, приложенное к нему блокирующее напряжение будет равно сумме входного и выходного напряжения, преобразованного в соответствии с коэффициентом трансформации. Обычно

оно немного превышает удвоенное входное напряжение. Рассмотрим отличия процессов в обратныхходовых преобразователях с трапецеидальной и пилообразной формой тока в трансформаторе. При трапецеидальном токе (см. **Рис. 3.107, б и в**) повторное включение транзистора происходит в момент времени, предшествующий спадающему току во вторичной обмотке до нуля. Важной характеристикой данного режима работы является то, что максимальные значения тока здесь значительно меньше, чем при работе с пилообразным током.

Передаточная характеристика преобразователя при работе с трапецеидальным током выражается следующей формулой:

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{T_{on}}{T} \cdot \frac{1}{1 - \frac{T_{on}}{T}}.$$

Из данного выражения видно, что выходное напряжение V_{OUT} изменяется при изменении коэффициента заполнения импульсов T_{on}/T . Однако соотношение между выходным напряжением и коэффициентом заполнения импульсов является не линейным, а гиперболическим. Это означает, что выходное напряжение стремится к бесконечности, если коэффициент заполнения импульсов приближается к 1. По этой причине обратногоходовой преобразователь не должен работать без нагрузки или с разомкнутой петлей обратной связи, поскольку выходное напряжение, а вместе с ним и блокирующее напряжение, приложенное к транзистору, могут достичь больших значений.

Импульсные источники питания с несколькими выходными напряжениями

У импульсных источников питания, имеющих несколько выходов, одно из выходных напряжений должно быть выбрано в качестве контролируемого параметра, и, как следствие, это напряжение будет стабилизироваться лучше всего (см. **Рис. 3.108**, напряжение V_{OUT1}).

Стабилизация остальных напряжений будет менее точной. Поэтому может потребоваться дополнительная стабилизация при помощи линейного стабилизатора (напряжение V_{OUT3}) или вторичного импульсного стабилизатора (напряжение V_{OUT4}).

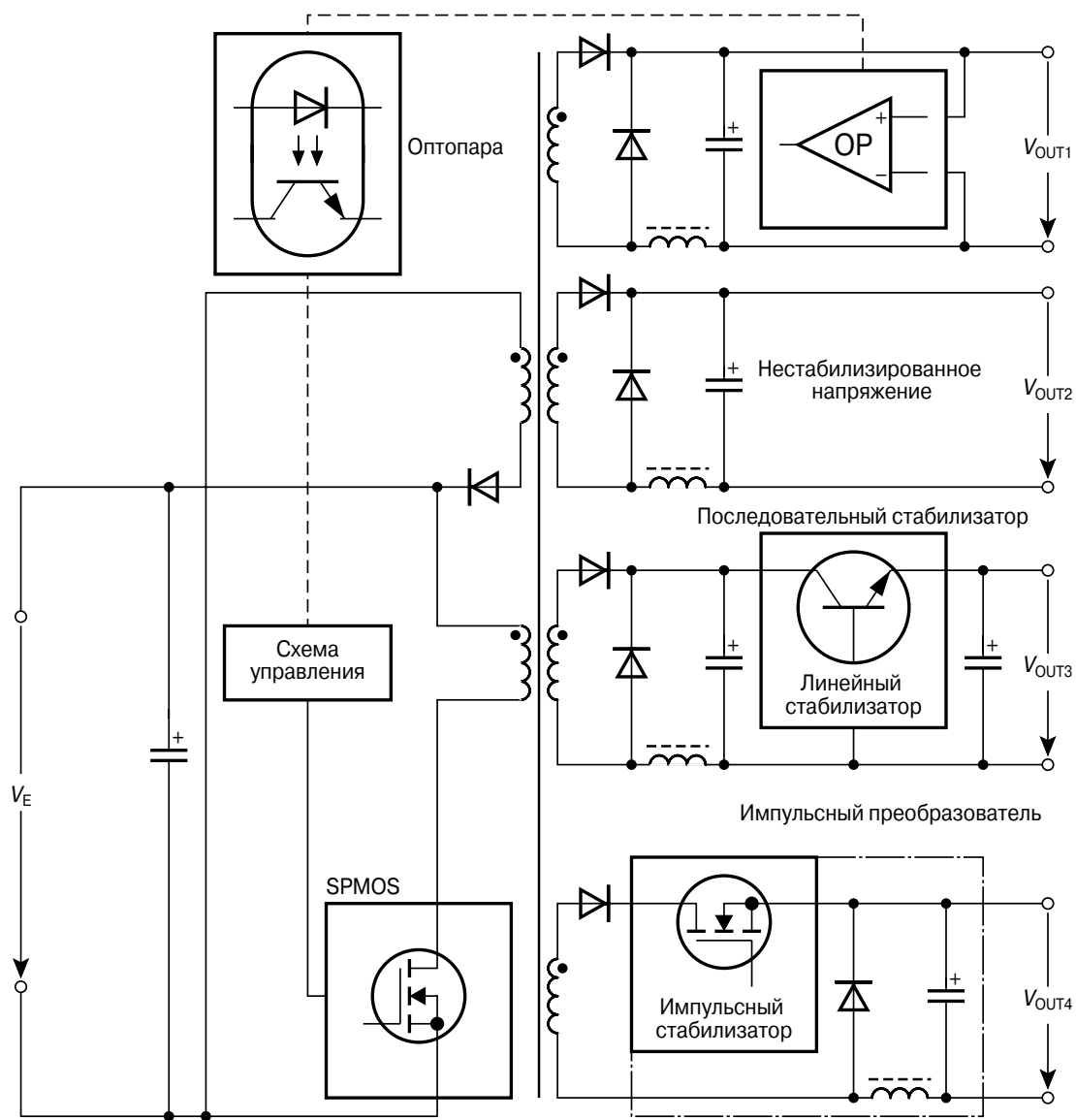


Рис. 3.108. Однофазный прямоходовой преобразователь с несколькими различными стабилизируемыми выходными напряжениями.

3.7.3. Критерий выбора импульсного источника питания

Табл. 3.5 позволяет сравнить прямоходовой и обратногоходовой преобразователи, в Табл. 3.6 приведены уровни мощности, на

которые рассчитаны различные типы преобразователей. В Табл. 3.7 и Табл. 3.8 приведены схемы, временные диаграммы токов и напряжений, а также преимущества и недостатки различных типов прямоходовых и обратногоходовых преобразователей.

Таблица 3.5. Сравнение прямоходового и обратногоходового преобразователей

	Прямоходовой преобразователь	Обратногоходовой преобразователь
Количество требуемых компонентов	Больше	Меньше
Сглаживающий дроссель и обратный диод	Требуется	Не применимы
Тип сердечника трансформатора	Без воздушного зазора	С воздушным зазором
Магнитная связь во время переключения	Лучше	Хуже
Перенапряжения при переключении	Меньше	Больше
Чувствительность к воздействию электромагнитных полей	Меньше	Больше
Отношение амплитуды тока к току нагрузки	Значительно меньше	Существенно больше
Импульсные токи в компонентах схемы	Меньше	Больше
Подавление помех и сглаживание входных и выходных сигналов в зависимости от типов помех	Легко реализуемое	Более дорогое
Регулирование потока энергии производится при помощи изменения коэффициента заполнения импульсов посредством	изменения интеграла напряжение/время	запасания различных долей энергии
Создание нескольких точно регулируемых вторичных напряжений постоянного тока путём добавления дополнительных вторичных цепей	Возможно в ограниченном количестве (ток дросселя должен быть непрерывным)	Возможно с лёгкостью
Динамика регулирования выходных сигналов	Низкая (из-за наличия сглаживающего дросселя)	Высокая

Таблица 3.6. Диапазоны мощностей различных типов преобразователей

Мощность [Вт]	≤ 100	100 ... 300	300 ... 1000	1000 ... 3000	≥ 3000
Однофазный обратногоходовой преобразователь	•	•			
Однофазный прямоходовой преобразователь	•	•			
Полумостовой преобразователь		•	•		
Мостовой преобразователь		•	•	•	•
Двухтактный преобразователь		•	•	•	•

Таблица 3.7. Варианты обратноходового преобразователя

№	Принципиальная схема	Тип	Преимущества
1		Обратно-ходовой преобразователь	• Можно одновременно получить несколько выходных напряжений • Большой диапазон регулировки рабочего напряжения (плавное изменение коэффициента трансформации)
2		Понижающий преобразователь	• Номинальное напряжение SIPMOS $V_{DS} = V_{IN}$ • Простой дроссель • Нет сложностей с магнитной связью • Низкие перенапряжения на выходном конденсаторе • Можно получить коэффициент заполнения импульсов 100%
3		Повышающий преобразователь	• Простой дроссель • Нет сложностей с магнитной связью
4		Повышающе-понижающий преобразователь	• Простой дроссель • Нет сложностей с магнитной связью
5		Обратно-ходовой преобразователь	Повышающе-понижающий преобразователь с гальванической развязкой входной и выходной цепи, аналогичный обратноходовому преобразователю на рисунке, приведенном выше

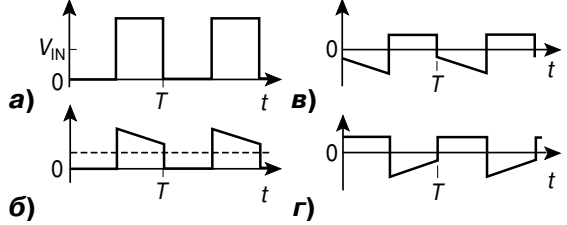
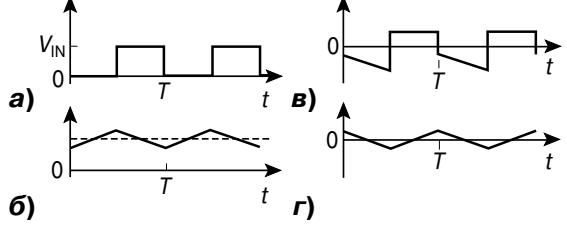
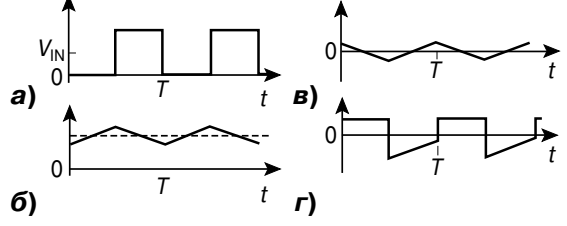
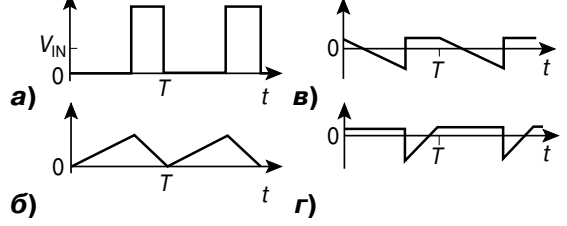
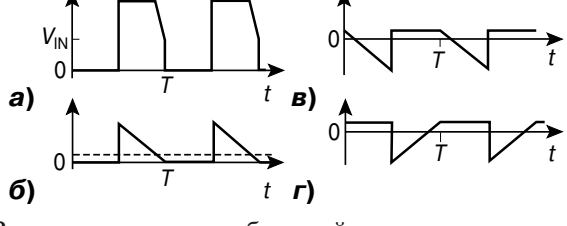
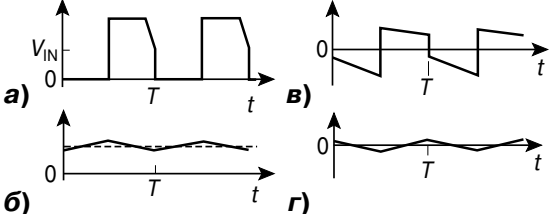
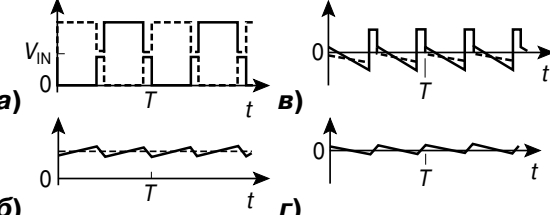
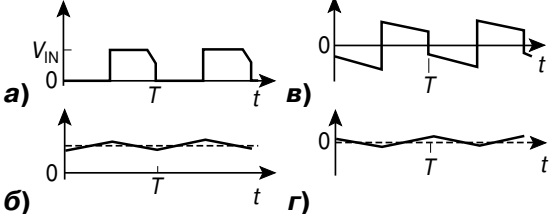
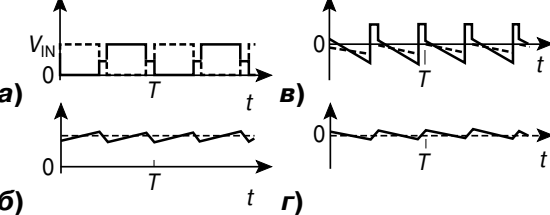
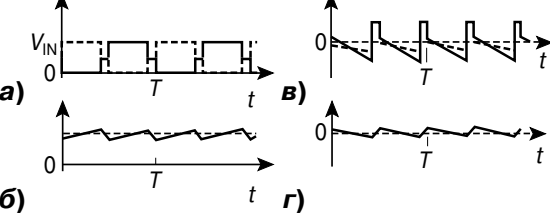
Недостатки	Коэф-т заполн. имп., T_{on}/T	а) Диаграмма напряжения на транзисторе б) Диаграмма тока во втор. обмотке или в дросселе в) Диаграмма тока во входном конденсаторе г) Диаграмма тока в выходном конденсаторе
• Обычно блокирующее напряжение силового транзистора $V_{DS} > 2V_{IN}$ • Высокие перенапряжения на выходном конденсаторе и диоде • Требуется организация хорошей магнитной связи • Требуется сердечник с большим поперечным сечением и воздушным зазором • Сложности, связанные с сильным электромагнитным излучением и вихревыми токами	0.5	 В зависимости от требований используется с трапециoidalной формой тока в транзисторе или первичной обмотке
• Нет гальванической развязки между входом и выходом • Устройство управления не подключается к земле	0.5	
• Блокирующее напряжение силового транзистора $V_{DS} = V_{OUT} > V_{IN}$ • Нет гальванической развязки между входом и выходом • Средние перенапряжения на выходном конденсаторе	0.67	
• Блокирующее напряжение силового транзистора $V_{DS} = V_{IN} + V_{AOUT}$ • Нет гальванической развязки между входом и выходом • Высокие перенапряжения на выходном конденсаторе • Устройство управления не подключается к земле • Выходное напряжение имеет обратную полярность по отношению к входному	0.5	
	0.5	 В зависимости от требований используется с треугольной формой тока в транзисторе или первичной обмотке

Таблица 3.8. Варианты прямоходового преобразователя

№	Принципиальная схема	Тип	Преимущества
1		Однофазный прямоходовой преобразователь Однотранзисторный прямоходовой преобразователь	• Не возникает трудностей с размагничиванием сердечника • Низкая стоимость
2		Двухтактный прямоходовой преобразователь с двусторонним выпрямителем Двухтактный преобразователь	• Оба транзистора управляются одним и тем же потенциалом
3		Ассиметричный полумостовой прямоходовой преобразователь Двухтранзисторный прямоходовой преобразователь	• Блокирующее напряжение $V_{DS} = V_{IN}$ • Не возникает трудностей с размагничиванием сердечника • Трансформатор может иметь высокую индуктивность рассеяния
4		Симметричный полумостовой прямоходовой преобразователь Несимметричный двухтактный преобразователь	• Блокирующее напряжение $V_{DS} = V_{IN}$ • Трансформатор может иметь высокую индуктивность рассеяния
5		Мостовой преобразователь	• Не возникает трудностей с размагничиванием сердечника • Низкая стоимость

Недостатки	Коэф-т заполн. имп., T_{on}/T	а) Диаграмма напряжения на транзисторе б) Диаграмма тока во втор. обмотке или в дросселе в) Диаграмма тока во входном конденсаторе г) Диаграмма тока в выходном конденсаторе
• Блокирующее напряжение силового транзистора $V_{DS} > 2V_E$ • Требуется размагничивающая обмотка • Требуется организация хорошей магнитной связи между первичной и размагничивающей обмотками	0.5	
• Блокирующее напряжение силового транзистора $V_{DS} > 2V_E$ • Сложности с получением симметричности работы ключей • Требуется организация хорошей магнитной связи между двумя первичными обмотками • Опасность одновременного включения обоих транзисторов	0.42(2x)	
• Требуется драйвер с гальванической развязкой	0.5	
• Сложности с симметричной работой • Опасность одновременного включения транзисторов одного полумоста • Требуется драйвер с гальванической развязкой	0.5	
• Сложности с симметричной работой • Опасность одновременного включения транзисторов одного полумоста • Требуется драйвер с гальванической развязкой	0.42(2x)	

3.7.4. ИС для импульсных источников питания

Как и EPCOS, ведущий производитель пассивных компонентов, компания Infineon предлагает большое разнообразие полупроводниковых приборов для импульсных источников питания. Кроме технической документации, на сайте производителя в Интернет (<http://www.infineon.com>) можно найти множество информации о применении и различное программное обеспечение. Также там представлены PSPICE-модели дискретных силовых компонентов и некоторых ИС.

С точки зрения надёжности, качества, характеристик и цены, ИС с их современными методами коммутации, высокой сложностью и компактными размерами намного превосходят решения на дискретных компонентах. Кроме того, они позволяют упростить конструкцию импульсных источников питания. Снижается стоимость разработки, и даже малые объёмы производства становятся рентабельными.

В зависимости от конкретного применения и типа преобразователя существуют различные ИС драйверов импульсных источников питания.

Микросхемы несинхронизированных драйверов

Микросхемы TDA4605-3, TDA16846 и ICE1QS01 идеально подходят для импульсных источников питания с квазирезонансным обратногоходовым преобразователем.

При данной топологии обеспечивается включение транзистора (CoolMOS™) при минимальном резонансном напряжении, которое приложено к его стоку в закрытом состоянии (см. **Рис. 3.109**), что снижает потери при переключении и уменьшает высокочастотные помехи.

Рабочая частота схемы зависит от нагрузки, что приводит к расширению спектра помех.

Микросхема имеет множество встроенных функций защиты и может управляться с помощью оптопары в цепи обратной связи по выходному напряжению или, если требования по стабилизации напряжения более низкие, используется связь по входному напряжению. В частности, ICE1QS01 имеет чрезвычайно эффективную схему

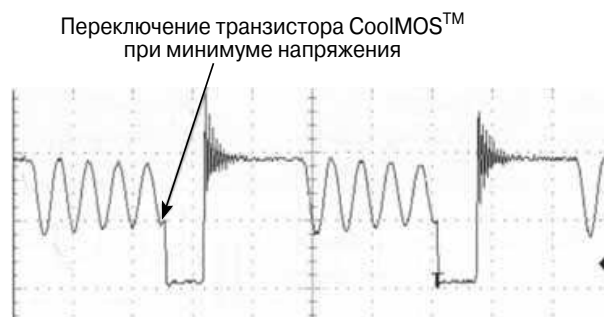


Рис. 3.109. Включение транзистора CoolMOS™ при минимуме напряжения.

(пакетный режим) для минимизации потребляемого тока в дежурном режиме.

Эти приборы идеально подходят для устройств бытовой электроники (**Рис. 3.110**), а также для стандартных источников питания мощностью до 300 Вт.

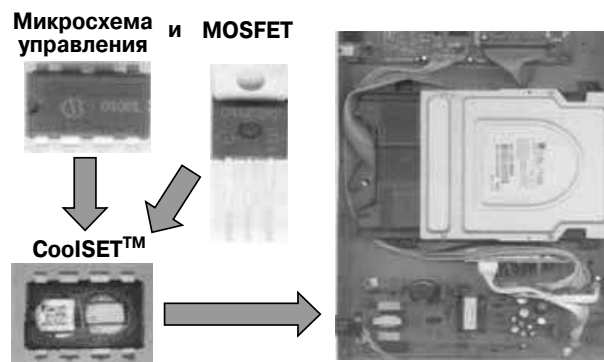


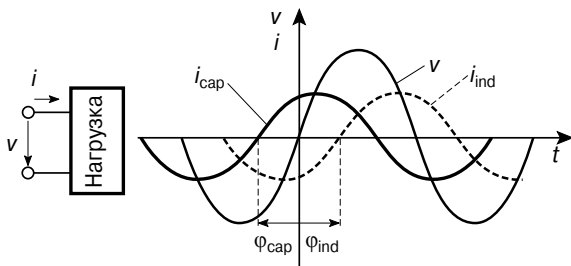
Рис. 3.110. Микросхема CoolSET™ в DVD-проигрывателе.

Микросхемы драйверов, работающие на постоянной частоте

Микросхемы драйверов, работающие на постоянной частоте переключения (ICE2A(B)S01, ICE3DS01, TDA16850 и TDA16888), подходят для использования в зарядных устройствах, AC/DC-адаптерах (ЖК-мониторы, принтеры и т.д.), мониторах, маломощной бытовой электронике, а также в блоках питания персональных компьютеров и в промышленной электронике. Они лучше всего подходят для обратногоходовых преобразователей, но TDA16888 может применяться и в прямоходовых преобразователях. В них оптимизированы функции защиты. Даже ICE2A(B)S01 имеет превосходные параметры по энергопотреблению в дежурном режиме. ICE3DS01 в

3.7.5. Коэффициент мощности

Коэффициент мощности (Power Factor — PF) представляет собой отношение активной мощности к полной; он может принимать значения от 0 до 1. Следовательно, коэффициент мощности определяется как косинус разности фаз между синусоидальным напряжением и соответствующим током, т.е. если система состоит только из линейных нагрузок, то $PF = \cos(\varphi_{UI})$. При чисто активной нагрузке, такой как лампы накаливания или батареи отопления, ток и напряжение находятся в одной фазе, и, следовательно, коэффициент мощности равен 1. При индуктивной (например, асинхронный двигатель) или ёмкостной нагрузке появляется сдвиг фаз между током и напряжением, и коэффициент мощности будет меньше 1 (Рис. 3.112).



$\varphi < 0$ — ёмкостная нагрузка, $\varphi > 0$ — индуктивная нагрузка

Рис. 3.112. Синусоидальный переменный ток при индуктивной и ёмкостной нагрузке.

Однако источник питания с входным выпрямителем и сглаживающим конденсатором (Рис. 3.113) является нелинейной нагрузкой. Ток I_{IN} протекает, когда входное напряжение больше, чем напряжение на сглаживающем конденсаторе, т.е. носит импульсный характер и находится в фазе с входным напряжением.

Конечно же, протекающий ток почти совпадает по фазе с входным напряжением, но в его спектре, помимо основной гармоники, присутствуют гармоники с частотами, кратными основной частоте. Эти искажения синусоидального тока характеризуются полным коэффициентом гармоник (Total Harmonic Distortion — THD):

$$THD = \sqrt{\frac{I_{RMS}^2 - I_{1RMS}^2}{I_{1RMS}^2}},$$

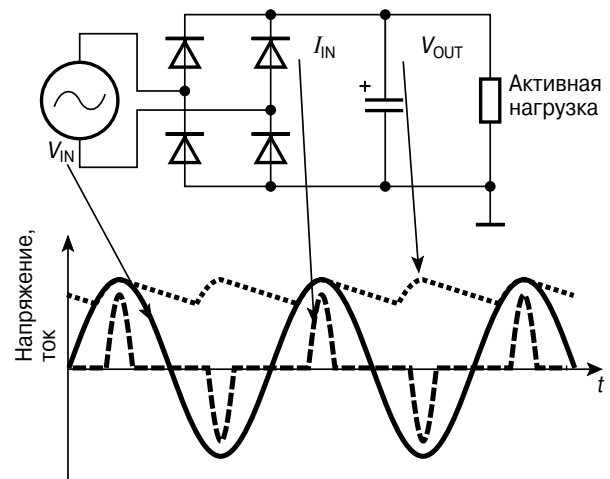


Рис. 3.113. Ток и напряжение на входе типового источника питания.

где I_{1RMS} — действующее значение основной гармоники тока,
 I_{RMS} — действующее значение полного тока.

Для синусоидального тока $THD = 0$. Чем больше искажение синусоидальной формы, тем больше THD .

Тогда, с учётом нелинейности, коэффициент мощности (PF) определяется следующим образом:

$$PF = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1+THD^2}} = \frac{I_{1RMS} \cdot \cos(\varphi_1)}{I_{RMS}},$$

где φ_1 — фазовый сдвиг между входным напряжением и основной гармоникой тока.

Из этого выражения видно, что при сильном искажении тока коэффициент мощности будет меньше 1. Характерные значения коэффициента мощности для импульсных источников питания находятся в диапазоне от 0.6 до 0.7.

На практике высокие значения THD — это значительные переходные токи, протекающие в электропроводке, что требует использования проводов с большим сечением.

В общем случае, низкий коэффициент мощности означает, что электростанции должны вырабатывать значительную реактивную мощность, которая практически не используется в нагрузке. В результате электростанции не могут работать в оптимальном режиме, что приводит к дополнительной нагрузке на окружающую среду.

Решением данной проблемы являются схемы коррекции коэффициента мощности

(ККМ), которые в идеале позволяют сделать коэффициент мощности практически равным 1.

В 2001 году был введен стандарт EN-61000-3-2 (IEC 1000-3-2) об ограничении уровней гармонических составляющих тока в сети электропитания. В соответствии с ним такие устройства, как телевизоры, мониторы и персональные компьютеры с энергопотреблением свыше 75 Вт должны удовлетворять определенным требованиям по ограничению содержания высших гармоник. Под данный стандарт также подпадают все люминесцентные лампы. Похожий стандарт введен и в Японии, тогда как в США нормы по коэффициенту мощности введены только для люминесцентных ламп.

Принципы построения ККМ

Пассивные ККМ являются наиболее простым и дешевым решением. В общем случае они имеют установленный перед входным диодом источника питания дроссель с железным сердечником соответствующего размера. Используя такие ККМ, можно получить значения коэффициента мощности до 0.9 и амплитуды высших гармоник, лежащие в пределах заданных значений (см. **Рис. 3.114**).

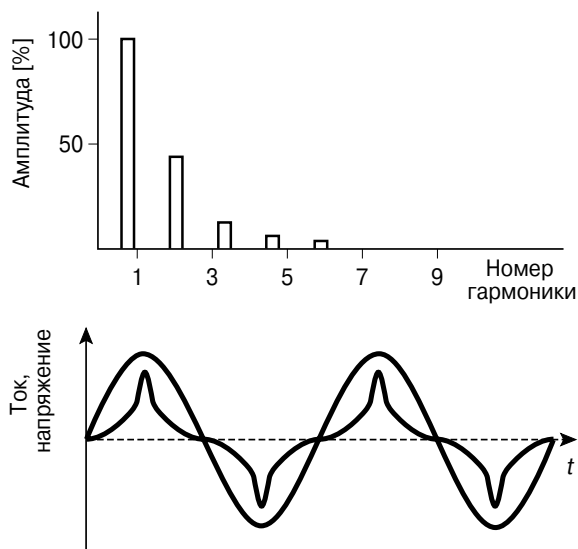


Рис. 3.114. Уровни гармоник (сверху) и формы тока и напряжения при коррекции коэффициента мощности с помощью дросселя.

Недостатками данного решения являются большой вес и размер дросселя ККМ, в то время как диапазон мощностей находится ниже 200 Вт.

Подобное качество можно получить, используя так называемую схему подкачки заряда, которую можно реализовать с помощью выпускаемых компанией Infineon микросхем импульсных источников питания TDA16846 или ICE1QS01 (см. **Рис. 3.115**).

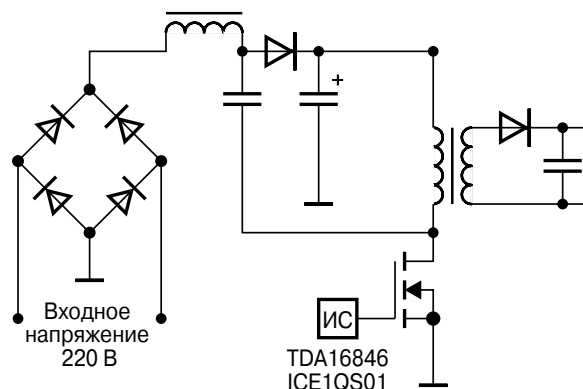


Рис. 3.115. ККМ на основе схемы подкачки заряда.

Дроссель устанавливается после выпрямителя, и его параметры определяются рабочей частотой импульсного источника питания, поэтому может использоваться дроссель с магнитным сердечником, имеющий значительно меньшие размеры, чем дроссель с железным сердечником. Максимальная мощность находится в пределах 250 Вт. Следовательно, это решение отлично подходит для устройств, которые должны удовлетворять стандарту, но для которых оптимальное значение коэффициента мощности не является решающим. Дополнительная масса и размеры малы. Типичными устройствами для применения таких ККМ являются источники питания в телевизорах или адаптерах.

Активные ККМ позволяют получить значения коэффициента мощности, близкие к 1. По сравнению с пассивными ККМ, в этих устройствах оптимальная коррекция коэффициента мощности и снижение содержания гармонических составляющих осуществляются с более высокой эффективностью, в более широком диапазоне входных напряжений и нагрузок. По отношению к питающей сети схема представляет омическую нагрузку. Масса и габариты схожи с массой и габаритами схемы с подкачкой заряда, что гораздо предпочтительнее, чем при использовании устройств с железным сердечником. Активные схемы ККМ

устанавливаются перед импульсными источниками питания. В основном, в них используются три следующих типа преобразователей: повышающий, обратногоходовой и повышающий/понижающий. Данные типы уже рассматривались при обзоре схем импульсных источников питания (см. Табл. 3.7 и Табл. 3.8). Однако наиболее распространённой является схема повышающего преобразователя (Рис. 3.116), преобразующего синусоидальное входное напряжение в выходное напряжение постоянного тока, величина которого больше пикового значения синусоидального напряжения.

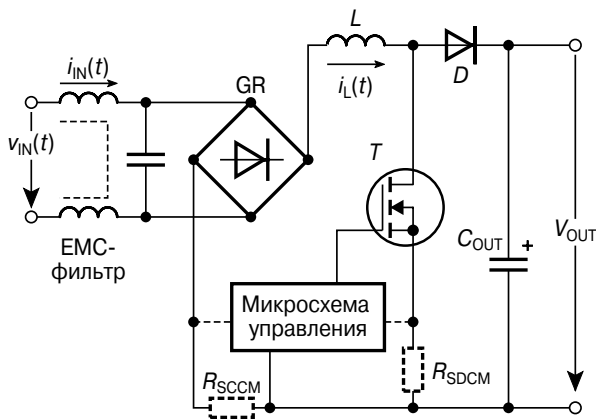


Рис. 3.116. Схема коррекции коэффициента мощности с использованием повышающего преобразователя.

Преимуществом использования высокого значения постоянного напряжения на входе импульсного источника питания является то, что ключевой транзистор (CoolMOS™) и входной конденсатор могут иметь меньшие размеры, чем в случае источника питания с широким диапазоном входных напряжений, не имеющего повышающего ККМ-преобразователя. В общем случае, можно отказаться от использования входного конденсатора, поскольку выходной конденсатор C_{OUT} может его полностью заменить, как показано на Рис. 3.116. Преобразователь работает в режиме свободных колебаний (не синхронизирован), т.е. с переменной или постоянной частотой импульсов. В течение каждого периода импульсов дроссель L повышающего преобразователя сначала намагничивается, а затем полностью размагничивается. Это подтверждается тем, что ток дросселя $i_L(t)$ в конце периода снова падает до 0. Сразу после этого начинается новый период им-

пульсов, с последующим намагничиванием дросселя. В результате возникает ток дросселя $i_L(t)$, имеющий треугольную форму. Таким образом, преобразователь работает в режиме со спадающим до 0 током дросселя, поэтому данный режим работы также называется режимом с прерывистым током (Рис. 3.117).

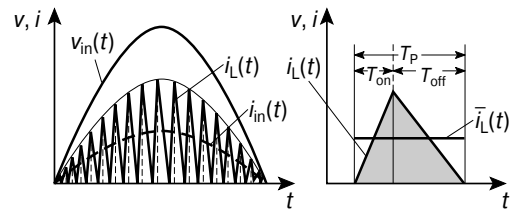


Рис. 3.117. Форма тока в режиме свободных колебаний.

Диаграмма тока дросселя в течение одного периода коммутации может быть описана в соответствии с законом электромагнитной индукции.

На интервале $0 \leq t \leq T_{on}$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t v_{in}(t) dt = \frac{v_{in}(t)}{L} \cdot t \quad (1)$$

На интервале $T_{on} \leq t \leq T_p$

$$i_L(t) = I_0 - \frac{V_{out} - v_{in}(t)}{L} \cdot (t - T_{on}) \quad (2)$$

Здесь I_0 — значение, до которого нарастает ток дросселя на интервале намагничивания (за время T_{on}), т.е. $I_0 = \sin(t) \cdot T_{on}/L$. Поскольку период импульса T_p намного меньше периода напряжения питающей сети, т.е. $T_p \ll T_{Mains}$, то в первом приближении можно предположить, что внутри каждого единичного периода импульсов значения токов и напряжений постоянны. При использовании выражения (1) получим среднее значение тока дросселя:

$$\begin{aligned} i_L(t) &= \frac{1}{T_p} \cdot \int_0^{T_p} i_L(t) dt = \frac{1}{T_p} \cdot \frac{I_0 \cdot T_p}{2} = \\ &= \frac{T_{on}}{2 \cdot L} \cdot v_{in}(t) = const \cdot v_{in}(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Следовательно, в течении периода импульса T_p среднее значение тока дросселя $i_L(t)$, который также будет являться и входным током, линейно зависит от мгновенного значения входного напряжения $v_{in}(t)$. Однако предпосылкой к этому служит то, что длительность открытого состояния T_{on}

транзистора T (MOSFET) остаётся постоянной. Если теперь подать один за другим бесконечное число импульсов, то мы получим постоянный ток, который будет пропорционален входному напряжению.

Если управление ККМ-преобразователем осуществляется на фиксированной частоте, то дроссель повышающего преобразователя никогда не будет полностью размагничиваться, т.е. включение транзистора следующим импульсом будет происходить в тот момент, когда в дросселе ещё будет протекать ток $i_L(t)$. Таким образом, ток дросселя будет иметь трапецеидальную форму и значительные пульсации. Данный режим называется режимом непрерывного тока (Рис. 3.118).

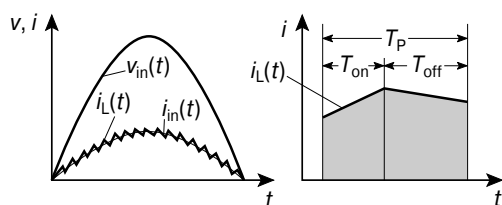


Рис. 3.118. Форма тока ККМ, работающего на фиксированной частоте.

Ток между землёй и отрицательным выводом мостового выпрямителя измеряется при помощи сопротивления R_{SCCM} (см. Рис. 3.118). Оно также служит для измерения полного тока дросселя. Этот сигнал сглаживается и умножается на сигнал, соответствующий мгновенному значению входного напряжения. Значение уставки для широтно-импульсного модулятора:

$$i_{set}(t) = I_{AVG} \cdot k_V \cdot v_{in}(t) = \text{const} \cdot v_{in}(t). \quad (4)$$

Здесь величина I_{AVG} — это среднее, или действующее, значение тока дросселя, который, как мы предположили, является постоянным в течение периода импульса. Поэтому данный способ управления также называется режимом управления средним значением тока. Коэффициент k_V — это масштабирующий коэффициент с размерностью $1/V$. Из выражения (4) легко увидеть линейное соотношение между значением уставки по току и входным напряжением. Значение уставки по току преобразуется широтно-импульсным модулятором в управляющий сигнал для ключевого транзистора.

Выбор наиболее подходящего метода для конкретного устройства зависит, главным образом, от стоимости системы. На сегодняшний день для мощностей до 200 Вт широко используются ККМ с прерывистым током, при более высоких мощностях используются ККМ с непрерывным током. Из-за высоких импульсных токов стоимость оборудования по защите от помех для ККМ, работающих в прерывистом режиме, выше, но, с другой стороны, требования, предъявляемые к диодам в отношении обратного напряжения, более критичны для ККМ с непрерывным током, и, следовательно, здесь отлично подойдут диоды на основе карбида кремния.

Интегральные микросхемы для ККМ

Микросхемы для управления активными схемами ККМ дополнили ассортимент ИС для импульсных источников питания.

ККМ, работающие в режиме прерывистого тока. Микросхемы типа TDA 4862 и TDA 4863 подходят для схем ККМ, применяющихся в электронных балластах для люминесцентных ламп, источниках питания для ноутбуков, ЖК-мониторах и других устройствах мощностью до 150 Вт. Они позволяют получить коэффициент мощности, близкий к единице, при достаточно точно регулируемом выходном напряжении даже в широком диапазоне входных напряжений от 85 до 265 В. Эти устройства работают в несинхронизированном режиме с током треугольной формы, содержат квадрантный умножитель для точной коррекции коэффициента мощности и схемы защиты: контроль перенапряжений, ограничение напряжения питания, ограничение выходного напряжения при отключении нагрузки и быстродействующее ограничение тока (поцикловое).

На микросхеме ICE1PD265G из семейства CoolSET™ (см. подраздел 3.7.4), состоящей из размещённых в одном корпусе типа P-DSO-16 драйвера TDA 4863 и транзистора CoolMOS™ с $R_{DSon} = 1.1 \text{ Ом}$ (Рис. 3.119), можно реализовывать схемы ККМ мощностью до 100 Вт, в зависимости от диапазона входных напряжений. Их достоинствами являются малые размеры, отсутствие внешнего теплоотвода и меньшее количество компонентов.

ККМ, работающие в режиме непрерывного тока. Для более высоких мощностей

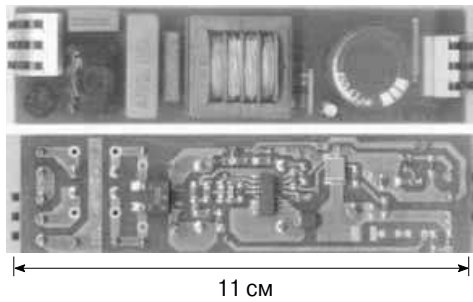


Рис. 3.119. Компактный ККМ на микросхеме ICE1PD265G семейства CoolSET™ (50 Вт, широкий диапазон).

предпочтительнее использовать ККМ, работающие в режиме непрерывного тока. Типовым решением для таких устройств является микросхема TDA16888 (см. подраздел 3.7.4), представляющая собой комбинацию ККМ и драйвера импульсного источника питания (ШИМ). Она работает на фиксированной частоте, которая задаётся в диапазоне от 15 до 200 кГц. Тактовая частота ККМ жёстко связана с тактовой частотой драйвера импульсного источника питания. Для минимизации электромагнитных помех каскад ККМ переключается по нарастающему фронту тактовых импульсов системы, а блок ШИМ — по спадающему. Помимо превосходных функций защиты, следует упомянуть о «модулированном управлении затвором». Используя нелинейную зависимость времени включения транзистора от напряжения на затворе, можно снизить крутизну отпирающего импульса транзистора CoolMOS™, что упрощает подавление помех в системе. Областью применения такого прибора являются источники питания с ККМ, работающие в диапазоне мощностей от 150 до более чем 1000 Вт.

Микросхема ICE1PCS01 (**Рис. 3.120**) представляет новый класс устройств управления ККМ. Она была разработана специально для приложений, где важную роль играет стоимость, и выпускается в корпусе DIP-8. Микросхема имеет внешнюю подстройку частоты и все необходимые функции защиты. Количество внешних компонентов является минимальным, и, таким образом, значительно упрощает разработку ККМ. Типичные области применения для данной ИС — персональные компьютеры, серверы, адаптеры и универсальные источники питания.

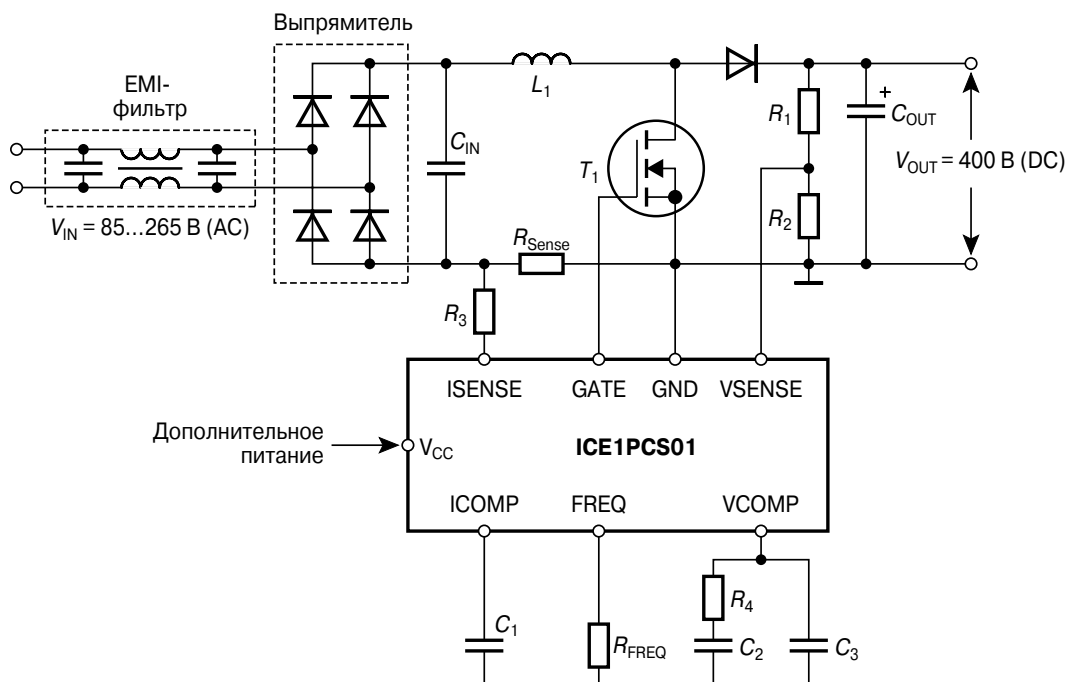


Рис. 3.120. Каскад ККМ на базе ICE1PCS01, работающий в режиме непрерывного тока.

3.7.6. Электроприводы — регулирование скорости вращения и силовая электроника

Силовая электроника является связующим звеном между генерированием электроэнергии и её использованием. При питании электроприводов постоянного тока и трёхфазных электроприводов переменного тока от любого источника сетевого напряжения важное значение имеет техника управления. В данном случае, применяемые в преобразователе силовые полупроводниковые приборы, например диоды и IGBT, используются для того, чтобы непрерывно регулировать токи и напряжения. Из фиксированного напряжения питания сети переменного тока на выходе преобразователей генерируется система переменных напряжений, оптимизированных для электропривода.

Исторически, разработка схем преобразователей началась с появлением ртутно-вакуумных выпрямителей. Селеновые выпрямители позволили изготавливать электроприводы меньшей мощности. В результате непрерывного совершенствования полупроводниковых приборов появилась возможность разрабатывать ещё более компактные, дешёвые и эффективные решения. Современные концепции управления электроприводами заключаются в использовании модулей, объединяющих цифровые схемы и силовые полупроводниковые приборы, а также корпусных дискретных приборов.

Области применения инверторов

Разработка инверторов позволила питать любой электродвигатель от любой сети электропитания. Инверторы используются в широком диапазоне мощностей, от приводов для стиральных машин до тяговых электроприводов локомотивов. На сегодняшний день обычно в качестве ключей и вентилях для устройств такого типа используются IGBT с встречно-параллельными (обратными) диодами, как в виде дискретных приборов для устройств малой мощности, так и в виде модулей для устройств большой мощности. Однако принцип действия этих электроприводов всегда остаётся одним и тем же и будет кратко рассмотрен далее.

В отличие от двигателей постоянного тока, у которых скорость вращения может регулироваться путём изменения напряже-

ния, для изменения скорости вращения двигателей переменного тока необходимо изменять частоту тока.

Синхронная скорость вращения прямо пропорциональна угловой частоте ω напряжения питания и обратно пропорциональна числу пар полюсов p и может быть рассчитана по формуле:

$$n_d = \frac{\omega}{2 \cdot \pi \cdot p}.$$

При $p = 1$ мы имеем дело с двухполюсным двигателем. Однако число пар полюсов может быть больше, что уменьшает скорость вращения.

Для управления скоростью вращения электродвигателя следует изменять частоту тока статора. Для этой цели используются преобразователи частоты на основе инверторов.

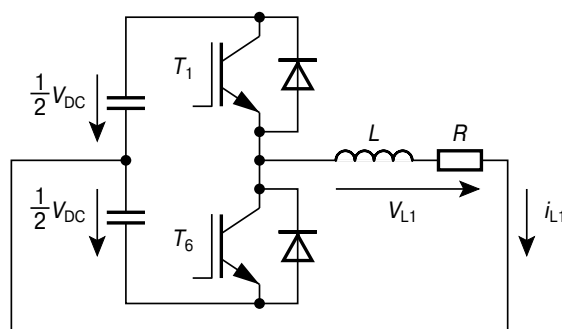


Рис. 3.121. Одна фаза преобразователя.

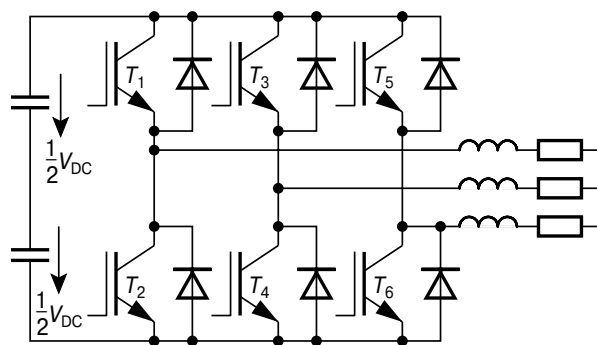


Рис. 3.122. Трёхфазный преобразователь.

На Рис. 3.121 представлена одна фаза преобразователя частоты, без входного выпрямителя, формирующего из сетевого напряжения промежуточное постоянное напряжение (напряжение звена постоянного тока). Три подобных звена образуют типичный преобразователь для трёхфазного двигателя, как показано на Рис. 3.122. Ключи $T_1...T_6$ — это IGBT с обратными диодами.

Теперь поясним принцип действия данного преобразователя при помощи **Рис. 3.123** и **3.124**.

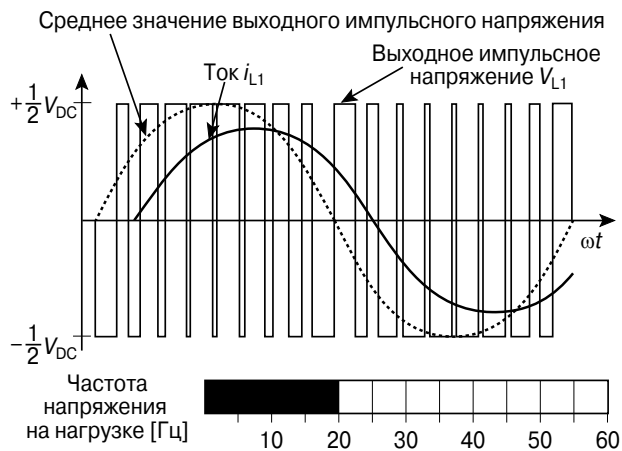


Рис. 3.123. ШИМ, частота 20 Гц.

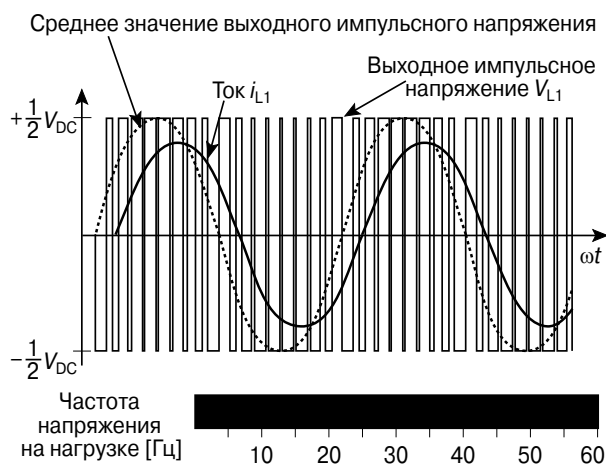


Рис. 3.124. ШИМ, частота 60 Гц.

Для преобразования выпрямленного напряжения V_{DC} при управлении ключами преобразователя используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). После интегрирования получается синусоидальное напряжение с частотой, которая может задаваться ШИМ-сигналом. Активно-индуктивная нагрузка, которой является электродвигатель, действует как интегратор для тока и, таким образом, создаёт ток синусоидальной формы, сдвинутый по фазе относительно напряжения.

На **Рис. 3.125** представлены схемы замещения по интервалам проводимости и пути протекания тока для одной фазы преобразователя. Из-за наличия сдвига фаз между током и напряжением всегда необходим путь обратного протекания тока через

IGBT. В преобразовательном устройстве помимо ключа требуется вентиль, подключённый встречно-параллельно с ключом (обратный диод).

Для увеличения КПД и плотности мощности постоянно разрабатываются новые технологии. Один из подходов заключается в улучшении схемотехники или оптимизации техники переключения, другой — в разработке новых полупроводниковых приборов. Как производитель полупроводников, компания Infineon Technologies концентрируется на втором подходе, а как технологический лидер в области производства IGBT — предлагает новые решения для использования в инверторах.

3.7.7. Низковольтные силовые транзисторы OptiMOS™

Поскольку за последние несколько лет увеличилось многообразие электронных устройств, возросла и потребность в специально спроектированных источниках питания. Современные поколения процессоров выдвигают ещё более жёсткие требования в отношении стабильности напряжения питания, в то время как потребление тока непрерывно растёт. Портативные устройства, например мобильные телефоны, карманные компьютеры и КПК, должны использовать заряд батареи при минимально возможных потерях, чтобы обеспечить длительное время работы данных устройств в активном режиме и в режиме ожидания. В автомобильной промышленности электронная революция только началась. Механические и гидравлические системы всё больше заменяются на электромеханические, что позволяет повысить безопасность и удобство, а также снизить расход топлива. Во всех этих системах требуется такое управление питанием, которое невозможно реализовать без использования низковольтных ключей.

В отличие от биполярных транзисторов, в которых, в соответствии с названием, в формировании тока участвуют оба типа носителей заряда, в MOSFET ток обеспечивается только основными носителями: в MOSFET с n -каналом — электронами, а в MOSFET с p -каналом — дырками. Это приводит к двум важным преимуществам MOSFET:

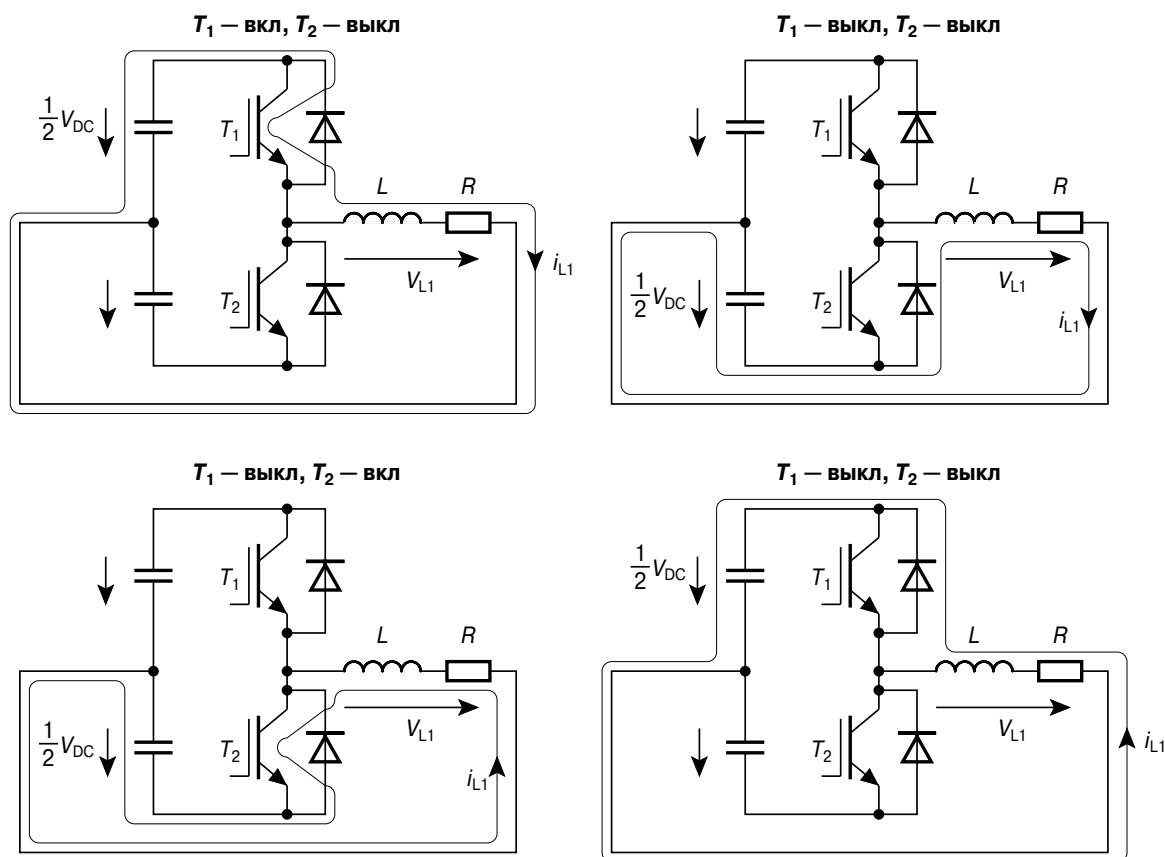


Рис. 3.125. Эквивалентные схемы замещения по интервалам проводимости и пути протекания тока для одной фазы инвертора.

1. Падение напряжения сток — исток для низковольтных MOSFET меньше, чем можно получить у биполярных транзисторов, находящихся в режиме насыщения. В частности, при малых напряжениях и высоких токах источника питания это позволяет значительно снизить потери.
2. Как униполярный прибор, MOSFET не имеет накопленного заряда в проводящем состоянии. Таким образом, остаточный (хвостовой) ток, который обычно возникает в биполярных транзисторах при выключении, будет невелик. Следовательно, сверхбыстрое время переключения и значительно меньшие потери при переключении делают MOSFET идеальным силовым ключом для импульсных устройств, например для источников питания и блоков управления электродвигателями.

Проводимость MOSFET

Наиболее важным параметром данного прибора является сопротивление в открытом состоянии. Оно определяется как сумма всех резистивных элементов в структуре MOSFET. Отдельные составляющие этого сопротивления для планарного MOSFET представлены на Рис. 3.126. Изолированный затвор и исток планарной структуры расположены в верхней части кристалла, а подложка является стоком. Для низковольтных транзисторов наибольший вклад в полное сопротивление транзистора вносят сопротивление канала R_{channel} (примерно 30%), сопротивление внутреннего полевого транзистора с управляющим переходом, образующимся между двумя карманами p -типа R_{JFET} (примерно 25%) и сопротивление зоны дрейфа R_{epi} (примерно 30%). Последнее определяется пробивным напряжением транзистора. С ростом напряжения пробоя возрастает поверхностное сопротивление, которое пропорционально $V_{\text{br}}^{2.5 \dots 2.6}$. Эти три

сопротивления составляют примерно 80% от полного сопротивления. Как следствие, новые технологические разработки, основанные на ячеистой структуре транзистора, направлены на уменьшение данных трёх составляющих.

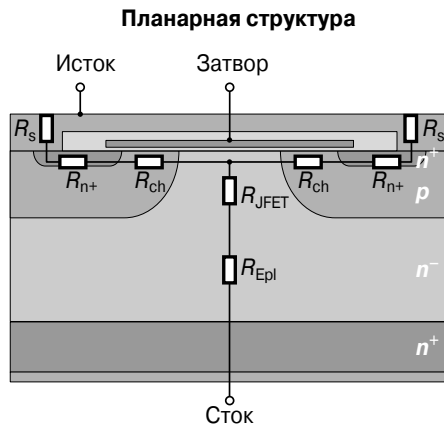


Рис. 3.126. Ячейка MOSFET с вертикальной структурой.

Сопротивление канала прямо пропорционально длине канала и обратно пропорционально его ширине.

Из-за расширения области пространственного заряда в карман p -типа канал нельзя сделать слишком коротким, не оказывая существенного влияния на пробивные характеристики и пороговое напряжение транзистора. С другой стороны, можно значительно увеличить ширину канала за счёт более плотного расположения элементов. Стремительное развитие фотолитографии сделало возможным изготовление структур меньших размеров. Развитие процессов интеграции в силовой электронике в последние годы может и отстаёт от высокой степени интеграции в цифровой микроэлектронике, но несколько лет назад технологии изготовления силовых электронных приборов преодолели субмикронный барьер. За последние несколько лет, используя более узкие структуры ячеек, появилась возможность существенно увеличить ширину канала на единицу площади и, таким образом, значительно уменьшить сопротивление канала, которое обратно пропорционально ширине канала. В современных разработках достигается значение ширины канала примерно 1 м/мм^2 . Однако при

меньших размерах ячеек сближаются также карманы p -типа, увеличивая составляющую сопротивления R_{JFET} , и характеристики планарной структуры приближаются к своим пределам.

Вскоре появится необходимость в поиске новых типов ячеек. По аналогии с введением в силовой электронике вертикальной структуры MOSFET вместо горизонтальной, появились ключи с вертикальным затвором (транзисторы, изготавливаемые по Trench-технологии). Данные структуры имеют три важных преимущества:

1. В зависимости от типа структуры составляющая сопротивления R_{JFET} может быть исключена. Области с p -проводимостью больше не изготавливаются в виде карманов, которые в стандартной структуре расположены под поверхностью. Области p -типа теперь разделены канавками, на боковой поверхности которых изготовлен вертикальный канал. Как следствие, прямое падение напряжения больше не связано с путём протекания тока между соседними p -областями, и движение носителей заряда к стоку будет беспрепятственным.
2. Из-за вертикального строения канала его длина больше не накладывает никаких ограничений на расстояние между ячейками. Это позволяет значительно увеличить ширину канала. На сегодняшний день минимальный размер ячейки определяется только доступной технологией фотолитографии и точностью процесса изготовления канавок.
3. В планарной структуре изгибы в карманах p -типа приводят к появлению неравномерности поля. Это означает, что степень легирования в зоне дрейфа не должна быть слишком высокой. Смежные области p -типа в структуре с канавками снижают неравномерность, а за счёт увеличения степени легирования осуществляется дальнейшее улучшение характеристик транзистора.

Для структуры ячейки, показанной на **Рис. 3.127**, очевидным является исключение из структуры JFET-транзистора, и это создаёт огромный потенциал для увеличения ширины канала. Затвор такой структуры расположен в канавке, канал проходит перпендикулярно поверхности кристалла. В результате, за последние несколько лет удалось добиться значительного снижения

удельного сопротивления силовых MOSFET в открытом состоянии на единицу площади.

Trench-структура

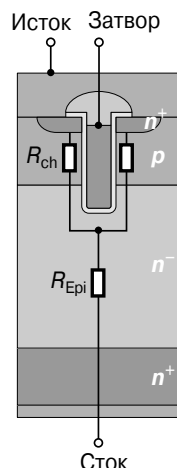


Рис. 3.127. Ячейка MOSFET с вертикальным каналом.

Характеристики переключения MOSFET

Второе важное отличие между MOSFET и биполярными транзисторами — это сверхмалая мощность управления изолированным затвором. Для того чтобы поддерживать биполярный транзистор в проводящем состоянии, постоянно должен протекать ток базы, который, в случае силовых транзисторов, достаточно велик и может составлять значительную долю от общего тока. А для включения MOSFET к его затвору достаточно приложить напряжение, превышающее пороговое значение. Потери, возникающие во время переключения, связаны исключительно с изменением заряда ёмкостей.

Вне зависимости от типа структуры, горизонтальной или вертикальной, MOSFET может быть с достаточной точностью охарактеризован тремя ёмкостями. Ёмкость сток — исток определяется ёмкостью p - n -перехода между истоком и стоком. Ёмкость затвор — исток, с одной стороны, формируется перекрытием электрода затвора с n^+ -областью вывода истока и p -карманом, соединённым с истоком, а также, в значительно меньшей степени, перекрытием металлизации истока с затвором. Наконец, ёмкость затвор — сток, также называемая ёмкостью Миллера, состоит из двух ёмкостей,

соединённых последовательно: так называемой оксидной ёмкости между затвором и n^+ -зоной с оксидом, выполняющим роль диэлектрика, и ёмкости зоны пространственного заряда, которая образуется при приложении отрицательного напряжения между затвором и стоком. Таким образом, ёмкость затвор — сток сильно зависит от приложенного к транзистору напряжения и может изменяться на несколько порядков в диапазоне его рабочих напряжений. В спецификациях эти ёмкости часто задаются как входная ёмкость (C_{ISS}), выходная ёмкость (C_{OSS}) и ёмкость обратной передачи (C_{RSS}), но данные ёмкости также могут быть с лёгкостью рассчитаны из ёмкостей транзистора. Типичная зависимость ёмкостей от напряжения сток — исток представлена на **Рис. 3.128**. Из рисунка видно, что зависимость ёмкости затвор — сток имеет сильно выраженный нелинейный характер.

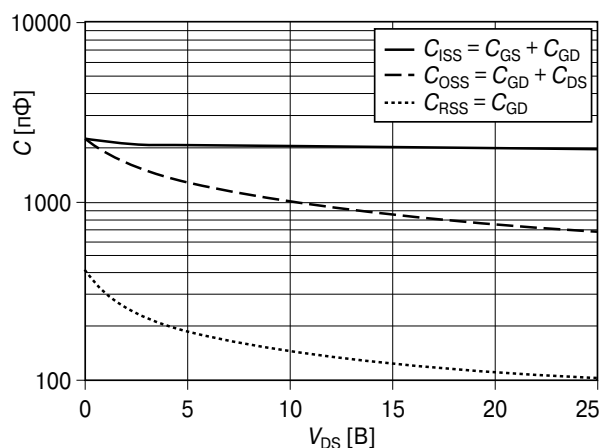


Рис. 3.128. Зависимость ёмкостей MOSFET от приложенного напряжения сток — исток.

Для включения MOSFET, к затвору n -канального транзистора следует приложить положительное напряжение. Процесс коммутации индуктивной нагрузки при наличии обратного диода может быть разделён на интервалы (см. **Рис. 3.129, а**). Сначала происходит заряд ёмкости затвор — исток до порогового напряжения. В течение данного интервала транзистор остаётся закрытым. Этот интервал называется временем задержки, и он определяет время реакции транзистора. При превышении порогового напряжения формируется токопроводящий канал, и начинает протекать ток стока. Дальнейшему увеличению тока затвора будет препятствовать ёмкость Миллера, C_{GD} .

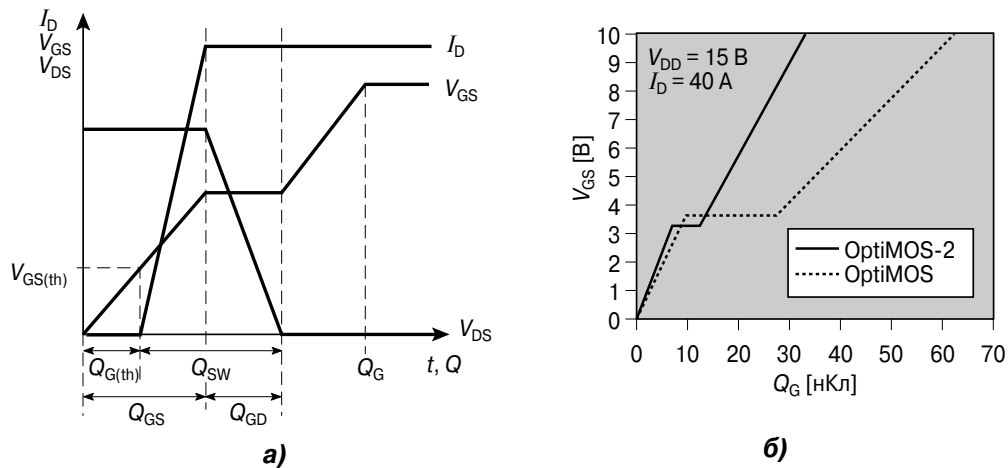


Рис. 3.129. Характеристики MOSFET: *а* — процесс включения MOSFET для индуктивной нагрузки при наличии цепи обратного тока; *б* — кривая нарастания заряда затвора для транзисторов с одним и тем же R_{on} , изготовленных по технологиям OptiMOS и OptiMOS-2.

Заряд затвора, передаваемый драйвером, должен быть достаточен для заряда ёмкостей, и он определяет потери в схеме управления. Только после полного заряда ёмкости Миллера транзистор перейдёт в открытое состояние из-за уменьшения зоны пространственного заряда, а его прямое сопротивление и ток нагрузки будут определять падение напряжения на транзисторе.

На **Рис. 3.129, б** представлена зависимость напряжения на затворе от заряда затвора для двух транзисторов, изготовленных по технологиям OptiMOS и OptiMOS-2. Как видно из рисунка, появилась возможность уменьшения длительности интервала, обусловленного ёмкостью Миллера, а с ней и ёмкости затвор — сток, более чем на 50%. Из этой диаграммы достаточно легко определить, насколько велики соотношения ёмкостей или зарядов. Ёмкость затвор — исток является основным параметром, определяющим наклон этой характеристики в точке $Q_g = 0$. Величина заряда Миллера может быть определена по длине «полки». И наконец, ёмкость затвор — исток и ёмкость оксидного слоя определяют наклон кривой на третьем участке.

Сегодня современные DC/DC-преобразователи для источников питания микропроцессоров работают на частотах в несколько сотен кГц. Поэтому необходимым условием для поддержания в допустимых пределах потерь на переключение и потерь на управление, а также, как следствие, и размеров петли обратной связи, является получение наименьшей возможной ёмкост

ти Миллера. Таким образом, основной задачей при разработке технологии OptiMOS-2 было максимально возможное уменьшение влияния ёмкости Миллера, что позволило создать идеальный компонент, предназначенный для подобных приложений.

Таким образом, при использовании структур с вертикальным каналом и увеличении удельной ширины канала можно уменьшить удельное прямое сопротивление на единицу площади. Однако изначально за это приходится платить увеличением удельной ёмкости. Из-за большей ширины канала возрастает площадь перекрытия области затвора и p^+ -области истока, что приводит к увеличению ёмкости затвор — исток. Ёмкость затвор — сток также возрастает из-за большей ширины канала и более плотного расположения ячеек. Однако это явление можно скомпенсировать, если ограничить область перекрытия затвора и стока дном канала. Из-за наличия планарного p - n -перехода, для транзистора с такой же площадью поверхности снижается только ёмкость исток — сток.

Следовательно, при разработке низковольтных силовых MOSFET необходимо найти компромисс между удельным сопротивлением $R_{on} \cdot A$ и удельным зарядом затвора Q_g/A , который должен поддерживаться на минимальном уровне. Если определить критерий качества (FOM) как

$$FOM = (R_{on} \cdot A) / (Q_g/A),$$

тогда мы получим параметр, не зависящий от размера ячейки, а связанный с техноло-

гией изготовления транзистора. На **Рис. 3.130** показаны результаты расчёта модели $R_{on} \cdot A$ и FOM для различных размеров ячейки.

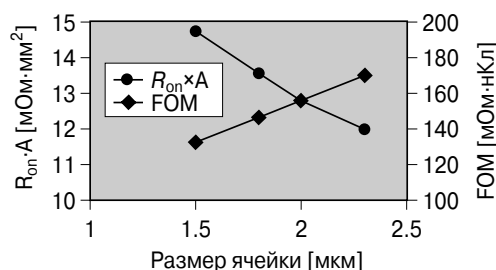


Рис. 3.130. Зависимость удельного сопротивления на единицу площади $R_{on} \cdot A$ и критерия качества FOM от размера ячейки.

В зависимости от требований, предъявляемых устройствами, технология может быть оптимизирована по значению $R_{on} \cdot A$ (потери на проводимость) или по FOM (потери на проводимость и потери на переключение).

Заряд, накапливаемый в MOSFET (заряд обратного восстановления)

В наиболее распространенном типе DC/DC-преобразователей — понижающих преобразователях — в качестве элемента цепи обратного тока используется обратный

диод MOSFET. При этом транзистор ведёт себя как биполярный компонент, и ток через него определяется как основными, так и неосновными носителями заряда. Если поменять полярность приложенного напряжения, чтобы запереть транзистор, то сначала должен рассеяться заряд, накопленный в транзисторе, — так называемый заряд обратного восстановления. Это приводит к дополнительным потерям из-за бросков тока, которые представляют опасность для схемы. Таким образом, малый заряд обратного восстановления является третьей важной характеристикой современных низковольтных транзисторов.

На **Рис. 3.131, а** представлена схема для измерения заряда обратного восстановления. В 1-й фазе, когда нижний транзистор (ключ) открыт, ток в индуктивности нарастает линейно. В фазе 2, после отключения транзистора, ток протекает в верхней демпферной цепи через диод испытуемого транзистора. В фазе 3 снова включается нижний транзистор. Ток переходит из демпферной цепи в цепь нагрузки. При этом полярность приложенного к верхнему транзистору напряжения меняется (транзистор переходит из режима обратного диода в режим отсечки), и заряд обратного восстановления должен рассеяться через нижний транзистор, в дополнение к протекающему через него току нагрузки.

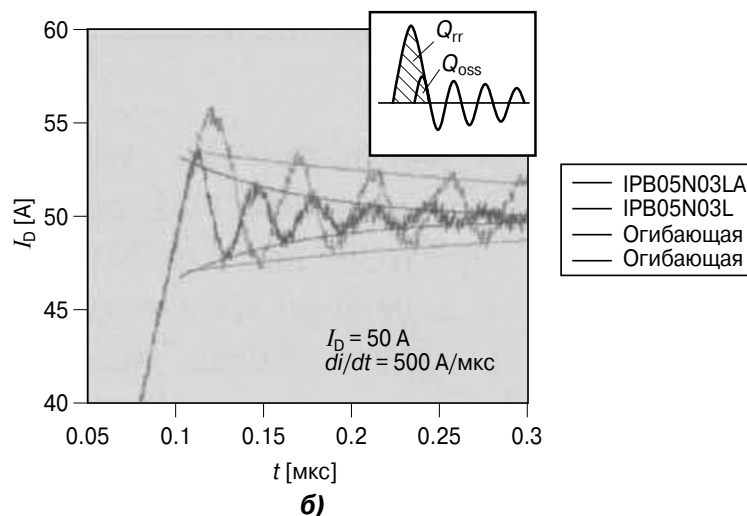
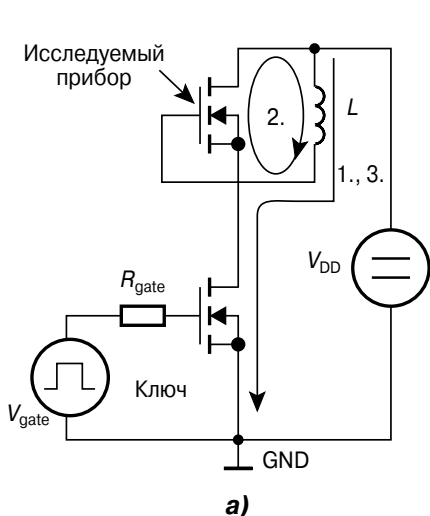


Рис. 3.131. Заряд обратного восстановления: *а* — испытательная схема для измерения заряда обратного восстановления; *б* — типичные значения заряда обратного восстановления для технологий OptiMOS и OptiMOS-2.

На **Рис. 3.131, б** представлены типичные осциллограммы тока для транзисторов семейств OptiMOS и OptiMOS-2 при скорости нарастания тока 500 А/мкс. Заряд обратного восстановления для этих транзисторов настолько мал, что возникают лишь небольшие броски токов. Колебания возникают из-за резонанса выходной ёмкости (C_{OSS}) с индуктивностью испытательной схемы. Для того чтобы определить заряд обратного восстановления, следует вычесть площади кривых, показанных на небольшой поясняющей диаграмме. Оставшаяся площадь соответствует заряду обратного восстановления Q_{rr} . Для технологии OptiMOS-2 типичные значения этого заряда не превышают 10 нКл.

Стойкость MOSFET к лавинному пробое

В экстремальных рабочих условиях может начаться лавинный пробой транзистора. Помимо отключения схемы предохранителем или цепью защиты, это не должно привести к повреждению транзистора. Поэтому в спецификации на транзистор указывается значение энергии лавинного пробоя, т.е. количество энергии, которое может выдержать транзистор при пробое, — при этом транзистор ведёт себя как стабилитрон.

Схема испытаний для определения стойкости транзистора к лавинному пробое представлена на **Рис. 3.132, а**. Изначально транзистор находится в открытом состоя-

нии. Ток в цепи нарастает по закону, определяемому индуктивностью L и напряжением источника питания V_{dd} . Если теперь выключить транзистор, то благодаря индуктивности в цепи будет продолжать течь ток. Напряжение на транзисторе будет возрастать до тех пор, пока не достигнет значения напряжения пробоя, после чего ток потечёт через внутренний диод транзистора. На **Рис. 3.132, б** представлены две фазы работы транзистора при испытаниях на лавинный пробой. В фазе 1 энергия накапливается в индуктивности, а при пробое, в фазе 2, накопленная в индуктивности энергия должна быть поглощена транзистором.

Для простой схемы испытаний можно с лёгкостью рассчитать длительность лавинного пробоя, зная напряжение пробоя транзистора, индуктивность и ток в цепи:

$$V_{br} = V_{DD} - L \cdot \frac{di}{dt} \Rightarrow t_{av} = \frac{L \cdot I_{as}}{V_{br} - V_{DD}}.$$

Длительность лавинного пробоя пропорциональна индуктивности и току в цепи и обратно пропорциональна падению напряжения на катушке индуктивности. В частности, в диапазоне низких напряжений малая разница между напряжением пробоя и напряжением источника питания приводит к увеличению длительности лавинного пробоя. Накапливаемая в приборе энергия выражается следующим образом:

$$E_{as} = \frac{1}{2} \cdot V_{br} \cdot I_{as} \cdot t_{av} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{as}^2 \cdot \frac{V_{br}}{V_{br} - V_{DD}}.$$

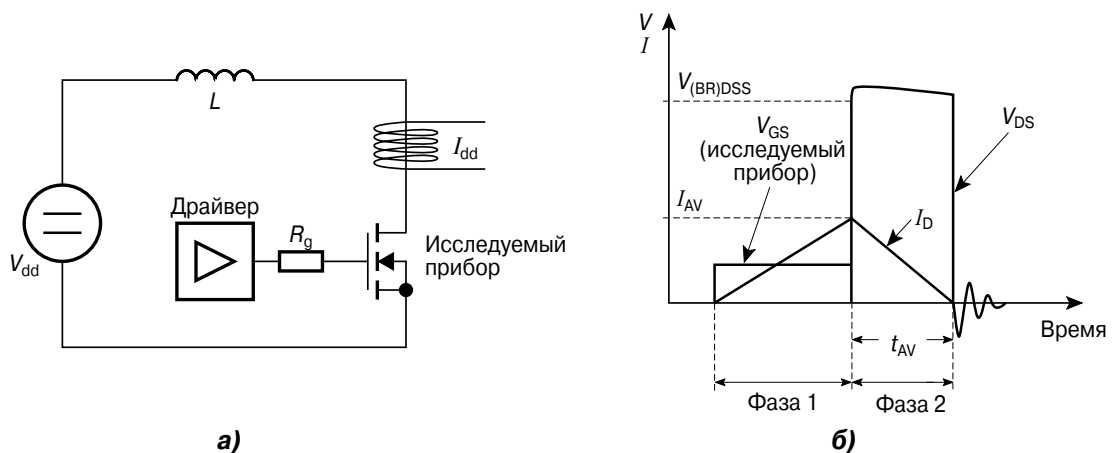


Рис. 3.132. Испытания на лавинный пробой: *а* — установка для испытания MOSFET на лавинный пробой; *б* — диаграммы тока и напряжения при испытаниях на лавинный пробой.

В современных силовых MOSFET следует предпринимать соответствующие технологические меры, чтобы не допустить появления паразитного n - p - n -транзистора, формирующегося в открытом состоянии между истоком, каналом и зоной дрейфа. Допустим, что стойкость к лавинному пробое ограничена только ростом температуры прибора. При таком допущении можно получить некоторые фундаментальные зависимости из уравнения для теплопроводности. Рассмотрим выражение для средней мощности потерь, рассеиваемых в транзисторе:

$$\bar{P}_{av} = \frac{1}{2} \cdot V_{br} \cdot I_{as}.$$

Тепловое сопротивление для заданной длительности импульса пробоя t_{av} определяется свойствами материала и для кремния с активной площадью кристалла A_{active} равно:

$$Z_{th}(D=0; t_{av}) = 2 \cdot K \cdot \sqrt{t_{av}},$$

где

$$K = \frac{f(\text{свойства кремния})}{A_{active}}.$$

Из этих выражений получим формулу для превышения температуры над начальной температурой T_0 :

$$\Delta T_j = T_j - T_0 = Z_{th} \cdot \bar{P}_{av} = K \cdot V_{br} \cdot I_{as} \cdot \sqrt{t_{av}}.$$

Собственная проводимость кремния экспоненциально растёт с ростом темпера-

туры. Когда число носителей заряда, образующихся в результате тепловой ионизации, в конечном итоге достигает того же порядка, что и фоновый заряд, прибор теряет свои блокирующие способности и разрушается. Разрушение прибора всегда начинается при определённой температуре кристалла:

$$T_{j, \text{разр}} = \text{const}.$$

Отсюда получаем следующие соотношения для лавинного тока и энергии лавинного пробоя:

$$I_{as} \approx A_{active} \cdot (T_j - T_0) \cdot t_{av}^{-1/2},$$

$$E_{as} \approx A_{active} \cdot (T_j - T_0) \cdot t_{av}^{1/2},$$

$$E_{as} \approx A_{active}^2 \cdot (T_j - T_0)^2 \cdot I_{av}^{-1}$$

Если построить график зависимости токов, при которых происходит разрушение, от начальной температуры T_0 для различных значений индуктивности или, например, длительности импульса пробоя, то можно подтвердить сделанные для модели допущения (см. **Рис. 3.133, а**). Из этого графика найдём температуру разрушения, равную $+380^\circ\text{C}$, очень близкую к собственной температуре кремния. Таким образом, стойкость к лавинному пробое ограничена только способностью прибора выдерживать тепловые нагрузки.

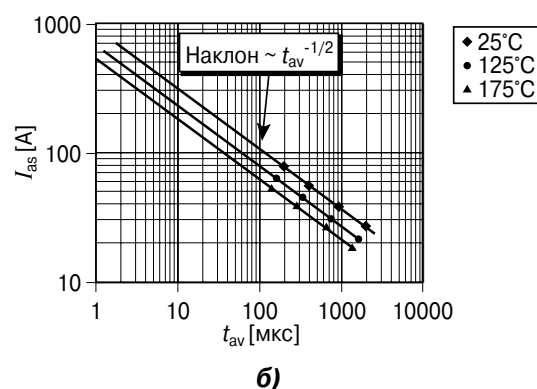
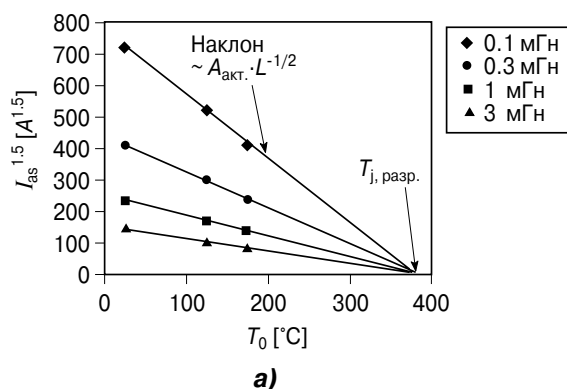


Рис. 3.133. Характеристики лавинного тока: *а* — зависимость максимального лавинного тока от индуктивности и от начальной температуры T_0 (все линии пересекаются при температуре разрушения прибора $T_{j, \text{разр}}$); *б* — зависимость лавинного тока от длительности процесса лавинного пробоя при различных температурах.

Заключение

Наряду со стремительным развитием микропроцессоров и памяти в последние годы, в области силовых полупроводниковых приборов также произошла революция. Она была вызвана появлением инновационных концепций использования ячеек и доступностью фотолитографии высокого разрешения для изготовления структур меньшего размера. Современные низковольтные MOSFET отличаются сверхнизким сопротивлением в открытом состоянии, низкими потерями на переключение и низким зарядом затвора, а также высокой стойкостью в экстремальных режимах работы. Оптимальное соотношение между отдельными параметрами определяется приложением, а в дальнейшем эта тенденция только усилится. Таким образом, в будущем разработка заказных технологий с узко специализированными характеристиками станет ещё более важной.

3.7.8. Высоковольтные транзисторы CoolMOS™

Структуры высоковольтных ключей и принцип компенсации

Требования, предъявляемые к высоковольтным ключам, заключаются в том, что они должны сочетать превосходные блокирующие характеристики и очень хорошие параметры в открытом состоянии. Кроме того, они должны быть простыми в управлении, быстродействующими, устойчивыми к перегрузкам и, конечно же, дешёвыми. Если не учитывать механические реле (срок службы которых составляет несколько секунд при частоте коммутации 75 кГц), то остаются только полупроводниковые приборы. Здесь требования в отношении высокого напряжения пробоя приводят к низкой степени легирования и относительно большой ширине слоя, к которому прикладывается напряжение. Но желание получить хорошие параметры в открытом состоянии требует использования высокой степени легирования и малой толщины активного слоя. Это противоречие впервые было решено в высоковольтных биполярных транзисторах, в которых низко легированный активный слой в проводящем состоянии заполнялся сверхпроводящей электронно-дырочной плазмой. В открытом со-

стоянии данным транзисторам требуется базовый ток, который всего на один или два порядка меньше тока нагрузки, что сильно усложняет управление ими. Кроме того, относительно большой разброс параметров ограничивает область применения этих приборов блоками строчной развертки телевизоров и энергосберегающими лампами.

Совмещение принципа действия биполярного транзистора и нулевой мощности управления привело к появлению биполярных транзисторов с изолированным затвором или, сокращенно, БТИЗ, но чаще применяется англоязычное IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor). В данных транзисторах вместо управляемого кармана p -типа (базы) электронный ток коммутируется продольным или вертикальным МОП-каналом. Электронный ток приводит к инжекции дырок из области смещённого в прямом направлении p - n -перехода на обратной стороне прибора. Это позволяет увеличить низкую проводимость области с обычной степенью легирования в открытом состоянии на несколько порядков путём инжекции электронно-дырочной плазмы. При выключении прибора проводящая плазма должна быть выведена из проводящей зоны, что неминуемо приведёт к появлению тепловых потерь при выключении, поскольку при нарастании напряжения на транзисторе продолжает протекать ток стока, или хвостовой ток.

На сегодняшний день IGBT имеют широкое применение, начиная от управления электродвигателями любого типа до импульсных источников питания. На средних и высоких частотах из-за наличия заряда обратного восстановления потери на выключение IGBT превосходят потери в проводящем состоянии, когда транзистор открыт.

Таким образом, в данном диапазоне частот применяются униполярные ключи, т.е. силовые полупроводниковые приборы, в которых ток создаётся только одним типом носителей заряда. Основным представителем этой группы приборов является разработанный в 1970 году традиционный силовой MOSFET. Как и в IGBT, электронный ток управляется продольным или вертикальным МОП-каналом, и в силовых транзисторах ток обычно протекает вертикально, через слой, к которому приложено напряжение, к расположенному на обратной

стороне прибора выводу стока. Как следствие, для получения хороших блокирующих характеристик степень легирования данного слоя должна быть мала. Поскольку в открытом состоянии нет инжекции дополнительных носителей заряда, данная структура обладает очень высоким сопротивлением на единицу площади, которое нелинейно возрастает с ростом напряжения (пропорционально $\sim V^{2.5...2.6}$). Этот серьёзный недостаток привёл к стремлению обходиться минимально возможным напряжением пробоя, например 450 В для американских сетей переменного тока или 500 В для сетей переменного тока с напряжением 230 В. Для MOSFET введён критерий качества (FOM) — сопротивление на единицу площади $R_{on} \cdot A$. Данный параметр определяет сопротивление в открытом состоянии, которое можно получить при площади 1 мм² для заданного напряжения пробоя.

Дальнейшее совершенствование структуры в 80-х и 90-х годах прошлого века не позволяло избавиться от данного недостатка. В частности, предпринимались попытки изменить профиль легирования, уровень которого становился выше и имел большую глубину, использовать меньший размер ячеек с увеличенной степенью легирования пространства между ними, использовать более плоские карманы p -типа или использовать комбинацию всех этих решений. В лучшем случае путём изменения профиля легирования удавалось достичь предельного значения для кремния, полученного при решении двумерной оптимизационной задачи нахождения максимальной проводимости при максимальном блокирующем напряжении. На **Рис. 3.134** представлены соответствующие методы.

В зависимости от типа импульсных источников питания и предъявляемых к ним требований области применения IGBT и MOSFET перекрываются, поэтому многие производители включают оба типа приборов в ассортимент своей продукции.

Таким образом, обе структуры высоковольтных приборов достигли пределов своих возможностей, что препятствует доведению их до идеальных ключей: заряд обратного восстановления IGBT не позволяет произвести быстрое переключение, высокое сопротивление MOSFET в открытом состоянии, определяемое предельным собственным сопротивлением кремния, яв-

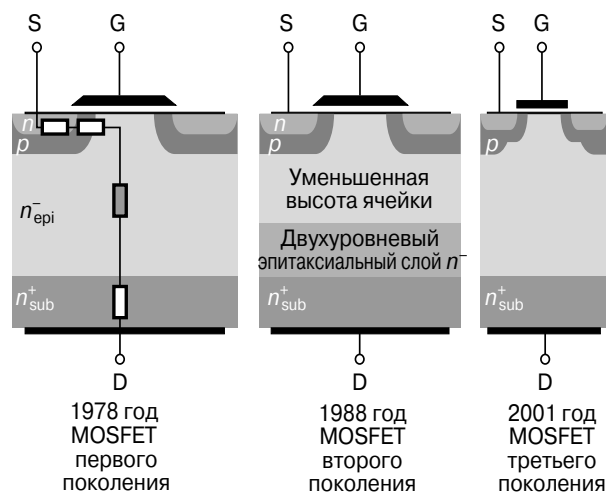


Рис. 3.134. Развитие традиционных MOSFET.

ляется основным препятствием для получения малых потерь при протекании тока.

Отсюда следует, что улучшения характеристик высоковольтных ключей нельзя добиться при помощи эволюции, это возможно только путём внедрения новых принципов. В данном случае инжекция биполярных носителей заряда не выглядит идеальным решением. С другой стороны, в открытом состоянии требуется большое количество носителей заряда, а в закрытом — малое. Революционное решение данной проблемы в некоторой степени состоит в пространственном разделении двух типов носителей заряда внутри одного прибора, чтобы в закрытом состоянии их суммарный заряд практически равнялся нулю, а в открытом не снижалась степень легирования одним из типов носителей заряда, создающих электронный ток. Это позволяет с лёгкостью преодолеть ограничения, накладываемые использованием кремния, поскольку для стандартного MOSFET больше не будет существовать ограничений, заключающихся в том, что один профиль легирования должен быть оптимизирован как по сопротивлению в открытом состоянии, так и по напряжению пробоя. Такая идея называется принципом компенсации (из-за эффекта уравнивания зарядов p - и n -областей), который уже был известен для транзисторов с горизонтальной структурой, но его применение в транзисторах с вертикальной структурой долгое время считалось невозможным. Первый успешный опыт применения данного принципа в промышленном изделии был осуществлён компанией Infineon Technologies, выпустившей

транзистор под зарегистрированной торговой маркой CoolMOS™. На Рис 3.135 приведены этапы разработки данного прибора.

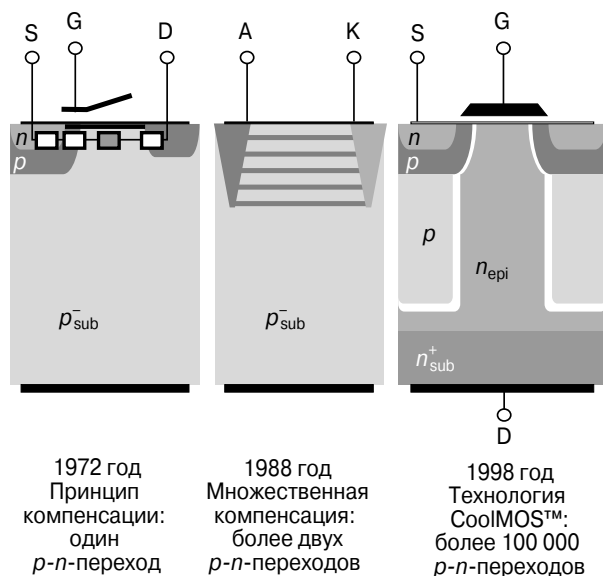


Рис. 3.135. Этапы развития на пути к компенсационному прибору.

Новый тип структуры транзисторов CoolMOS позволяет значительно уменьшить сопротивление в открытом состоянии, поскольку теперь степень легирования проводящих n -областей не влияет на напряжение пробоя: при увеличении блокирующего напряжения прибора только область, к которой прикладывается напряжение, должна иметь большую толщину и соответственно более глубокие p -области.

Больше не требуется снижения степени легирования. Это проявляется в том, что зависимость сопротивления в открытом состоянии от напряжения пробоя, которая для традиционных MOSFET имеет нелинейный характер, становится линейной. На Рис. 3.136 представлены зависимости сопротивления на единицу площади от напряжения пробоя для транзисторов семейства CoolMOS, для обычных транзисторов и для конкурирующих технологий. На этом графике кривая с надписью «Кобаяши» (Kobayashi) относится к результатам, полученным группой японских исследователей и опубликованным в 2001 году на конференции ISPSD, а кривая с надписью «Лучшая серийная продукция» относится к приборам конкурирующих фирм, имеющимся в свободной продаже.

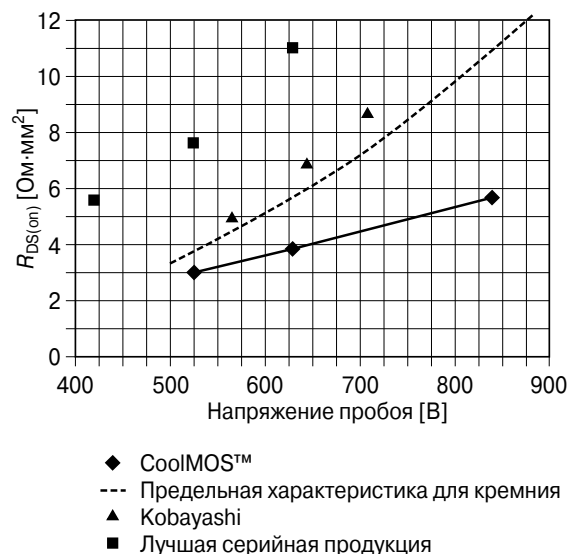


Рис. 3.136. Зависимость $R_{on} \cdot A$ от напряжения пробоя для транзисторов CoolMOS™ в сравнении с конкурентами и предельной характеристикой для кремния.

При номинальном напряжении 600 В сопротивление транзисторов, изготовленных по технологии CoolMOS™, в 3 раза меньше, чем сопротивление наилучших традиционных MOSFET, находящихся в свободной продаже. Это означает, что при заданной площади или типе корпуса можно получить меньшее сопротивление в открытом состоянии (например для прибора в корпусе TO220 вместо 600 мОм — 190 мОм), или же при заданном сопротивлении можно использовать корпус меньшего размера. Уменьшение размеров является важным преимуществом, в частности, для устройств с высокими плотностями мощности.

Задача использования технологии CoolMOS™ заключается в изготовлении структур из плотно расположенных областей p -типа, которые проникают внутрь активной зоны и осуществляют управление полным зарядом в областях p - и n -типов соответственно. Такое управление зарядом напрямую влияет на напряжение пробоя прибора и на сегодняшний день является заданным технологическим фактором, который определяет ограничения, накладываемые на приборы компенсационного типа. Поэтому разработка таких приборов с ещё меньшим сопротивлением в открытом состоянии потребует совместного совершенствования отдельных процессов, используемых при их производстве.

В настоящее время для изготовления всех промышленно производимых приборов используется метод мультиэпитаксии. На **Рис. 3.137** представлена последовательность этапов данного процесса.

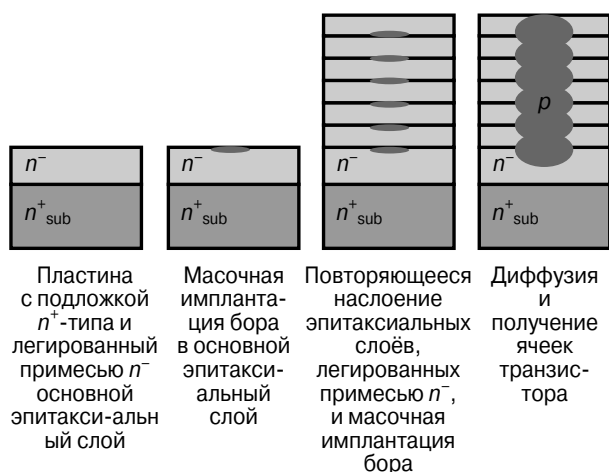


Рис. 3.137. Этапы изготовления столбчатой структуры компенсационного прибора методом мультиэпитаксии.

Характеристики компенсационных приборов

Отличительной особенностью компенсационных приборов является отсутствие взаимосвязи между напряжением пробоя и сопротивлением в открытом состоянии, которая существует в обычных МОП-транзисторах. Это достигается путём пространственного разделения p - и n -областей внутри ячейки транзистора. Уровни легирования обеих областей устанавливаются таким образом, чтобы в пределах точности изготовления заряды фактически уравнивались друг друга — взаимно компенсировались.

Если к прибору приложено блокирующее напряжение, то носители заряда выводятся из граничной зоны p - n -перехода в две легированные области. Вдоль столбчатой структуры формируется область пространственного заряда, создающая поперечно направленное поле. Оно выталкивает носители зарядов в p - и n -столбиках из области дрейфа с обеих сторон. Даже при относительно низких напряжениях (обычно менее 50 В) столбчатая структура полностью очищается от носителей заряда, а область пространственного заряда работает в качестве слоя с квазисобственной проводимостью

(см. **Рис. 3.138**). Как только вся столбчатая структура освободится от носителей заряда, продолжится увеличение обратного напряжения, сопровождаемое ростом вертикальной составляющей электрического поля в области пространственного заряда и вертикальным расширением области пространственного заряда в оставшуюся область дрейфа. В результате образуется поле, в котором вертикальные и горизонтальные составляющие скомпенсированы. Для получения максимально возможного напряжения пробоя в сочетании с наилучшими характеристиками в открытом состоянии, вертикальная и горизонтальная составляющие поля в идеальном случае должны иметь одну и ту же величину.

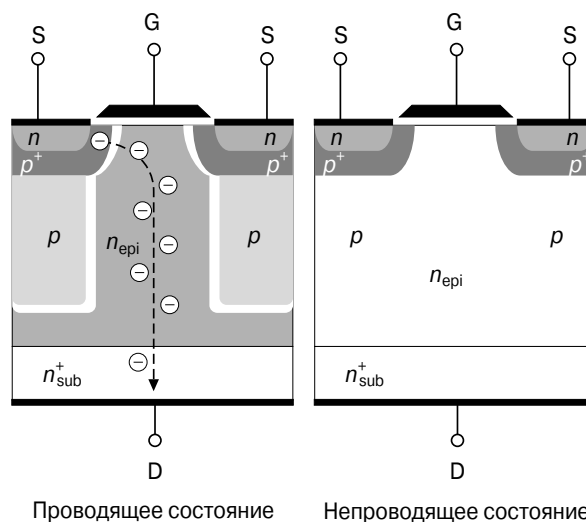


Рис. 3.138. Проводящее (слева) и непроводящее (справа) состояния компенсационного прибора.

Область пространственного заряда, образующаяся вдоль столбчатой структуры p - и n -областей при приложении обратного напряжения, позволяет получить существенные преимущества не только в закрытом состоянии, но и при включении и выключении. Поскольку p - и n -области полностью очищаются от носителей заряда при относительно низких обратных напряжениях, т.е. в самом начале процесса переключения, то уже через небольшой интервал времени создаётся зона пространственного заряда. Это приводит к сильно нелинейному характеру ёмкости сток — исток C_{DS} или выходной ёмкости C_{OSS} , потому что, в отличие от классических MOSFET, с ростом напряжения изменяется не только ширина зоны про-

пространственного заряда — площадь поверхности каждой p - и n -области тоже связана с напряжением сток — исток. Как только столбики p - и n -типа освободятся от зарядов при напряжении, примерно равном 50 В, выходная ёмкость снижается до величины, которая, из-за меньшей площади кристалла, очень мала и фактически не зависит от напряжения. Благодаря быстрому расширению зоны пространственного заряда в область столбиков n -типа, ёмкость затвор — сток (C_{GD}), или проходная ёмкость, тоже резко нелинейно изменяется при очень низких напряжениях около 50 В. При использовании компенсационного принципа можно значительно снизить ёмкость затвор — исток (C_{GS}) из-за уменьшения площади по сравнению с традиционными силовыми MOSFET. На **Рис. 3.139** представлены сравнительные зависимости ёмкостей транзистора от напряжения сток — исток для обычных MOSFET и транзисторов CoolMOS™, при этом блокирующее напряжение для обоих приборов составляет 600 В.

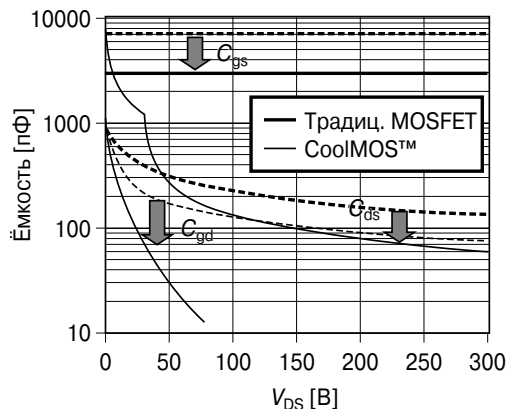


Рис. 3.139. Сравнение ёмкостей транзисторов CoolMOS™ и обычных транзисторов.

В тяжёлых ключевых режимах энергия, запасённая в выходной ёмкости C_{OSS} , конечно же, преобразуется в тепло; следовательно, чтобы оптимизировать потери на переключение, обязательно следует учитывать эту запасённую энергию. На **Рис. 3.140** представлена зависимость энергии, накапливаемой в ёмкости C_{OSS} , от напряжения сток — исток. Из-за относительно сильной зависимости ёмкостей от напряжения (более слабой для транзисторов CoolMOS™), которое обычно составляет от 350 до 420 В, энергия, накапливаемая в выходной ёмкости, уменьшается примерно на 50%.

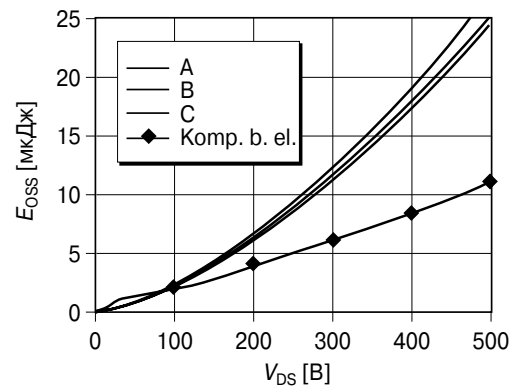


Рис. 3.140. Зависимость энергии E_{OSS} , запасаемой в выходной ёмкости транзистора CoolMOS™, от напряжения сток — исток в сравнении с различными стандартными транзисторами.

В резонансных схемах (здесь наиболее важной является схема со сдвигом фазы и коммутацией при нулевом напряжении) энергия, накапливаемая в выходной ёмкости, поступает из индуктивных элементов: в данном случае малое значение E_{OSS} помогает поддерживать резонансные условия для включения даже при очень малых токах. Кроме того, сильно нелинейная зависимость ёмкости от напряжения способствует коммутации тока из одного плеча моста в другое.

Конечно же, помимо ёмкостей, важное значение имеет скорость переключения, а также результирующее время перекрытия тока и напряжения. При выключении прибора прерывается поток электронов через МОП-канал. Когда это происходит, подвижные носители заряда в столбиках p - и n -типа движутся, как и токи дрейфа основных носителей заряда, к соответствующим контактным областям — p -карману, соединённому с истоком, и n^+ -подложке, соединённой со стоком на обратной стороне прибора. При этом носители заряда не пересекают зону пространственного заряда, в которой происходит нарастание напряжения. Другими словами, ток в приборе протекает в области, где нет падения напряжения, и, как следствие, он не вызывает тепловых потерь. Таким образом, скорость переключения, в основном, зависит от изменений заряда затвора, а, следовательно, от ёмкостей затвор — исток и затвор — сток, рассмотренных ранее, и от характеристик каскада управления затвором. Типичное время переключения находится в пределах от 5 до 7 нс.

Во время включения прибора зона пространственного заряда должна быть снова рассеяна путём нейтрализации заряженных доноров и акцепторов в p - и n -столбиках. Для этого используются электроны, образующие ток канала, и дырки, движущиеся вниз из p -кармана в столбик p -типа в виде тока дрейфа. Таким образом, высокие скорости переключения требуют низкоомного соединения и, как следствие, соответствующего подбора размеров и соединения отдельных имплантированных p -областей при производстве. Типичные значения времени переключения для этих приборов также составляют несколько наносекунд.

В результате, такие приборы компенсационного типа, как транзисторы CoolMOS™, являются самыми быстродействующими высоковольтными ключами на рынке. На **Рис. 3.141** приведены характеристики данных приборов при включении и выключении.

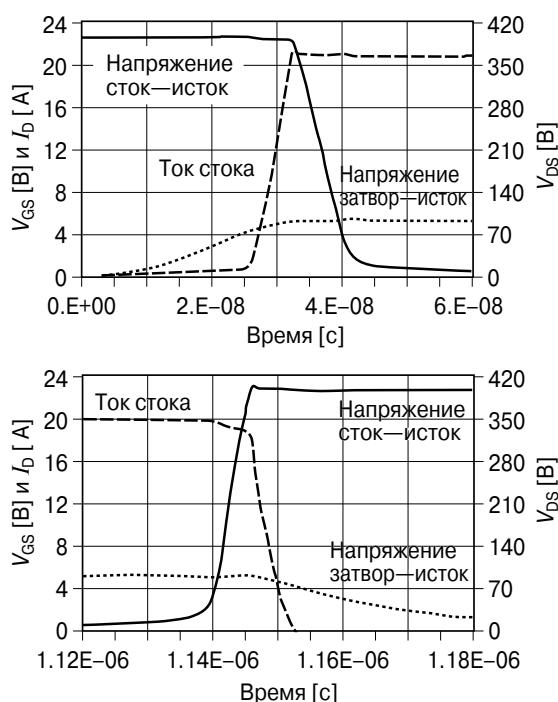


Рис. 3.141. Идеализированные характеристики включения и выключения 500-В транзистора CoolMOS™.

Следствием уменьшения площади прибора при использовании технологии CoolMOS является то, что плотность тока в данном приборе значительно выше, чем в обычном транзисторе. Это затрудняет выполнение требований по надёжности, на-

пример по способности проводить токи короткого замыкания. Вольт-амперная характеристика стандартного MOSFET при коротком замыкании характеризуется недостаточным насыщением тока, т.е. ток короткого замыкания растёт с увеличением напряжения сток — исток. Даже для средних уровней напряжения или для напряжения, примерно равного 400 В, которое является типичным для различных приложений, ток короткого замыкания превышает номинальный ток в семь раз. Таким образом, традиционные силовые MOSFET не обеспечивают удовлетворительной работы в режиме короткого замыкания, поскольку для безопасной работы прибора желательны небольшие значения токов.

Причиной того, что компенсационные приборы имеют значительно лучшие характеристики, является столбчатая структура p -областей, которая представляет собой вертикальный полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (JFET) с более ярко выраженной «полкой» тока на вольт-амперной характеристике при возрастающем напряжении. Поэтому ток короткого замыкания достаточно эффективно ограничивается и имеет почти постоянное значение во всей области безопасной работы. Транзистор CoolMOS™ выдерживает напряжение пробоя при токах, в три раза превышающих номинальный.

Теоретически, уменьшая зазор между p - и n -областями и в то же время увеличивая их степень легирования, можно постоянно снижать сопротивление прибора при неизменном напряжении пробоя. На самом деле, одним из факторов, ограничивающих снижение $R_{DS(on)}$, является процесс фотолитографии и управление процессом легирования p - и n -примесями. Другим фактором является то, что в структурах очень малой ширины описанный выше полевой транзистор с управляющим p - n -переходом ограничивает проводимость столбиков в открытом состоянии даже при очень низких напряжениях.

Некоторые области применения

Постоянное стремление к созданию более компактных импульсных источников питания, наряду со значительным увеличением плотности выходной мощности, привело к появлению двух основных требований, предъявляемых к силовым ключам:

высокая нагрузочная способность по току и малые потери при переключении.

Приборы компенсационного типа полностью удовлетворяют обоим этим требованиям. В результате они открывают новые возможности для компактных устройств. Это сказывается на импульсных источниках питания для серверов и систем связи, с постоянно увеличивающимися плотностями мощности, а также на устройствах, питающихся от батарей, в которых, например, зарядное устройство может быть встроено в вилку.

Более того, становится возможным совместить разные приборы в одном корпусе. Например, контроллер и силовой ключ могут быть совмещены в одном корпусе для получения интеллектуального устройства, так называемой «системы в корпусе». На **Рис. 3.142** представлен пример такой системы. Обычный прибор (показан слева) имеет потери 3 Вт и требует наличия средств охлаждения. Прибор на основе технологии CoolMOS™ (показан справа) имеет значительно меньшие потери, составляющие всего 1 Вт, и работает без дополнительного охлаждения.

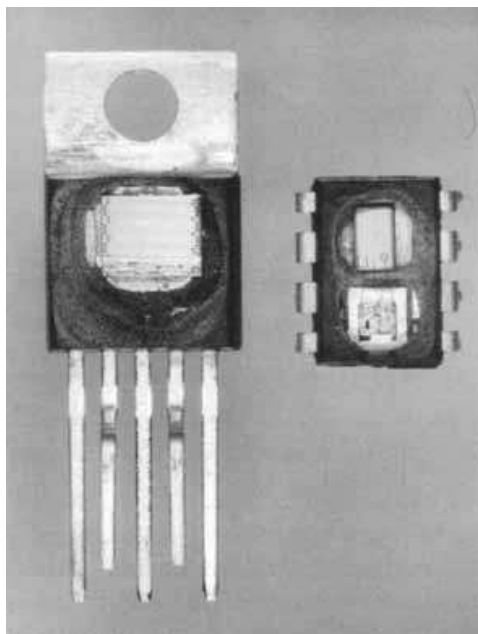


Рис. 3.142. Сравнение двух системных решений.

3.7.9. Карбид кремния — основа мощных приборов

Большинство производимых на сегодняшний день полупроводниковых приборов изготовлены на основе кремния. Он подходит для производства как однополярных, так и биполярных приборов. Однако при постоянно возрастающих требованиях к силовым полупроводниковым приборам, в которых должны сочетаться высокие блокирующие напряжения и высокие скорости переключения, приборы на основе кремния скоро достигнут пределов своих возможностей.

Поэтому, начиная с 90-х годов прошлого века, объектом исследований стали полупроводниковые приборы на основе карбида кремния (SiC). Первые SiC-диоды Шоттки появились на рынке в 2001 году. Благодаря значительно меньшим статическим и динамическим потерям эти приборы могут работать с более высокими по сравнению с приборами на основе кремния плотностями мощностей.

Физические характеристики

Кристаллическая решетка карбида кремния состоит из параллельных слоев атомов кремния и углерода. Из-за сильной электронной связи между обоими видами атомов материал имеет очень высокую механическую прочность. В этой решётке каждый атом кремния связан с четырьмя атомами углерода в тетраэдральную структуру, и наоборот. Из-за близкого расположения атома кремния по отношению к центру данной структуры появляются двойные слои из атомов кремния и углерода. В зависимости от взаимной ориентации и последовательности упаковки атомов этих сдвоенных слоёв получаются различные стабильные типы кристаллических структур — политипные модификации. Известно до 200 различных политипов, с различными параметрами материала (см. **Табл. 3.10**).

Кроме кубической и гексагональной структуры карбида кремния, которые являются наиболее распространенными, существуют различные промежуточные формы. Наиболее известными являются 3C-форма с кубической структурной решеткой и 4H- и 6H-формы с гексагональной решеткой. В данном случае числовой префикс обозначает количество атомных слоев внутри каж-

Таблица 3.10. Характеристики карбида кремния

Параметр	Si	GaAs	6H-SiC	4H-SiC
E_G , эВ	1.12	1.42	3.02	3.26
$E_{crit.}$, В/см	$3.0 \cdot 10^5$	$4.2 \cdot 10^5$	$25 \cdot 10^5$	$22 \cdot 10^5$
n_i , $1/\text{см}^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	$1.8 \cdot 10^6$	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-9}$
$v_{sat,n}$, см/с	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$
μ_n , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	1500	8500	400	1000
μ_p , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	450	400	101	115
ϵ_r	11.9	13.1	9.7	9.7

дой постоянно повторяющейся структуры. Таким образом, для каждой из этих форм существуют различные области применения. Материалы со структурой 6H преимущественно используются в оптоэлектронике, а карбид кремния 4H — в силовой электронике.

Свойства карбида кремния

Из-за своей очень плотной кристаллической решётки карбид кремния имеет большую ширину запрещённой зоны, чем кремний, и более высокую пробивную напряжённость электрического поля, что позволяет получить ту же блокирующую способность для более тонких слоев полупроводниковых материалов.

$$W_{\text{Drift}} = \frac{2V_{\text{BR}}}{E_{\text{crit}}}. \quad (1)$$

В то же время меньшая толщина слоёв позволяет увеличить концентрацию легирующей примеси, поэтому карбид кремния очень хорошо подходит для использования в однополярных полупроводниковых приборах.

$$N_{\text{Drift}} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E_{\text{crit}}^2}{2 \cdot q \cdot V_{\text{BR}}}. \quad (2)$$

Омическое сопротивление зоны дрейфа определяется толщиной зоны и степенью легирования или напряжением пробоя и максимальной напряжённостью электрического поля:

$$R_{\text{Drift}} = \frac{w_{\text{Drift}}}{A \cdot \mu_n \cdot q \cdot N_D^+} = \frac{4 \cdot V_{\text{BR}}^2}{A \cdot \mu_n \cdot \epsilon_s \cdot E_{\text{crit}}^3}. \quad (3)$$

При том же значении блокирующего напряжения карбид кремния имеет в 10 раз более высокую пробивную напряжённость электрического поля, чем кремний, что позволяет использовать на два порядка

меньшую степень легирования и снизить на порядок толщину активного слоя (Рис. 3.143). Таким образом, можно получить в 300 раз меньшие сопротивления зоны дрейфа.

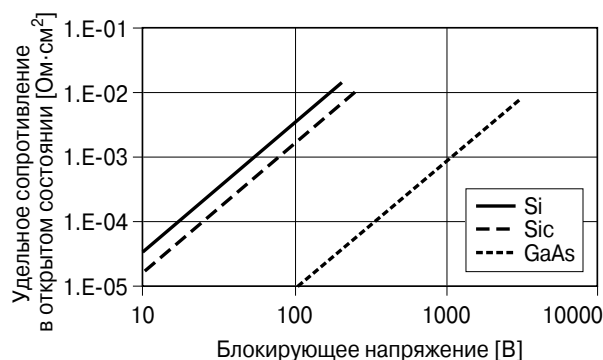


Рис. 3.143. Взаимосвязь между достижимым сопротивлением в открытом состоянии и блокирующим напряжением для различных материалов.

Следствием низкой концентрации собственных носителей заряда является то, что даже при очень высоких температурах обратные токи утечки очень малы. Таким образом, карбид кремния хорошо подходит для использования в приборах, работающих при высокой температуре окружающей среды. Кроме того, высокая теплопроводность обеспечивает хороший теплоотвод. Однако потенциал данных приборов пока не может использоваться полностью из-за ограничений в технологии сборки.

Приборы на основе карбида кремния

Меньшее сопротивление в открытом состоянии позволяет изготавливать диоды Шоттки, JFET и MOSFET с более высокими, чем ранее, блокирующими напряжениями. Они могут применяться в устройствах, работающих при более высоких напряжениях питания, в которых до недавнего времени использовались только биполярные

приборы на основе кремния. С появлением карбид-кремниевых приборов блокирующие напряжения, при которых следует переходить на применение биполярных кремниевых приборов, например $p-i-n$ -диодов и IGBT, увеличились более чем до 2000 В. При блокирующих напряжениях более 2 кВ сопротивление зоны дрейфа однополярного прибора, изготовленного из карбида кремния, также резко возрастает, поэтому необходима биполярная инжекция носителей зарядов. Из-за большей ширины запрещённой зоны диффузионное напряжение биполярных $p-n$ -переходов в карбиде кремния составляет примерно 2,7 В.

Почти все известные на сегодняшний день структуры карбидкремниевых приборов были вертикальными. В подложке такого прибора подвижность электронов всего на 20% ниже, чем в приборах на основе кремния. Однако непосредственно под поверхностью она сильно снижается из-за большой шероховатости поверхности, поэтому карбидкремниевые MOSFET с планарными затворами имеют очень большое сопротивление канала. В то же время, более высокие пробивные напряжённости электрического поля приводят к более значительным воздействиям на слой оксида затвора и снижают надёжность карбидкремниевых MOSFET.

В настоящее время для изготовления транзисторов на основе карбида кремния используются два различных подхода. С одной стороны, применяют UMOS- и VDMOS-структуры с вертикально или наклонно расположенным затвором, чтобы использовать более высокую подвижность носителей заряда в материале подложки. С другой стороны, при использовании структур IGBT и SIT можно полностью отказаться от слоя оксида затвора. Затвор будет встроен в прибор, и канал будет управляться шириной зоны пространственного заряда. Из-за своей канальной структуры эти приборы будут проводить ток без подачи управляющего напряжения на затвор. Такие приборы называются нормально открытыми. Однако на сегодняшний день в силовой электронике нормально открытые приборы почти не используются. Причиной является ограниченный выбор устройств управления, ненадёжность нормально закрытого состояния и связанный с этим большой риск, например, появления ко-

роткого замыкания плеча моста в мостовых схемах.

Скорость разработки карбидкремниевых приборов также определяется качеством подложки. Дорогие технологии испарения твердых веществ для производства подложек и соответствующая плотность дефектов (микротрубок или линейных дефектов) затрудняют увеличение диаметра полупроводниковых пластин. В середине 90-х годов прошлого века экономически целесообразным было производство пластин диаметров 1 дюйм.

Из-за постоянно растущих требований к материалам для устройств оптоэлектроники и силовой электроники, к 2000 году диаметр пластин смогли увеличить до 3 дюймов. Однако высокая плотность дефектов также ограничивает экономически целесообразную область применения этих приборов. Поэтому на рынке имеются приборы только с номинальным током в несколько ампер.

Карбидкремниевые диоды Шоттки

Диоды Шоттки были первыми промышленно производимыми приборами, изготовленными из карбида кремния. Они состоят из подложки, изготовленной из карбида кремния, на которой выращен эпитаксиальный слой полевой диафрагмы (Field Stop) и область базы, определяющая характеристики прибора. Переход Шоттки выполнен на поверхности с использованием подходящего металла. Краевая структура формируется методом имплантации (Рис. 3.144).

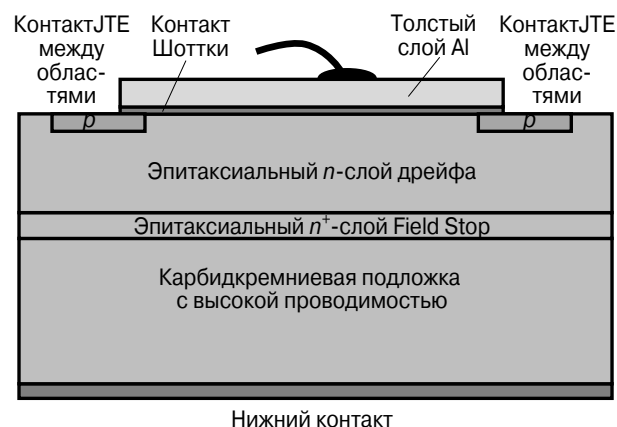


Рис. 3.144. Структура карбидкремниевых диодов Шоттки.

Переход Шоттки. Если соединить два материала с различной работой выхода электрона, например металл и полупроводник, то образуется так называемый гетеропереход. Работа выхода электрона (т.е. $q \cdot \Phi_u$) — это энергия, которую необходимо передать электрону, чтобы он покинул узел кристаллической решётки металла. При контакте двух материалов из-за разницы работ выхода возникает искривление границ энергетических зон в полупроводнике, и создаётся зона пространственного заряда. Если работа выхода электрона в металле больше, чем в полупроводнике, то в полупроводнике n -типа формируется переход Шоттки.

При приложении положительного напряжения снижается высота потенциального барьера и становится возможным протекание тока. В этом случае перенос заряда осуществляется только основными носителями (**Рис. 3.145**).

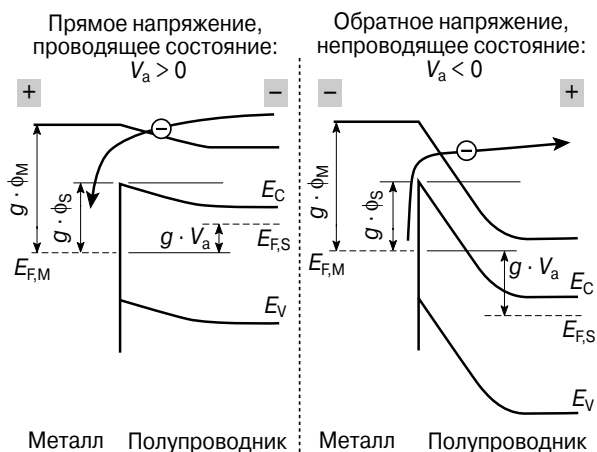


Рис. 3.145. Переход Шоттки при воздействии положительного и отрицательного напряжения.

Из-за ступенчатого нарастания энергии зоны проводимости на переходе, модель диффузионных токов больше не может применяться для описания переноса зарядов. Характер тока преимущественно определяется термоионной эмиссией. Ток начинает протекать, как только кинетическая энергия отдельных носителей заряда будет достаточной для того, чтобы преодолеть потенциальный барьер. Плотность тока определяется величиной потенциального барьера, внешним напряжением, температурой и

расчётной постоянной Ричардсона. Для полупроводников n -типа применимо следующее выражение:

$$j_n = \left(A^* \cdot T^2 \cdot e^{\frac{q \cdot \Phi_s}{k \cdot T}} \right) \cdot \left(e^{\frac{q V_a}{k \cdot T}} - 1 \right), \quad (4)$$

где A — постоянная Ричардсона.

Из выражений (3) и (4) следует, что для одной и той же технологии изготовления приборов получение высоких блокирующих напряжений и низких сопротивлений в открытом состоянии возможно только при использовании приборов с большей площадью. Но в то же время большая площадь поверхности приводит к возрастанию обратных токов утечки.

Статический режим работы. В настоящее время можно получить кремниевые диоды Шоттки с блокирующим напряжением до 200 В. При более высоких напряжениях значение обратных токов возрастает настолько резко, что приводит к появлению высоких тепловых потерь. Блокирующие напряжения до 250 В можно получить при использовании диодов Шоттки с объединённым электродом. Для уменьшения максимальной напряжённости электрического поля около поверхности эти приборы состоят из перехода Шоттки и сети областей с противоположными типами примесей. В то же время, при помощи инжекции носителей заряда обоих типов, снижено сопротивление диода при протекании сверхтоков. Для более высоких блокирующих напряжений обычно используются биполярные p - i - n -диоды. У этих диодов в проводящем состоянии область базы заполнена носителями заряда обоих типов, уменьшающими сопротивление прибора. Но поскольку в процессе выключения прибора это большое количество носителей заряда должно быть выведено из него, возникают большие задержки и потери при переключении.

При использовании карбида кремния блокирующее напряжение для униполярных диодов Шоттки намного выше. В частности, из-за большей пробивной напряжённости электрического поля и меньших обратных токов существует возможность расширить диапазон используемого напряжения для диодов Шоттки до 2000 В. При этом параметры диодов могут быть подобраны таким образом, что их статические характеристики будут близки к характери-

кам кремниевых диодов того же класса напряжения (Рис. 3.146).

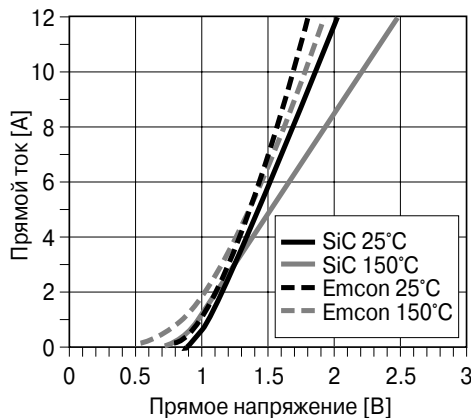


Рис. 3.146. Сравнение вольт-амперных характеристик кремниевых $p-i-n$ -диода (IDP06E60) с напряжением 600 В и карбидкремниевых диода Шоттки (SDP06S60).

Поскольку диоды Шоттки являются униполярными, они имеют положительный температурный коэффициент, облегчающий параллельное соединение. Для рассматриваемого в данном случае диода сопротивление зоны дрейфа увеличивается пропорционально $T(K)^{2.5}$, удваиваясь при изменении температуры от 25 до 125°C. Сопротивление зоны дрейфа при температуре 25°C составляет 40% от общего сопротивления прибора и возрастает при температуре 125°C до 70%. В то же время падение напряжения на барьере Шоттки снижается примерно на 1.6 мВ/К.

В соответствии с теорией термоионной эмиссии зависимость обратного тока от напряжения имеет экспоненциальный характер.

Если к прибору приложено рабочее напряжение порядка 400 В, то мы получим тепловую характеристику, сравнимую с аналогичной характеристикой кремниевых $p-i-n$ -диода. Если блокирующее напряжение увеличить до 600 В, то, хотя обратный ток будет примерно в 20 раз выше, чем у кремниевых диодов, из-за его малой величины эти потери будут намного меньше потерь в проводящем состоянии.

Динамические характеристики. Диоды Шоттки хорошо подходят для быстрой коммутации. Поскольку диоды Шоттки являются униполярными, ток в них переносится только электронами, при выключении не требуется рассеяние дополнительных заряженных частиц, прежде чем диод сможет

адаптироваться к обратному напряжению. Карбидкремниевый диод Шоттки ведёт себя как конденсатор с небольшой ёмкостью, зависящей от напряжения, поэтому потери, возникающие во время переключения, вызваны изменением заряда ёмкости. В этих приборах не существует выбросов обратного тока, в традиционном понимании, при нарастании напряжения можно увидеть только ток смещения (Рис. 3.147).

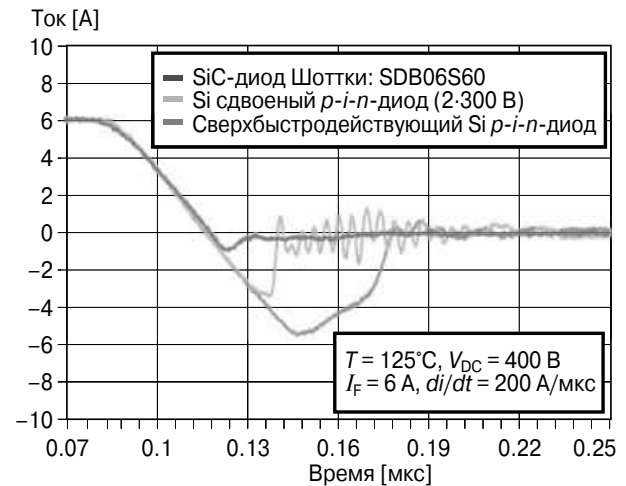


Рис. 3.147. Сравнение характеристик переключения карбидкремниевых диодов Шоттки и биполярных кремниевых диодов.

Напротив, в биполярных кремниевых диодах при выключении возникает значительный выброс обратного тока из-за чрезмерного количества носителей заряда, которые должны быть рассеяны. Этот выброс сильно зависит от прямого тока, скорости выключения и температуры прибора. С другой стороны, характеристики выключения карбидкремниевых диодов Шоттки почти совсем не зависят от прямого тока и температуры.

Применение карбидкремниевых диодов Шоттки

С одной стороны, характеристики карбида кремния позволяют изготавливать быстро переключающиеся приборы с высокими блокирующими напряжениями. С другой стороны, дорогостоящие методы изготовления и количество дефектов, которое ещё достаточно велико по сравнению с приборами на основе кремния, ограничивают экономически целесообразную область применения этих приборов, в результате они могут работать в диапазоне токов

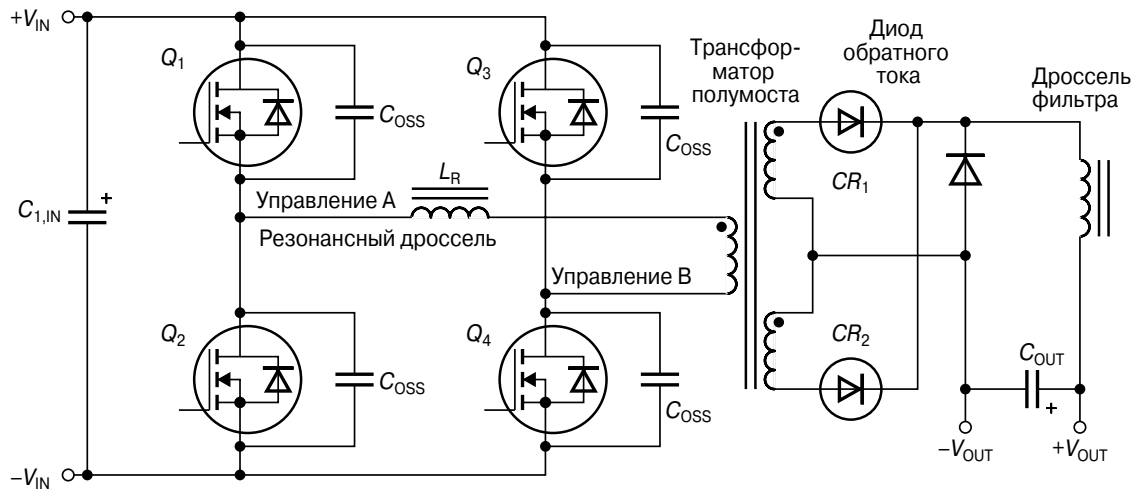


Рис. 3.148. Применение SiC-диодов Шоттки для выпрямления вторичного напряжения.

до нескольких ампер. Таким образом, привлекательным является использование данных приборов в устройствах с напряжением более 300 В и диапазоном мощностей от 100 Вт до нескольких киловатт. Рассмотрим примеры применения.

В диапазоне напряжений от 250 до 300 В диоды Шоттки используются, главным образом, для выпрямления напряжения на вторичной стороне 48-В источников питания для систем связи (Рис. 3.148). В данном случае могут использоваться диоды Шоттки, изготовленные как из арсенида галлия, так и из карбида кремния.

Оба типа диодов имеют низкие потери на переключение. Однако арсенид галлия обладает меньшей теплопроводностью и более высоким температурным коэффициентом, чем карбид кремния, поэтому система с карбидкремниевыми приборами имеет меньшие статические потери (Рис. 3.149).

Карбидкремниевые диоды Шоттки с напряжением 600 В используются преимущественно в каскадах ККМ (корректор коэффициента мощности) современных импульсных источников питания. Источники питания с выходной мощностью более 75 Вт в обязательном порядке должны содержать устройство коррекции коэффициента мощности. По существу, это повышающий преобразователь, который распределяет энергию, полученную из питающей сети, в виде модулированного сигнала, соответствующего форме питающего напряжения (Рис. 3.150).

В результате снижается амплитуда импульсов помех, уменьшаются коэффициент гармоник и реактивная мощность. Раз-

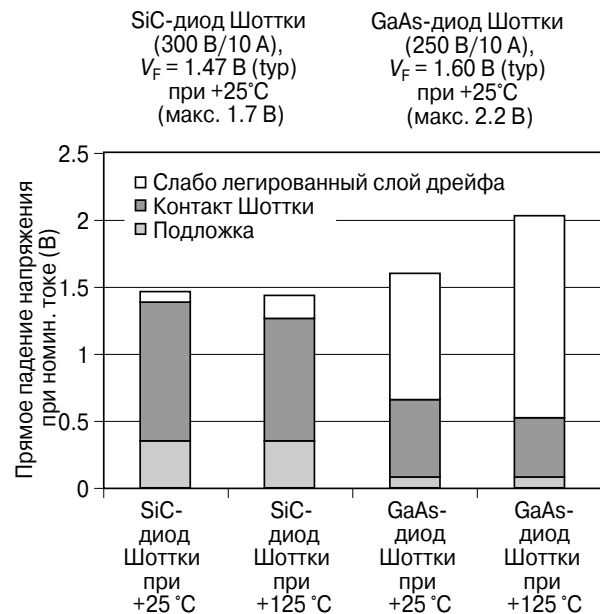


Рис. 3.149. Распределение прямого падения напряжения в SiC- и GaAs-диодах Шоттки.

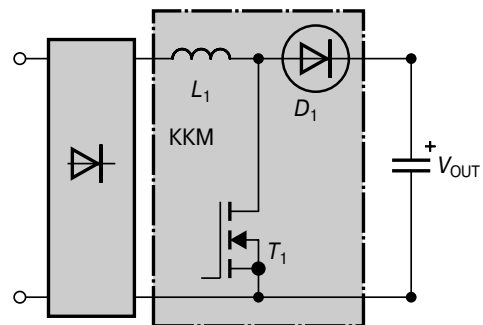


Рис. 3.150. Пример использования карбидкремниевых диодов в схеме ККМ.

личают режим непрерывного тока (Continuous Current Mode — CCM) и режим прерывистого тока (Discontinuous Current Mode — DCM). Несмотря на то что наибольшие динамические нагрузки на компоненты возникают при работе в режиме непрерывного тока, КПД и надёжность устройства при этом увеличиваются. Кроме того, при увеличении частоты переключения можно уменьшить размеры пассивных компонентов (Рис. 3.151).

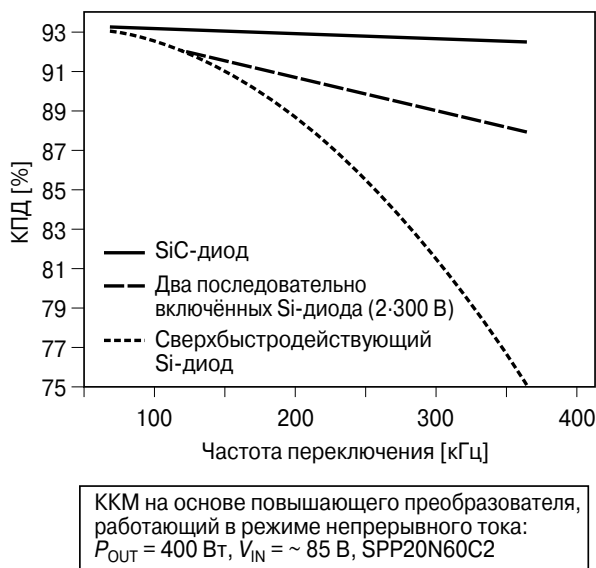


Рис. 3.151. Эффективность использования различных типов диодов в каскаде ККМ.

Диоды Шоттки на основе карбида кремния чрезвычайно хорошо подходят для данной области применения, поскольку их низкие статические и динамические потери позволяют использовать ключевые транзисторы меньших размеров, увеличить частоту переключения и, как следствие, способствуют дальнейшей миниатюризации.

Быстродействующие диоды на напряжение 1200 В применяются, главным образом, в устройствах управления электродвигателями и в блоках импульсных источников питания большой мощности, например в источниках бесперебойного питания (ИБП) для серверов (Рис. 3.152). Поскольку подавляющее большинство ИБП имеет схему удвоения напряжения на стороне сети, для них требуются диоды на напряжение 1200 В.

На сегодняшний день применение биполярных кремниевых диодов позволяет получить частоту переключения 20 кГц. При

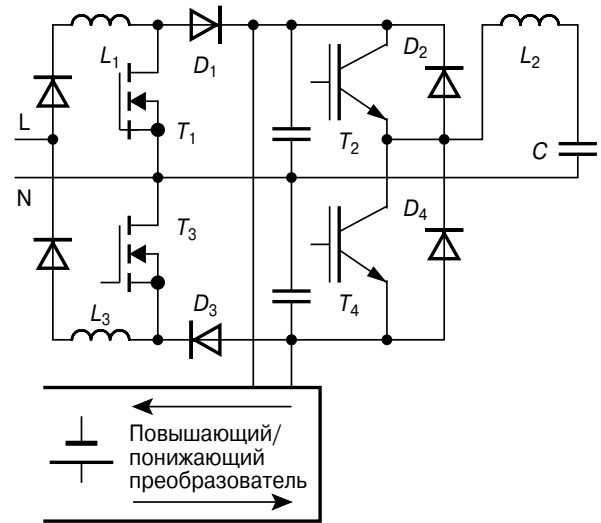


Рис. 3.152. Пример схемы ИБП.

использовании карбидкремниевых диодов Шоттки на напряжение 1200 В можно снизить динамические потери и увеличить частоту переключения, а также уменьшить размеры пассивных компонентов.

Карбидкремниевые транзисторы

По существу, из карбида кремния делают два типа транзисторов: MOSFET и JFET. То, что до недавнего времени карбидкремниевые MOSFET были не конкурентоспособны по сравнению с кремниевыми, хотя они являются нормально закрытыми (работают в режиме обогащения), обусловлено малой подвижностью канала планарной структуры затвора в карбиде кремния и неопределённостью в отношении прочности слоя оксида затвора при приложении электрических полей с высокой напряжённостью. В отличие от MOSFET, транзистор JFET на основе карбида кремния является нормально открытым (работает в режиме обеднения) и не имеет подзатворного оксида. Используя каскодную схему, состоящую из карбидкремниевого JFET и кремниевого MOSFET с низким блокирующим напряжением, можно создать схему с нормально закрытой характеристикой (Рис. 3.153). В данном случае конструирование по гибридной технологии едва ли требует больших затрат, чем при однокристалльной сборке.

Статические характеристики. Простейшая структура карбидкремниевого JFET, представленная на Рис. 3.153, имеет горизонтальный канал, который управляется верхним затвором и скрытым затвором.

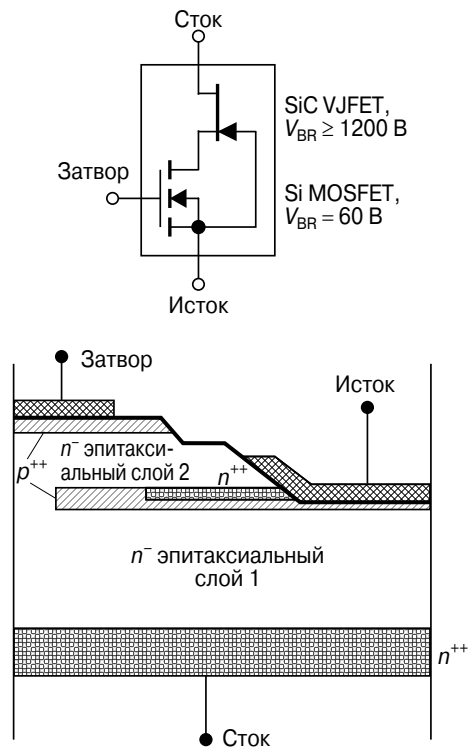


Рис. 3.153. а — гибридная каскодная схема, состоящая из карбидкремниевого JFET и кремниевого MOSFET; б — структура карбидкремниевого JFET.

В этом случае сопротивление канала со стороны истока уменьшается при помощи дополнительной имплантации n -типа. Основной ток протекает вертикально вниз к выводу стока, расположенному на обратной стороне кристалла. Прямое соединение с выводом затвора на верхней стороне кристалла позволяет избежать появления больших сопротивлений вывода затвора. Для блокирующих напряжений 1500 В такая конфигурация позволяет получить сопротивление в открытом состоянии на единицу площади не более $15 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$.

Динамические характеристики. Благодаря подходящим свойствам карбида кремния как основного материала, динамические характеристики каскодного включения с JFET, изготовленным из карбида кремния, главным образом определяются характеристиками кремниевого MOSFET. Чтобы гарантировать надёжное выключение JFET-каскадов, блокирующее напряжение кремниевого MOSFET должно быть больше, чем напряжение отсечки канала карбидкремниевого JFET. Выходная ёмкость карбидкремниевого JFET-каскада резко падает в точке, соответствующей напряже-

нию отсечки карбидкремниевого JFET. При напряжениях ниже напряжения отсечки JFET, зависимость ёмкости от напряжения определяется ёмкостью исток — сток кремниевого MOSFET (Рис. 3.154).

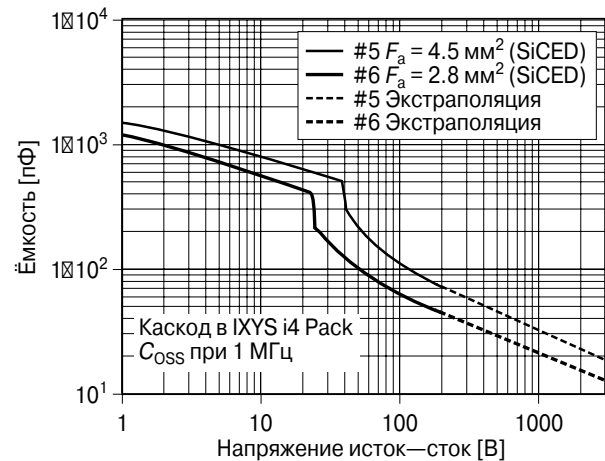


Рис. 3.154. Влияние различных площадей поверхности кристалла на выходную ёмкость 1500-В карбидкремниевого JFET-каскада.

Эту зависимость также можно наблюдать по характеристикам отключения карбидкремниевого JFET-каскада. Используя MOSFET разного поколения, можно наглядно показать влияние различных времён задержки на характеристику тока при отключении (Рис. 3.155).

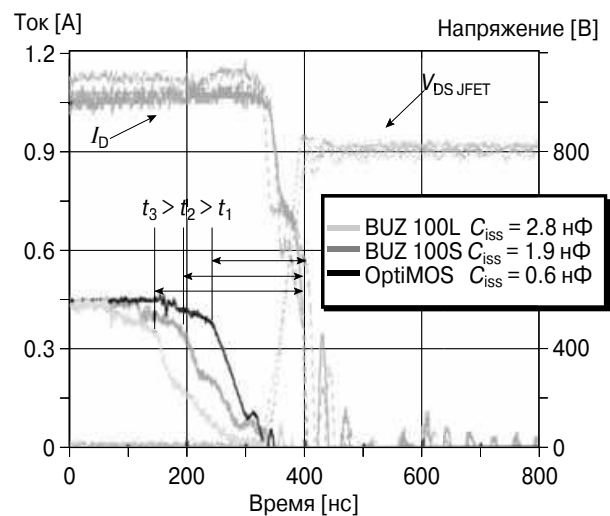


Рис. 3.155. Влияние различных типов кремневых MOSFET на характеристики переключения 1500-В карбидкремниевого JFET-каскада.

Таким образом, карбидкремниевый JFET-каскод позволяет получить малые времена переключения при больших блокирующих напряжениях, сравнимые с временами переключения кремниевых MOSFET, имеющих значительно меньшее блокирующее напряжение.

Применение карбидкремниевых JFET-каскадов

Классической областью применения униполярных высоковольтных приборов являются вспомогательные источники питания для устройств управления электродвигателями, в которых используются современные кремниевые MOSFET на напряжение 1500 В. Эти транзисторы можно заменить карбидкремниевыми JFET-каскадами без изменения топологии схемы.

Кроме того, поскольку исторически получение дешёвых высоковольтных транзисторов было затруднительно, были изобретены мостовые схемы, в которых применялись несколько транзисторов с блокирующим напряжением, составляющим половину или даже менее от требуемого. Например, градиент напряжения на транзисторе в схемах с одним ключом обычно в 2...3 раза больше входного напряжения, и, таким образом, требуются мощные ключи со значительно более высоким номинальным напряжением. При увеличении блокирующего напряжения традиционного кремниевое силового MOSFET увеличивается его сопротивление в открытом состоянии, что является причиной низких КПД.

$$R_{\text{Drift}} = \frac{4 \cdot V_{\text{BR}}^2}{A \cdot \mu_n \cdot \epsilon_s \cdot E_{\text{crit}}^3} = \frac{5.93 \cdot 10^{-9}}{A} \cdot V_{\text{BR}}^{2.5} (\text{Si}). \quad (5)$$

Наиболее предпочтительной из всех одноключевых схем является резонансная схема прямоходового преобразователя, которая до сих пор использовалась только для мощностей менее 40 Вт. В отличие от кремниевых транзисторов, лучшие свойства карбида кремния позволяют получить силовые транзисторы с сопротивлением в открытом состоянии порядка 0.5 Ом и блокирующим напряжением 1500 В, что может расширить область применения данных схем до мощностей 1500...2000 Вт.

По сравнению с традиционными решениями это означает, что появляется возможность замены двух или четырёх 600-В

MOSFET всего одним карбидкремниевым ключом; таким образом, можно уменьшить сложность схемы и увеличить удельную мощность (Рис. 3.156).

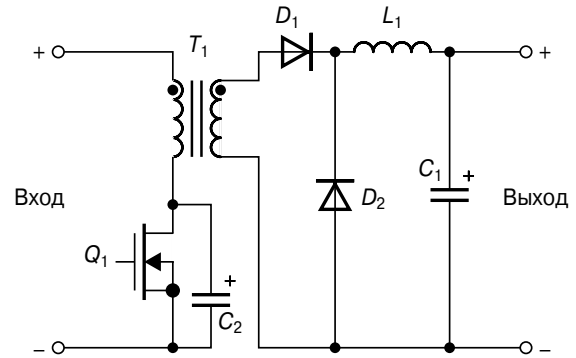


Рис. 3.156. Эквивалентная схема одноключевого резонансного прямоходового преобразователя всего с одним 1500-В транзистором.

Поэтому на рынке силовой электроники постоянно увеличивается доля карбидкремниевых приборов. По сравнению с кремниевыми приборами, они имеют меньшие размеры и обеспечивают снижение потерь. С учётом низкой собственной концентрации носителей заряда карбидкремниевые приборы также хорошо подходят для применения при высоких температурах. Но из-за ограничений, накладываемых сборочным производством, на сегодняшний день может быть использован не весь потенциал этих приборов. Приведённые примеры показывают, что хотя номинальные токи, которые могут быть получены при использовании карбида кремния, до сих пор ограничивают применение данных приборов в силовой электронике, они, тем не менее, полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к диодам и транзисторам в импульсных источниках питания.

3.7.10. Высоковольтные мощные IGBT

В современной силовой электронике биполярным аналогом MOSFET являются IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor — биполярный транзистор с изолированным затвором), которые, главным образом, используются в электроприводах. Типичное применение дискретных IGBT — контроль скорости вращения барабана стиральных машин или системы кондиционирования воздуха; более мощные IGBT-модули используются в тяговых электроприводах, на-

пример в приводах двигателя локомотива. В данном разделе будет приведено описание различных технологий изготовления IGBT, начиная с фундаментальных отличий от приборов MOSFET до рассмотрения новой технологии Field-Stop компании Infineon, технологического лидера в этой области.

IGBT или MOSFET

Как и MOSFET, IGBT также является полевым транзистором с изолированным затвором. Следовательно, он отпирается подачей положительного напряжения затвор — эмиттер, как только напряжение достигнет порогового значения для МОП-канала, и p - n -переход на стороне анода будет смещён в прямом направлении. Как и в конденсаторе, около электрода затвора накапливается заряд, и при помощи собственного электрического поля этот заряд создаёт канал между затвором и p -слоем IGBT. Для отключения IGBT к его затвору прикладывается нулевое напряжение, чтобы он смог разрядиться, после чего канал закроется.

Рассматривая структуру ячеек обоих приборов, можно не заметить значительной разницы. В обоих случаях затвор изолирован при помощи поликристаллического кремния. В силовых приборах с вертикальной структурой вывод истока (MOSFET) или вывод эмиттера (IGBT) расположен наверху кристалла, а вывод стока (MOSFET) или коллектора (IGBT) — на задней стороне.

Основное отличие в работе приборов вызвано наличием дополнительного слоя p -типа в нижней части структуры IGBT. В открытом состоянии электронный ток протекает через зону базы по направлению к нижней части p - n -перехода, вызывая там инжекцию неосновных носителей заряда в зону дрейфа. Электронно-дырочная плазма, являющаяся неотъемлемой частью зоны базы, приводит к значительному снижению сопротивления прибора.

Таким образом, в отличие от униполярного MOSFET, IGBT относится к биполярным приборам. Ток в нём создаётся как основными (электроны), так и неосновными (дырки) носителями заряда. MOSFET является униполярным прибором, в котором, когда он находится во включённом состоянии, ток создается только основными носителями заряда. На **Рис. 3.157** и **Рис. 3.158** показаны сечения MOSFET и вертикально-

го силового IGBT соответственно, а также различия в технологии их изготовления.

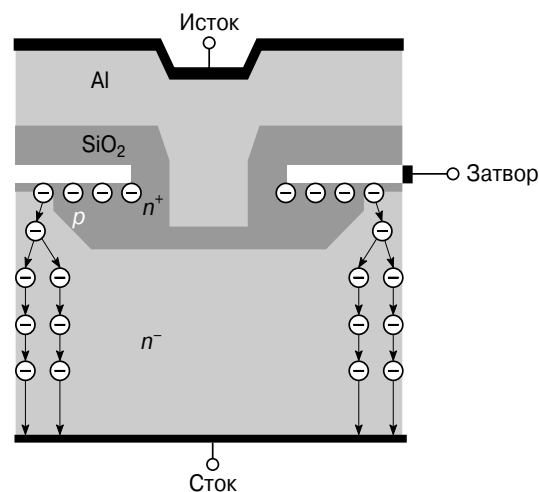


Рис. 3.157. Поперечное сечение MOSFET.

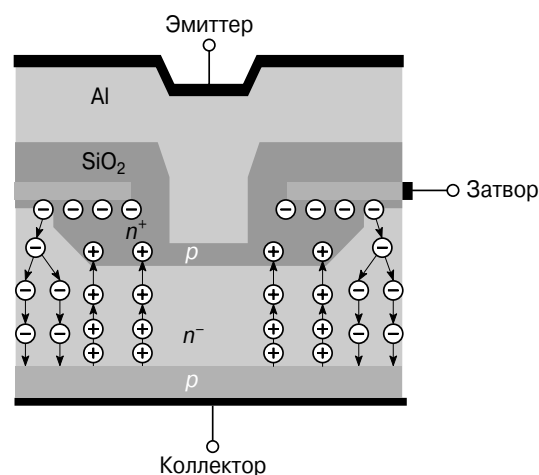


Рис. 3.158. Поперечное сечение IGBT.

Характеристики IGBT во многом определяются его биполярной природой. В то время как вольт-амперная характеристика MOSFET во включённом состоянии по существу описывается только сопротивлением $R_{DS(on)}$, для IGBT она проявляет диодный характер с участком насыщения и характеризуется напряжением излома и дифференциальным сопротивлением (см. **Рис. 3.159**).

Кроме того, IGBT обладает отличными от MOSFET характеристиками переключения, которые представлены на **Рис. 3.160**.

При выключении IGBT характеризуется медленно спадающими хвостовыми токами, вызванными выводом и рекомбинацией запасённой электронно-дырочной плазмы, которая должна быть полностью выве-

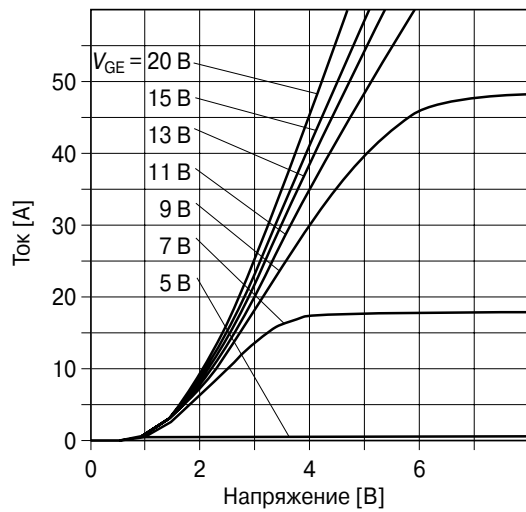


Рис. 3.159. Выходные характеристики IGBT.

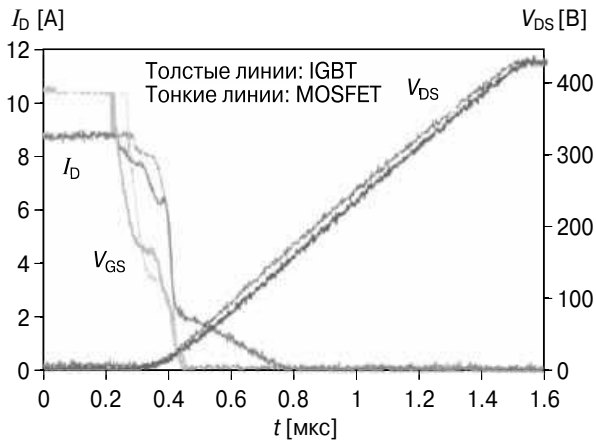


Рис. 3.160. Характеристики переключения IGBT и MOSFET.

дена из прибора. В отличие от IGBT, в MOSFET этот эффект не проявляется из-за его униполярной структуры, в результате чего он имеет меньшие потери при выключении. Характеристики процесса включения аналогичны для обоих типов приборов.

PT- и NPT-технологии изготовления IGBT

Задачей производителей полупроводниковых приборов является оптимизация потерь в IGBT — либо сокращение времени протекания хвостового тока в процессе выключения, либо минимизация прямого падения напряжения.

На сегодняшний день на рынке представлены две различные структуры: IGBT со смыканием (PT (punch through) IGBT) и IGBT без смыкания (NPT (non punch through) IGBT). Поперечные сечения этих

устройств представлены на Рис. 3.161 и Рис. 3.162 соответственно. В принципе, структуры ячеек приборов аналогичны, различие заключается в подструктуре прибора.

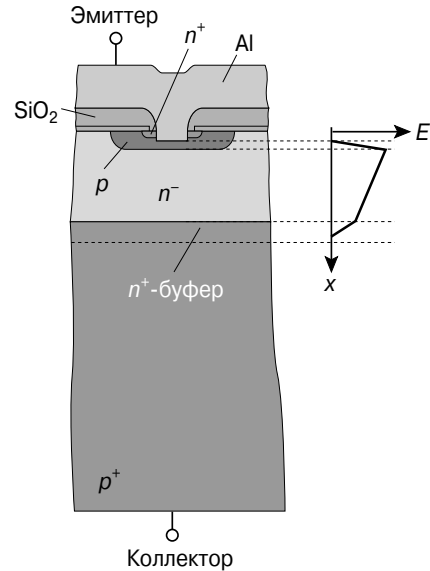


Рис. 3.161. PT-технология.

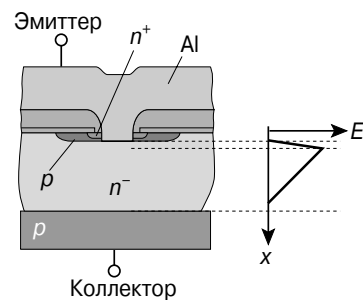


Рис. 3.162. NPT-технология.

На обратной стороне PT IGBT имеет очень «сильный» эмиттер (p - n - p -транзистора, для IGBT он является коллектором), что в проводящем состоянии приводит к заполнению прибора неосновными носителями заряда. В закрытом состоянии электрическое поле имеет трапецеидальное распределение и снижается до нуля в сильно легированной буферной n^+ -области. Как следствие, n^- -слой может изготавливаться очень тонким. Это обуславливает низкое падение напряжения в открытом состоянии, следовательно, минимальные потери. Однако высокая концентрация дырок и электронов, когда прибор находится в открытом состоянии, приводит к появлению больших и затянутых хвостовых токов при выключении. Электронно-дырочная плазма должна быть полностью выведена из

прибора до того, как он полностью закроется. Концентрацию носителей можно понизить легированием примесью, уменьшающей время жизни носителей заряда, однако данный метод имеет один недостаток — более высокие потери в открытом состоянии.

В отличие от РТ-структуры, в NPT-структуре эмиттер (p - n - p -транзистора) имеет очень слабую эмиссионную способность. Пока прибор находится во включённом состоянии, он не так сильно заполнен неосновными носителями заряда, что значительно снижает потери при выключении. Однако, когда прибор находится в закрытом состоянии, электрическое поле имеет треугольное распределение и должно полностью рассеиваться в толстой n -области. Недостатком данной структуры являются большие потери в проводящем состоянии.

Поскольку уровень потерь влияет на выбор прибора для каждого конкретного применения, можно предложить следующие критерии выбора:

- максимальное напряжение, возникающее на приборе, плюс коэффициент запаса (обычно 20%);
- токовая нагрузка должна лежать в пределах области безопасной работы прибора (SOA);
- корпус должен удовлетворять стандартным требованиям по трекингу (утечке тока) и искровым промежуткам;
- температура перехода кристалла должна находиться в заданных пределах.

Первые три критерия не требуют вычислений, но при определении температуры кристалла необходимо сначала рассмотреть тепловой режим устройства, а затем рассчитать тепловые потери в приборе.

Расчёт потерь в IGBT

В качестве первого шага при определении, находится ли температура кристалла выбранного IGBT в заданных пределах, следует рассмотреть условия окружающей среды, в которых работает устройство.

Максимально допустимые тепловые потери в IGBT определяются температурой окружающей среды и условиями охлаждения наряду с максимально допустимой температурой кристалла прибора:

$$P_{\max} = \frac{T_{J(\max)} - T_A}{R_{thJA}}.$$

Однако сложнее всего вычислить ожидаемые потери в IGBT при работе в конкретном устройстве.

Потери в IGBT можно разделить на три составляющие: потери на проводимость в открытом состоянии (P_{cond}), потери на переключение (P_{switch}) — сумма потерь при включении и выключении — и статические потери (P_{Leakage}), вызванные протеканием токов утечки, которые в общем случае могут не учитываться, так как их влияние мало:

$$P_{\text{Leakage}} = I_{\text{CES}}(V_{\text{CE}}, T_j) \cdot V_{\text{CE}} \cdot D,$$

где D — коэффициент заполнения импульсов управления.

Таким образом:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{cond}} + P_{\text{switch}}.$$

Потери проводимости легко рассчитать, так как они определяются только семейством выходных характеристик IGBT (которые приведены в спецификации) и рабочим током устройства.

Выходные характеристики могут быть аппроксимированы двумя отрезками прямыми, что почти не влияет на точность полученных результатов (Рис. 3.163).

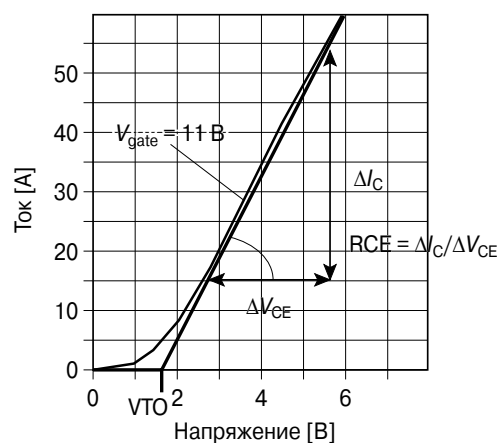


Рис. 3.163. Построение аппроксимирующих отрезков выходной характеристики IGBT.

Для тока трапецеидальной формы потери на проводимость могут быть рассчитаны следующим образом:

$$P_{\text{cond}} = D \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot VTO \cdot (K_{\min} \cdot i_{\text{peak}} + i_{\text{peak}}) + \frac{1}{3} \cdot RCE \cdot \left[(K_{\min} \cdot i_{\text{peak}})^2 + K_{\min} \cdot i_{\text{peak}}^2 + i_{\text{peak}}^2 \right] \right].$$

С другой стороны, расчёт потерь на переключение затруднён из-за того, что они зависят от напряжения коллектор — эмиттер, от тока коллектора, и также от внешнего сопротивления затвора. Эти соотношения можно взять из спецификации в качестве основы для расчётов. Но точно рассчитать потери на переключение невозможно, так как паразитные параметры можно учесть только для конкретной испытательной схемы и то частично.

Согласно спецификации потери на переключение могут быть рассчитаны следующим образом:

$$P_{\text{switch}} = \left[E_{\text{on}}(I_C) \cdot \frac{E_{\text{on}}(R_{G,\text{user}})}{E_{\text{on}}(R_{G,\text{datasheet}})} \cdot \frac{V_{\text{DC,user}}}{V_{\text{DC,datasheet}}} + E_{\text{off}}(I_C) \cdot \frac{E_{\text{off}}(R_{G,\text{user}})}{E_{\text{off}}(R_{G,\text{datasheet}})} \cdot \frac{V_{\text{DC,user}}}{V_{\text{DC,datasheet}}} \right] \cdot f.$$

Соотношение между потерями на переключение и напряжением коллектор — эмиттер можно представить в виде линейной функции.

Для того чтобы выбранный IGBT удовлетворял предъявляемым требованиям, общие потери в нём должны быть меньше максимально допустимых потерь, определяемых температурой окружающей среды:

$$P_{\text{max}} \geq P_{\text{tot}}.$$

Чтобы сделать оптимальный выбор, необходимо найти IGBT, удовлетворяющий данному условию.

Компромиссы при выборе IGBT

Выбор подходящего IGBT для конкретного приложения осложняется многообразием технологий их изготовления и стратегией оптимизации.

В то время как целью при выборе MOSFET является подбор наименьшего возможного сопротивления $R_{\text{DS(on)}}$, при выборе IGBT, изготовленных по одной технологии, существует возможность изменения соотношения между потерями на переключение (хвостовой ток) и потерями в открытом состоянии ($V_{\text{CE(sat)}}$). В зависимости от требуемой частоты переключения выбирается либо IGBT с минимальными потерями на переключение, либо с минимальными потерями в открытом состоянии.



Рис. 3.164. Компромиссы при оптимизации IGBT.

На Рис. 3.164 представлены различные технологические подходы при оптимизации, учитывается дополнительный параметр — время короткого замыкания. На практике, соотношение между потерями на переключение и потерями в открытом состоянии устанавливается степенью легирования эмиттера на обратной стороне подложки (p -область).

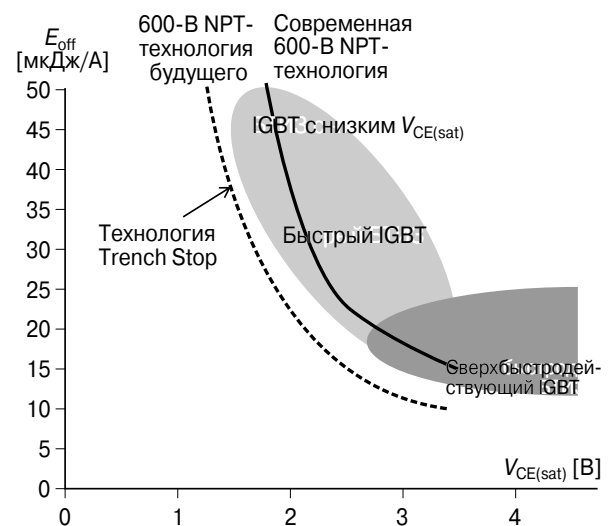


Рис. 3.165. Оптимизационная характеристика для различных технологий изготовления IGBT компании Infineon.

На Рис. 3.165 представлены зависимости энергии потерь на переключение от напряжения насыщения коллектор — эмиттер для транзисторов с блокирующим напряже-

нием 600 В компании Infineon Technologies. Сплошная линия соответствует трём NPT IGBT, оптимизированным для различных приложений: сверхбыстродействующим IGBT для очень высоких частот переключения, быстродействующим IGBT и IGBT с низким напряжением V_{CEsat} для низких частот переключения. Пунктирной линией представлена новая технология изготовления IGBT — технология Field Stop. Обе кривые располагаются параллельно, но IGBT, сделанные по новой технологии, имеют меньшие потери как на переключение, так и в открытом состоянии.

IGBT, изготовленные по технологии Field Stop (FS) или Trench Stop (TS)

Технология Field Stop для транзисторов с напряжением 600 В является эволюцией NPT-технологии. На **Рис. 3.166** представлено поперечное сечение прибора, изготовленного по данной технологии. Первое значительное отличие заключается в структуре ячеек, которые имеют вертикальную, а не планарную структуру. Достоинством кон-

струкции такого типа является большее накопление носителей заряда в верхней части кристалла и, как следствие, более равномерное распределение носителей заряда вдоль прибора. Для потребителя это означает, что прибор имеет меньшее напряжение насыщения и более низкие потери в проводящем состоянии.

Второе отличие заключается в подструктуре, в которой находится n^- -слой. С первого взгляда эта структура очень похожа на РТ-структуру, но существуют и значительные отличия. В ней совмещены преимущества двух известных технологий: трапецеидальное распределение электрического поля в выключенном состоянии, что позволяет использовать более тонкий n^- -слой и, как следствие, получить меньшие потери в проводящем состоянии, и «слабый» эмиттер на обратной стороне подложки, что позволяет получить меньшие потери при выключении, а, следовательно, и меньшее время протекания хвостового тока при выключении.

Поскольку FS-слой является слабо легированным, его основная функция — снижение электрического поля до нуля в выключенном состоянии. В открытом состоянии он не влияет на эмиттер, расположенный на обратной стороне, таким образом, последний может иметь тонкую структуру.

Для этого высокоомная подложка со сформированной лицевой стороной стачивается до толщины 70 мкм. На обратной стороне пластины с помощью ионной имплантации формируется дополнительный слой n -типа. Результирующее распределение электрического поля вдоль поперечного сечения IGBT имеет почти прямоугольную форму. Как и в случае РТ-технологии, это позволяет уменьшить толщину зоны дрейфа.

Из-за использования высокоомной подложки зона дрейфа освобождается от носителей заряда при напряжениях (примерно 100 В), значительно меньших напряжения пробоя. В результате хвостовой ток срезается, поэтому общие потери определяются следующим образом:

$$P = \int V(t) \cdot I(t) dt.$$

Эти потери будут значительно ниже, чем в стандартном NPT-приборе, в котором хвостовые токи появляются при более высоких напряжениях.

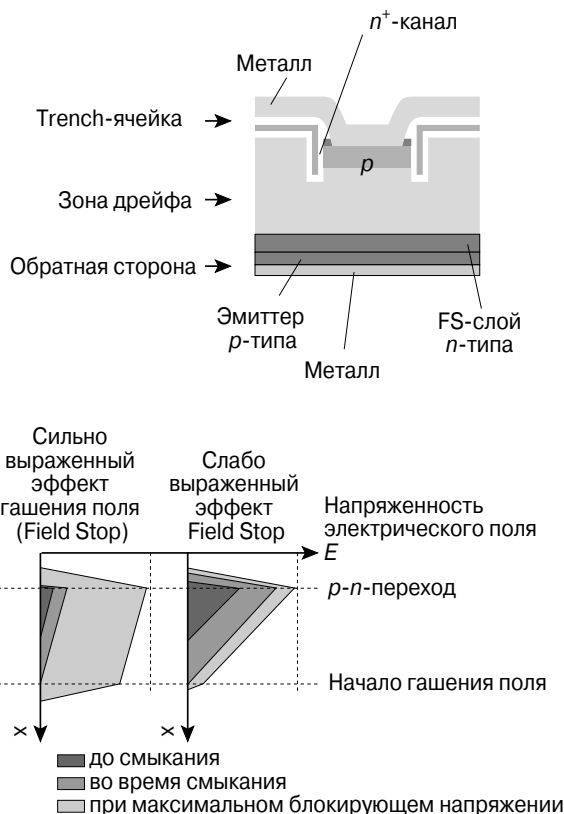


Рис. 3.166. Технология FS в ячейках с вертикальным каналом.

Таблица 3.11. Сравнение различных типов IGBT

	PT IGBT	NPT IGBT	FS IGBT
Эмиттер p -типа	Высокоэффективный	Менее эффективный	Менее эффективный
Слой n^-	Тонкий	Средний	Тонкий
Дополнительный n -слой	Сильно легированный буферный слой Снижает эффективность эмиттера Снижает электрическое поле до нуля	Нет	Слабо легированный FS-слой Снижает электрическое поле до нуля
Время жизни носителей заряда	Короткое	Длинное	Длинное

Ещё одним результатом использования данной технологии является возможность снижения на одну треть толщины 1200-В прибора по сравнению с точно таким же прибором, изготовленным по NPT-технологии с тонкой подложкой. Это означает, что толщина уменьшается с 175 до 120 мкм.

В Табл. 3.11 суммированы различия в технологиях изготовления IGBT.

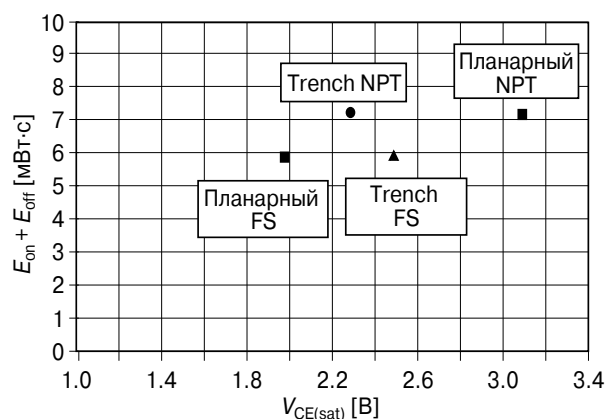


Рис. 3.167. Общие потери на переключение приборов, изготовленных по NPT- и FS-технологии.

Из Рис. 3.167 ясно видно преимущество совместного использования технологии

Field Stop и ячейки с вертикальным каналом — появляется возможность значительного снижения потерь в проводящем состоянии и потерь на переключение.

Заключение

Сравнение IGBT и MOSFET выявило значительные различия в механизме потерь. Благодаря переносу заряда обоими типами носителей IGBT имеют меньшие потери в открытом состоянии, но большие потери на переключение из-за наличия хвостового тока. Новая структура должна уменьшить хвостовой ток, чтобы получить характеристики переключения, близкие к характеристикам переключения MOSFET. Из всех этих структур технология Field Stop является на сегодняшний день наиболее совершенной. При использовании данной технологии могут быть открыты новые области применения IGBT, помимо традиционной для них области — инверторов. Большое внимание уделяется использованию IGBT в импульсных источниках питания, например для персональных компьютеров или серверов.

4. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

4.1. Физика оптического излучения

4.1.1. Основы и терминология

В оптоэлектронике термин «свет» используется применительно к видимому и прилегающим к нему областям спектра электромагнитного излучения (360...830 нм).

Для оценки оптических свойств фотоприёмников и излучающих приборов используются фотоэлектрические и излучательные характеристики в дальнем поле. Применительно к светоизлучающим диодам (СИД) принципиальное значение имеют две характеристики. Диаграмма направленности излучения (**Рис. 4.1**) показывает, какое количество энергии получает фотоприёмник, расположенный на оптической оси при отклонении СИД от оси на угол φ . Диаграмма энергетической освещённости показывает, какое количество энергии сигнала получает фотоприёмник, расположенный на оптической оси, при перемещении СИД в плоскости, перпендикулярной оптической оси.

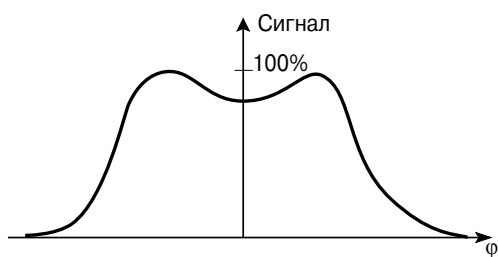


Рис. 4.1. Диаграмма направленности излучения.

Цветовая температура источника света — это температура, которую должно иметь абсолютно чёрное тело для того, чтобы вызывать цветное ощущение источника света.

Излучающие приборы

Тепловые излучающие приборы (например, лампы накаливания) характеризуются тем, что подводимая к ним энергия преобразуется в тепло и приводит к генерации излучения. Тепловые излучающие приборы являются источниками излучения со сплошным спектром, т.е. энергия их излу-

чения распределяется непрерывно в пределах широкого диапазона длин волн.

В люминесцентных излучающих приборах (например, светодиодах) подводимая энергия является потенциальной (электроны возбуждаются из валентной зоны в зону проводимости), которая и преобразуется в излучение. Этот тип приборов способен генерировать интенсивное излучение при низкой температуре. Как правило, они являются источниками излучения с линейчатым спектром.

Планковский излучатель — это идеальный излучатель со сплошным спектром (тепловой излучатель). Он определяется как нагретая полость с малым отверстием, через которое выводится излучение. Мощность излучения в этом случае определяется законом Стефана — Больцмана, а положение максимума спектра излучения — законом Вина.

Образцовый источник DIN A определяется в соответствии с IEC 306 и DIN 5033 как лампа с вольфрамовой нитью с температурой 2856 К. В видимой области спектра она аппроксимирует излучение абсолютно чёрного тела (**Рис. 4.2**).

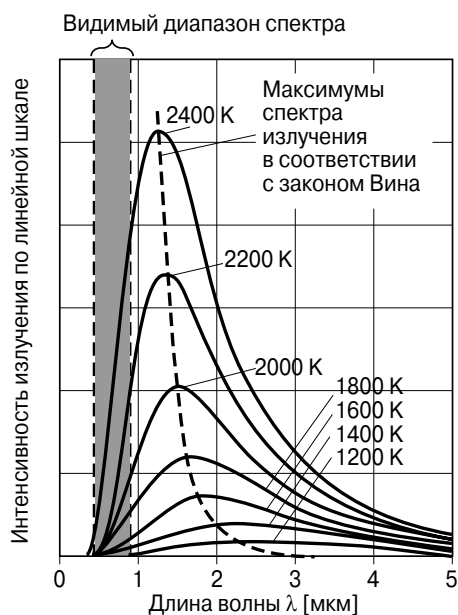


Рис. 4.2. Спектральное распределение излучения чёрного тела при различных температурах.

Спектральная чувствительность глаза

В пределах оптического диапазона излучения от 100 до примерно 10 нм область видимого излучения простирается от примерно 380 до 780 нм. Спектральная чувствительность адаптированного к свету человеческого глаза достигает максимума в центральной зелёной области и быстро падает в красной и синей областях. Спектральная чувствительность зрения стандартного наблюдателя протабулирована и приведена в стандарте DIN 5031.

Для человеческого глаза, адаптированного к темноте (в типичных условиях фоновой яркости $< 3 \cdot 10^{-3}$ кд/м), кривая чувствительности смещается примерно на 50 нм в фиолетовую область спектра.

В видимой области спектра для количественного описания световой интенсивности и светового потока используются люмены (лм) и канделы (кд). Эти единицы измерения основаны на особенностях восприятия излучения человеческим глазом. Для других спектральных диапазонов используются радиометрические единицы измерения (Вт/ср и т.д.).

В Табл. 4.1 приведены все радиометрические и фотометрические параметры.

Таблица 4.1. Радиометрические и фотометрические параметры и единицы измерения

Параметр	Единица измерения	
Радиометрия		
Мощность излучения/ поток	Φ_e	Вт
Сила излучения	I_e	Вт/ср
Энергетическая освещённость	E_e	Вт/м ²
Энергетическая яркость	L_e	Вт/м ² ·ср
Фотометрия		
Световой поток	Φ_v	лм
Сила света	I_v	лм/ср = кд
Освещённость	E_v	лм/м ² = кд
Яркость	L_v	кд/м ²

Поток излучения

Поток излучения — это полная мощность (в Вт) излучения. Световой поток (в лм) — это поток излучения, воспринимаемый глазом с чувствительностью V_{λ} .

Ниже приведены некоторые типичные значения.

- 1 м² поверхности солнца:
 $\Phi_e = 60$ МВт.
- Флуоресцентная лампа на 40 Вт:
 $\Phi_v = 750 \dots 3200$ лм.
- Лампа накаливания на 100 Вт:
 $\Phi_v = 1600$ лм.
- Красный светодиод:
 $\Phi_v = 5$ лм при токе 50 мА.

В области максимальной чувствительности глаза при 555 нм значению 1 Вт потока излучения соответствует световой поток в 683 лм.

Сила излучения

Сила излучения I_e (единица измерения Вт/ср) — это поток излучения в пределах телесного угла в 1 стерадиан. Связанный с этим параметр, учитывающий чувствительность глаза V_{λ} , называется силой света I_v (единица измерения — кандела, кд; 1 кд = 1 лм/ср).

Типичные значения:

- Лампа накаливания в 100 Вт:
 $I_v = 110$ кд.
- Фара мощностью 100 Вт: в направлении излучения I_v может составлять вплоть до 10^6 кд.
- Для полупроводникового лазера на длину волны 880 нм и мощностью 2 мВт (без использования дополнительной оптики):
 $I_e = 2 \dots 5$ мВт/ср.
- СИД для индикации (10 мА):
 $I_v = 1 \dots 1000$ мкд.
- ИК светодиоды для дистанционного управления (100 мА):
 $I_e = 10 \dots 300$ мВт/ср.

Телесные углы

Телесный угол Ω (единица измерения — ср) охватывает часть пространства, ограниченную лучами, исходящими в виде конуса из точки P (т.е. из источника лучей) и заканчивающимися на закрытой поверхности пространства. Если эта поверхность лежит на сфере (радиусом в 1 м) с центром в точке P и если площадь этой поверхности составляет 1 м, то соответствующий телесный угол $\Omega = 1$ стерадиан (1 ср), $\Omega = A / R^2$ (Рис. 4.3).

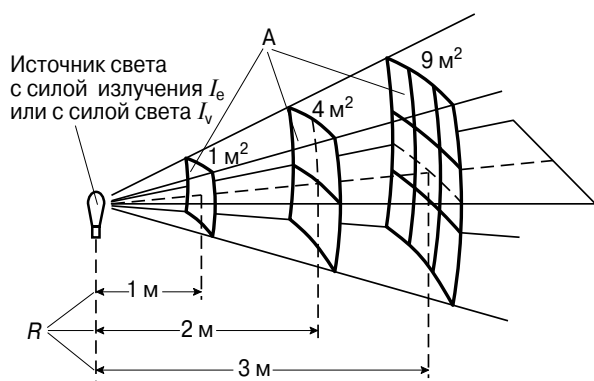


Рис. 4.3. Определение телесного угла $\Omega = 1$ ср (стерадиан).

Энергетическая яркость

Энергетическая яркость L_e (единица измерения — Вт/м²·ср) есть поток излучения в единичном телесном углу, отнесённый к единичной площади. Связанная с этим параметром фотометрическая величина называется яркостью L_v (единица измерения — кд/м²). Человеческий глаз воспринимает различия яркости как вариации яркости. Яркость измеряют в нитах, ламбертах и футламбертах.

Типичные значения:

- для поверхности солнца: 1.5×10^9 кд/м².
- для нити накаливания: $5...35 \times 10^6$ кд/м².
- для современной флуоресцентной лампы: $0.9...2.5 \times 10^4$ кд/м².
- для ночного неба: около 10^{-11} кд/м².

Освещённость

Энергетическая освещённость E_e (единица измерения — Вт/м²) есть падающий поток излучения, отнесённый к площади принимающей поверхности. Связанная с этим параметром фотометрическая величина называется освещённостью E_v (единица измерения — люкс; $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$) или футкандела (10.76 лк).

Типичные значения:

- солнечный свет в полдень: максимально 100 мВт/см^2 , $100\,000 \text{ лк}$.
- рабочее место в офисе: 500 лк .
- лунная ночь: 0.2 лк .

Для образцового источника излучения согласно стандарту DIN A освещённости в 1000 лк соответствует энергетическая освещённость 4.76 мВт/см^2 .

4.1.2. Фотодиоды

Когда фотоны с достаточной энергией проникают в фотодиод, в полупроводнике рождаются электронно-дырочные пары (внутренний фотоэффект). Электрическое поле в области объёмного заряда разделяет данные пары, несущие заряд. В результате во внешней цепи возникает ток (Рис. 4.4).

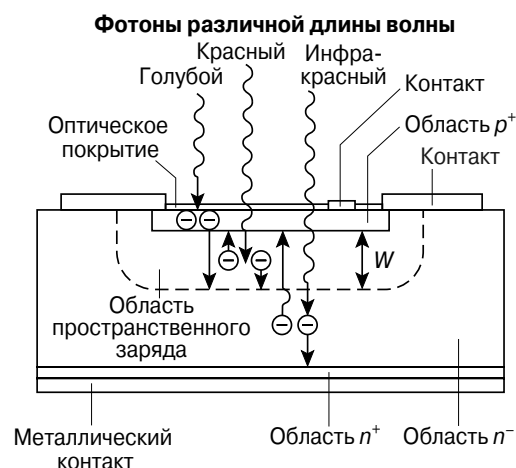


Рис. 4.4. Структура планарного кремниевого фотодиода.

С точки зрения электрического функционирования различают фотодиодный режим (режим с напряжением смещения V_R , квадрант В) и фотовольтаический режим (квадрант А). Фотовольтаическая ячейка выполняет функцию генератора тока и преобразует энергию излучения в электрическую энергию (Рис. 4.5).

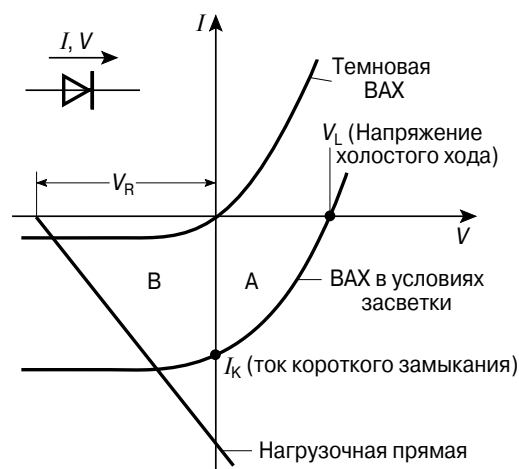


Рис. 4.5. ВАХ фотодиода.

Напряжение холостого хода V_L не зависит от площади фотодиода и логарифми-

чески возрастает с увеличением освещённости, при этом для кремниевых диодов данный параметр возрастает примерно до 0.5 В при освещённости 1000 лк. Ток короткого замыкания I_K пропорционален освещённости и площади фотодиода. Допустимое обратное смещение имеет малую величину (приблизительно 1 В), так что работа фотодиода при обратном смещении возможна лишь в определённых границах.

Для извлечения из фотодиода максимальной мощности величина сопротивления нагрузки должна составлять порядка V_L/I_K .

4.1.3. Кремниевые фотодиоды

При соответствующих размерах кремниевые фотодиоды имеют очень малый уровень плотности темнового тока ($< 10^{-11}$ А/мм²). Следовательно, их можно использовать для детектирования излучения с малым уровнем освещённости. Однако они не обладают достаточным быстродействием, так как носители заряда должны сначала диффузионно пройти в узкую область пространственного заряда, сформированную легированием. Образующий ими фототок пропорционален освещённости в пределах нескольких декад.

Когда решающее значение имеет быстродействие, используются кремниевые *p-i-n*-фотодиоды. В данном случае большая часть света преобразуется в сравнительно широкой области пространственного заряда, при этом при соответствующем напряжении смещения носители заряда дрейфуют со скоростью насыщения (приблизительно 50...100 км/с). Из-за большой ширины области пространственного заряда ёмкость *p-i-n*-фотодиодов мала (несколько пФ), так что при использовании малого сопротивления внешней нагрузки можно добиться очень малой величины постоянной времени.

Чувствительность фотоприёмников S есть отношение фототока к мощности падающего излучения или светового потока, при этом она зависит от длины волны и имеет разные значения для различных полупроводников. На **Рис. 4.6** показаны спектры чувствительности S (единица измерения — А/Вт) для фотоприёмников на основе германия и кремния.

Видно, что кремний с максимальной чувствительностью на длине волны около 850 нм хорошо согласуется со спектром из-

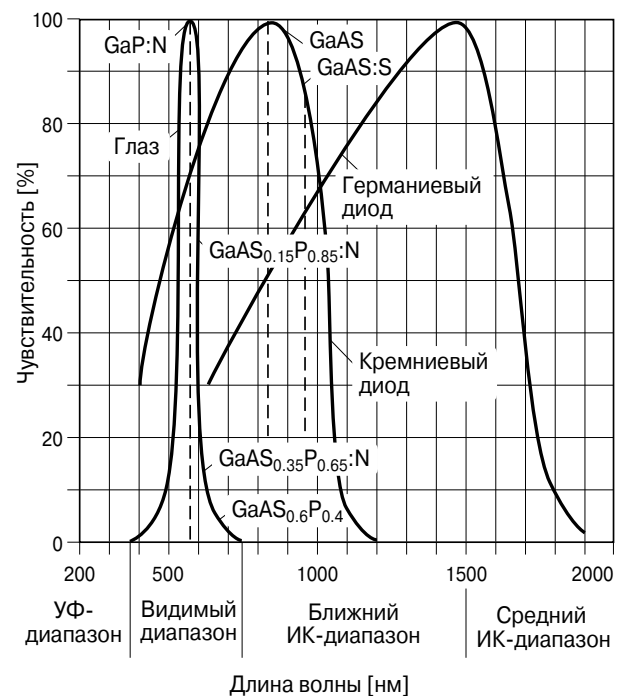


Рис. 4.6. Относительные спектры чувствительности различных фотодиодов.

лучения GaAs, тогда как германий с широким максимумом спектра чувствительности вблизи 1.5 мкм перекрывает среднюю инфракрасную область вплоть до 2 мкм. Кроме того, имеется целый набор полупроводниковых соединений, позволяющих оптимизировать фотоприёмники (в виде фотодиодов и фоторезисторов) и расширить их спектральные характеристики в среднюю инфракрасную область (например CdS, PbS, InSb, GaInAsP, HgCdTe и т.д.).

4.1.4. Фототранзисторы

В фототранзисторе переход коллектор — база сконструирован так же, как в фотодиоде. Его фототок, умноженный на коэффициент усиления транзистора (приблизительно от 100 до 1000), является коллекторным током. Таким образом, фототранзисторы обеспечивают большой уровень сигнала и требуют меньшего последующего усиления по сравнению с фотодиодами. Однако их передаточная характеристика менее линейна (из-за нелинейности усиления тока) и они обладают более низким быстродействием из-за эффекта Миллера в сочетании с достаточно большой площадью перехода коллектор — база (**Рис. 4.7**).

Среднее число пар носителей заряда, генерируемых одним фотоном, называется

комбинирует с испусканием фотонов (инжекционная люминесценция).

В отличие от лампы накаливания их спектр излучения ограничен в узком интервале длин волн, который, в первую очередь, определяется шириной запрещённой зоны E_g ($\lambda = (h \cdot c) / E_g$) полупроводника. Используемыми материалами являются соединения $A^{III}B^V$, так как они обладают необходимой шириной запрещённой зоны, а также потому, что, в отличие от непрямозонных полупроводников Si и Ge, их зонная структура обеспечивает эффективную излучательную рекомбинацию.

Излучающие диоды (Рис. 4.8) в основном изготавливаются из GaAs ($E_g = 1.43$ эВ) или GaAlAs, и они генерируют излучение в ближней инфракрасной области спектра между 800 и 950 нм вблизи максимума спектра чувствительности фотоприёмников на основе Si. Они используются в системах дистанционного контроля и управления, а также в датчиках. К преимуществам этих приборов относятся компактность, механическая надёжность, способность работать при низких температурах, простота модуляции, а также совместимость с ТТЛ-микросхемами и высокая эффективность в несколько процентов.

Часть излучения выводится непосредственно вверх из кристалла или через его боковые грани, но даже та часть излучения, которая направлена к подложке кристалла, может быть использована, если подложка прозрачна и излучение частично отражается от обратной стороны кристалла.

Вновь подчеркнём, что в случае диодов, излучающих в видимой области спектра (СИД), излучение генерируется вследствие

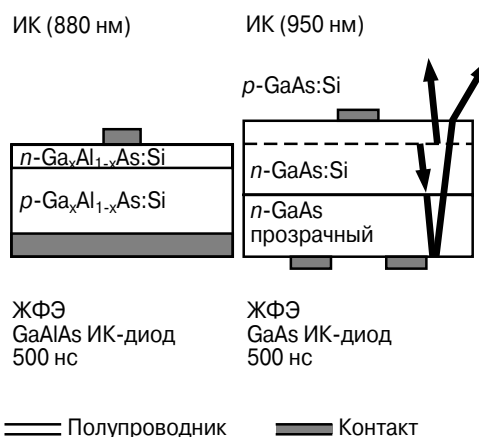


Рис. 4.8. Структура чипа излучающего диода ИК-диапазона.

излучательной рекомбинации пар носителей заряда в полупроводнике с энергией квантов, примерно соответствующей ширине запрещённой зоны E_g .

При изготовлении СИД используются структуры на подложках из GaAs (поглощающих свет), а также на подложках GaP, SiC и сапфира (прозрачных для света). В зависимости от желаемой длины волны излучения активная область структур выполняется на основе GaAsP с различным содержанием GaP.

Более современными полупроводниковыми материалами являются InGaN и InGaAlP. С использованием этих соединений определённого состава оказывается возможным перекрыть весь видимый диапазон спектра. В Табл. 4.2 приведены различные полупроводниковые материалы. В зависимости от конкретного применения длина боковой стороны кристалла может варьироваться от 150 мкм до 1 мм.

Таблица 4.2. Наиболее распространённые материалы для СИД (TSN соответствует прозрачной подложке и легированию азотом)

Диапазон	λ [нм]	Подложка	E_g [эВ]	Активная область
Инфракрасный	950	GaAs	1.3	GaAs:Si
	800...900	GaAs	1.4	GaAlAs
Красный	700	GaP	1.8	GaP:Zn, O
	660	GaAs	1.9	GaAs _{0.6} P _{0.4}
	635	GaP	2.0	GaAs _{0.35} P _{0.65} :N, TSN
Жёлтый	590	GaP	2.1	GaAs _{0.15} P _{0.85} :N, TSN
Зелёный	565	GaP	2.2	GaP:N
Голубой	465	SiC	2.7	InGaN
	405	сапфир		
Красный-зелёный	560...640	GaAs	2.0	InGaAlP
Синий-зелёный	450...540	SiC или сапфир	2.7	InGaN

С точки зрения максимально возможного вывода излучения из кристалла первостепенное значение приобретает геометрия кристалла. Значительная часть излучения, генерируемого в полупроводнике, отражается от поверхности обратно вглубь кристалла вследствие полного внутреннего отражения под критическим углом. На **Рис. 4.9** показан кристалл на основе InGaAlP.

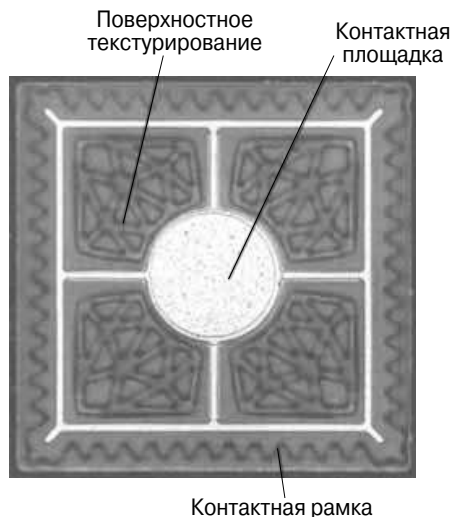


Рис. 4.9. Поверхность чипа на основе InGaAlP.

Используемое текстурирование поверхности ослабляет отражение вглубь кристалла, что обеспечивает увеличение выхода света через поверхность. Более того, контактная рамка распределяет электрический ток таким образом, чтобы свет не генерировался в областях, где его выход экранировался бы контактной площадкой. Аналогичным образом, геометрия кристалла на основе структур InGaN на подложках SiC выбирается таким образом (**Рис. 4.10**), что значительная часть генерируемого излучения направляется вглубь кристалла и выводится через боковые грани подложки. В дальнейшем эта часть генерируемого излучения может быть направлена вверх за счёт использования внешнего рефлектора.

Для защиты полупроводникового кристалла от воздействия окружающей среды и упрощения использования приборов при монтаже схемы кристаллы в основном устанавливаются в пластмассовые корпуса. Дополнительным преимуществом в этом случае является то, что пластмассовый корпус уменьшает критический угол полного отражения и, таким образом, обеспечивает усиление вывода света из кристалла. Кристалл

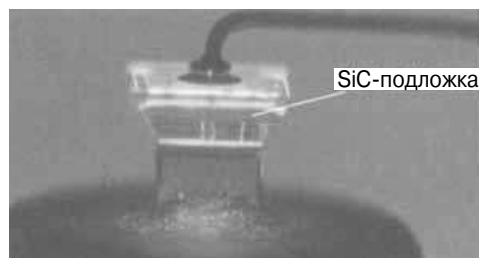


Рис. 4.10. Чип на основе InGaN с торцевыми сторонами пирамидальной формы (вид сбоку).

монтируется на основании рефлектора так, что даже боковое излучение отражается вверх. В случае приборов с куполообразным корпусом (**Рис. 4.11**) его искривлённая поверхность действует как линза, коллимирующая излучение вдоль оптической оси.

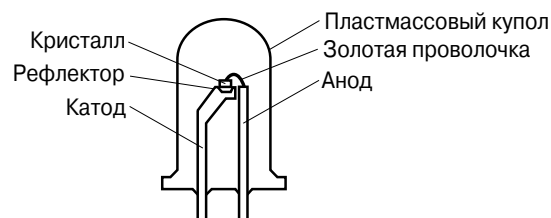


Рис. 4.11. СИД в куполообразном пластмассовом корпусе.

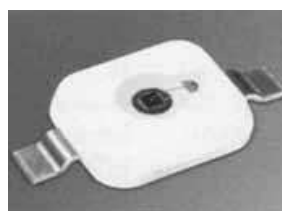
В настоящее время доминируют другие типы приборов, предназначенные для поверхностного монтажа (SMT), при этом приборы не встраиваются в печатную плату, а устанавливаются на её поверхности. Среди данного класса приборов имеется множество различных типов, в зависимости от области применения (**Рис. 4.12**). В частности,



TOPLED® : 3.2×2.8×1.9 мм



SmartLED™ : 2.0×1.4×1.3 мм



DRAGON: 7.0×6.0×1.8 мм,
для размеров чипа вплоть до 1 мм²

Рис. 4.12. Различные типы СИД в SMT-корпусах.

существует тенденция разработки приборов как с малыми, так и с большими (с кристаллами площадью 1 мм^2) размерами, обеспечивающими большую мощность излучения.

Светоизлучающие диоды используются преимущественно в системах подсветки приборных панелей, навигационных систем и т.д., в автомобильной электронике или подсветке ЖК-дисплеев, например в мобильных телефонах. За последнее время яркость СИД выросла настолько, что продолжают открываться всё новые области их применения вплоть до использования в системах внешнего освещения. Уже на протяжении нескольких последних лет повторители стоп-сигнала (CHMSL) в автомобилях изготавливаются на основе СИД. Помимо их большей долговечности, эти приборы обеспечивают и другой фактор безопасности, поскольку СИД обладают намного более высоким быстродействием по сравнению с лампами накаливания. В индикаторных мигалках и габаритных фарах также используются некоторые типы СИД. Другими областями применения являются полноцветные дисплеи, содержащие от нескольких тысяч вплоть до миллиона СИД, а также системы подсветки рекламы.

В характеристике, отражающей зависимости мощности и светового потока от тока для излучающих диодов и СИД, имеется область, в которой доминирует безызлучательная рекомбинация, линейная область, а также область, в которой начинает проявляться насыщение вследствие эффектов нагрева и насыщения излучательных переходов (Рис. 4.13). По мере увеличения температуры кристалла возрастает длина волны излучения и падает эффективность излучения.

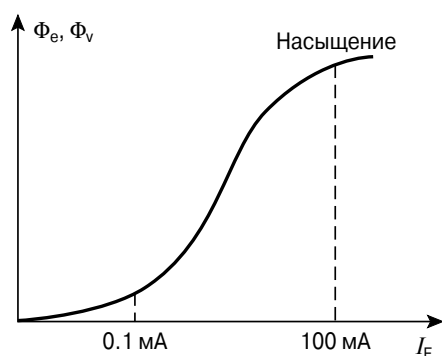


Рис. 4.13. Типичная зависимость величины светотехнических параметров СИД от тока.

Общей для всех излучающих полупроводниковых приборов является деградация их функциональных характеристик (уменьшение эффективности по мере наработки). Параметром надёжности, который используется в этом случае, служит время эксплуатации, в течение которого эффективность излучения при постоянном токе падает вдвое. Это явление не получило своего полного объяснения. В то же время представляется разумным предположение, что деградация связана с миграцией и распространением дефектов в кристалле.

Относительное спектральное распределение прибора определяет, каким образом интенсивность излучения СИД зависит от длины волны. Как правило, для пользователя эта зависимость не очень полезна, поскольку процедура измерения достаточно сложна и занимает много времени. В связи с этим ориентированными на потребителя параметрами, связанными со спектрами излучения, являются следующие:

- λ_{peak} — длина волны в максимуме спектра излучения;
- $\Delta\lambda$ — ширина спектра излучения, измеренная по уровню 50%;
- λ_{Sp} — длина волны в центре тяжести спектра излучения, имеющая важное значение для спектроскопических применений;
- λ_{Dom} — доминирующая длина волны, определяющая цветовой оттенок, воспринимаемый человеческим зрением.

4.2. Полупроводниковые лазеры

За последние 20 лет значение полупроводниковых лазеров быстро возросло. Несмотря на то что газовые лазеры продолжают использоваться благодаря их высокой мощности и когерентности, а также возможности генерации коротковолнового излучения, во многих областях применения их достоинства перевешиваются преимуществами лазерного диода:

- низкая стоимость;
- малые размеры;
- высокая эффективность;
- большой срок службы.

В телекоммуникационной технологии лазерные диоды стали основным элементом, и даже в устройствах, где требуется высокая оптическая эффективность, полупроводниковые лазеры завоёвывают всё новые

сферы применения. Использование кристаллов с удвоением частоты показывает, что в этом случае функционирование приборов с излучением от видимой до УФ-области спектра более не является технической проблемой.

4.2.1. Основы функционирования полупроводникового лазера

Основным физическим механизмом, ответственным за генерацию излучения в полупроводниках, является взаимодействие фотонов с носителями заряда в валентной зоне и зоне проводимости. Для проявления излучательной рекомбинации полупроводник должен иметь зонную структуру, показанную на **Рис. 4.14**.

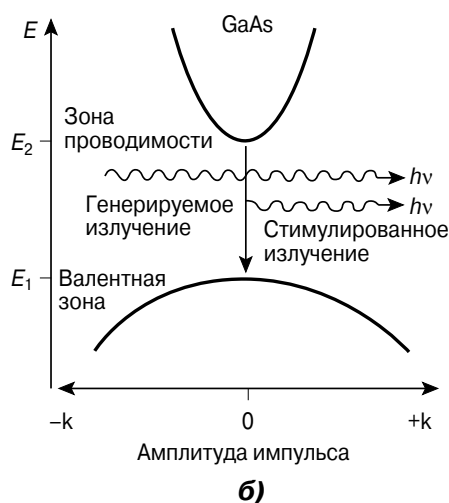
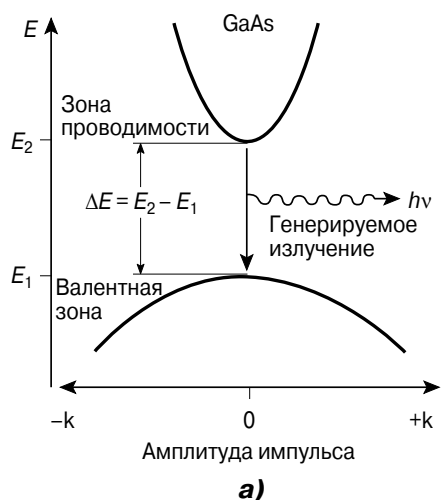


Рис. 4.14. Зонная энергетическая модель, иллюстрирующая процессы генерации и рекомбинации в арсениде галлия: *а* — спонтанная эмиссия; *б* — стимулированное излучение.

В рассматриваемом случае электрон может перейти вертикально из зоны проводимости в валентную зону с испусканием фотона. Энергия испускаемого фотона соответствует ширине запрещённой зоны полупроводника, что и определяет длину волны излучения.

В случае таких полупроводников, как германий и кремний, эффективная излучательная рекомбинация невозможна из-за того, что собственного импульса фотона недостаточно для выполнения закона сохранения импульса. Когда имеет место излучательная рекомбинация, баланс импульса может быть реализован лишь за счёт третьего участника процесса, такого как фононы (колебания кристаллической решётки) или дефекты. Подобный процесс называется спонтанным излучением, и он используется в светоизлучающих диодах (СИД) и излучающих диодах.

Принцип работы лазера основан на эффекте стимулированного излучения. Этот процесс имеет место, когда фотон с длиной волны, соответствующей ΔE , взаимодействует с электроном зоны проводимости с энергией E_2 . В этом случае фотон стимулирует электронный переход, как показано на **Рис. 4.14, б**. Особенностью данного процесса является то, что генерируемый фотон обладает той же длиной волны, фазой, поляризацией и направлением распространения, что и стимулирующий фотон. Стимулированное излучение соответствует режиму усиления падающих фотонов. Отсюда и происходит термин «лазер» — усиление света за счёт стимулированного излучения.

В тепловом равновесии число электронов валентной зоны с энергией E_1 значительно больше числа электронов зоны проводимости с энергией E_2 . В этих условиях вероятность того, что падающий фотон будет поглощён, намного больше, чем вероятность возникновения стимулированного излучения. Для увеличения вероятности процесса стимулированного излучения необходима инверсия заселённости носителей заряда в валентной зоне и зоне проводимости, при которой число электронов зоны проводимости с энергией E_2 резко увеличится. В случае полупроводниковых лазеров такая инверсия заселённости достигается за счёт инжекции носителей заряда в активную область кристалла, содержащего *p-n*-переход. Для того чтобы добиться до-

статочной высокой заселённости зоны проводимости, необходим определённый минимальный ток, называемый пороговым током. На **Рис. 4.15** показана зависимость мощности излучения лазера от тока. При превышении порогового тока I_{th} происходит переход от изначального режима спонтанного излучения Φ_e к режиму стимулированного излучения. I_F — это прямой ток, протекающий через лазерный диод.

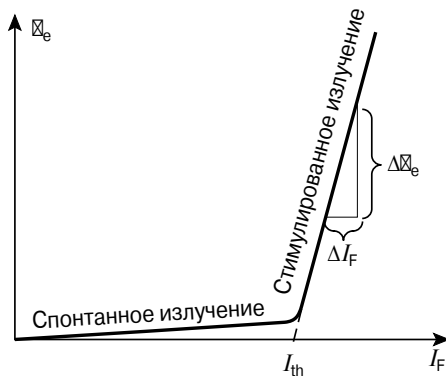


Рис. 4.15. Зависимость мощности излучения лазера от тока.

В области ниже порогового тока лазерный диод функционирует как светоизлучающий диод. В этом случае имеет место лишь спонтанное излучение. При превышении порогового тока запускается механизм стимулированного излучения, при этом мощность излучения линейно возрастает. Другим важным параметром полупроводникового лазера, как это следует из **Рис. 4.15**, является так называемая дифференциальная эффективность $\Delta \Phi_e / \Delta I_F$, определяющая крутизну характеристики.

В зависимости от требуемого спектрального диапазона полупроводникового лазера в настоящее время в основном используются две полупроводниковые системы. В лазерных диодах на спектральный диапазон 1300...1550 нм (в основном для волоконно-оптических систем связи, см. раздел 4.4) активная область структур выполняется на основе InGaAsP на подложках InP. В лазерных диодах на спектральный диапазон 600...880 нм (для пластиковых волноводов и мощных лазерных диодов, рассматриваемых в подразделе 4.2.3) активная область выполняется на основе GaAlAs, а при длине волны более 880 нм используется InGaAlAs, при этом подложкой для таких структур является GaAs.

4.2.2. Структура полоскового лазера с оксидной изоляцией

Для обеспечения надёжной работы даже при повышенной температуре окружающей среды чрезвычайно важными являются следующие условия:

- для обеспечения достаточно высокой плотности носителей заряда, вызывающей инверсию заселённости, необходима вертикальная локализация инжекции носителей заряда;
- активная область должна быть сконструирована в виде диэлектрического волновода, обеспечивающего высокую плотность фотонов;
- активная область кристалла должна быть сконструирована как оптический резонатор, в котором распространяющаяся волна частично отражается и всё больше усиливается;
- для получения высокой плотности мощности генерируемого излучения (МВт/см²) на лазерных зеркалах при обеспечении высокой надёжности и продолжительного срока службы лазерные зеркала должны иметь оптимальные покрытия;
- эффективная генерация излучения и малая скорость деградации приборов требуют высокого кристаллического совершенства используемых структур.

Вертикальная локализация реализуется за счёт использования так называемой двойной гетероструктуры, в которой активная область толщиной 0.1...0.2 мкм заключена между двумя ограничивающими слоями с большей шириной запрещённой зоны, как показано на **Рис. 4.16**. В этом случае формируются энергетические барьеры, локализующие инжекцию электронов и дырок в активную область. Большая ширина запрещённой зоны обуславливает уменьшение коэффициента преломления таким образом, что структура приобретает вид полоскового волновода, аналогичного волоконному волноводу (без начальных ограничений на поперечную ширину). Существует много различных способов обеспечения поперечного ограничения. В случае полоскового лазера с оксидной изоляцией область протекания тока ограничена полосковой областью шириной около 3 мкм, сформированной с использованием изолирующего окисного слоя, как это показано на **Рис. 4.16**.

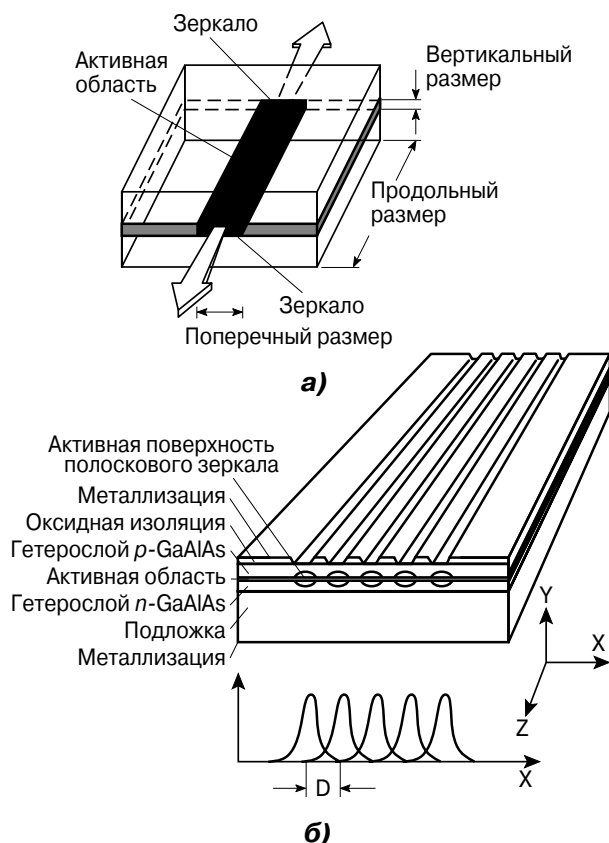


Рис. 4.16. Структура оксидного полоскового лазера на основе GaAlAs/GaAs.

Концентрация носителей заряда в пределах узкой области приводит к такому профилю мнимой части коэффициента преломления, который поддерживает стабильную поперечную фундаментальную моду (распространение волны в анизотропной среде). Волны могут распространяться и усиливаться только в пределах этой области. Любая волна, которая не распространяется параллельно границам данной области, поглощается и затухает. Этот тип волновода соответствует эффекту волноводного усиления. Лазерные диоды подобного типа называются также лазерами с волноводным усилением.

Для рассеяния выделяемого тепла используются различные типы металлических корпусов. На Рис. 4.17 показана возможная конструкция прибора, предназначенного для телекоммуникации и передачи данных. В рассматриваемом случае лазерный кристалл на основе InGaAsP припаивается на технологическую подложку на основе Si таким образом, чтобы теплоотвод осуществлялся через область с большим поперечным сечением. Стеклопризма направляет боковое излучение кристалла вертикально

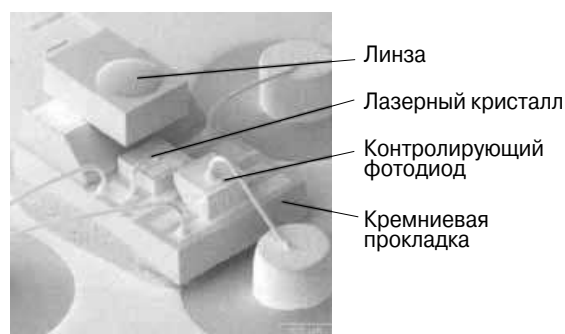


Рис. 4.17. Кремниевая подложка с лазерным кристаллом, линзой и контролирующим фотодиодом.

вверх. Смонтированная на призме линза может сфокусировать излучение в одномодовый волновод. С другой стороны от лазерного кристалла монтируется контролирующий фотодиод, который регистрирует очень слабое излучение от тыльного зеркала. С помощью этого фотодиода можно управлять мощностью излучения лазерного диода. Вся микросборка может быть смонтирована в металлическом корпусе, при этом приёмный световод может быть отъюстирован по оптическому пути излучения (Рис. 4.18).

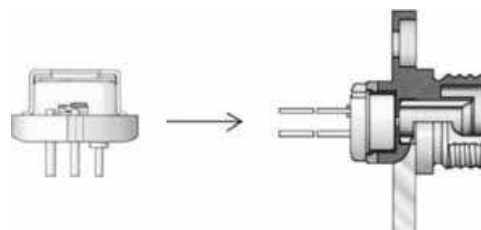


Рис. 4.18. Сборка на кремниевой подложке в металлическом корпусе TO46 с волоконным соединителем (приёмная часть).

4.2.3. Лазерные матрицы

Лазерные матрицы представляют собой конфигурацию из нескольких лазерных диодов одного типа, монолитно интегрированных в одном кристалле и предназначенных для увеличения мощности излучения. Последующее рассмотрение относится к 12-полосковой конфигурации (структура типа GRINGSCHSQW).

На Рис. 4.19 представлена фотография лазерного модуля на основе GaAlAs. Лазерный кристалл (выделенный кружком) монтируется в корпус типа TO-3 вместе с контролирующим фотодиодом, термистором с отрицательным температурным коэффици-

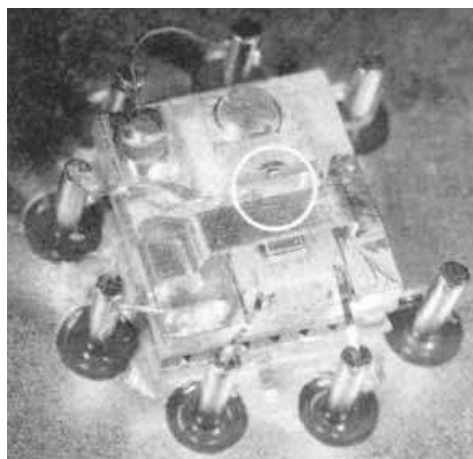


Рис. 4.19. Мощный лазер на основе GaAlAs.

ентом (NTC-термистор) и охлаждающим элементом Пельтье. Контролирующий фотодиод (ФД) регистрирует излучение от тыльного зеркала лазерного кристалла (около 10% от полной мощности излучения) для того, чтобы по его сигналу можно было контролировать и управлять мощностью излучения лазера. Лазерный кристалл монтируется на элемент Пельтье вместе с NTC-термистором, применяющимся в качестве датчика температуры, благодаря чему лазер работает в условиях постоянной температуры за счёт использования внешней регулирующей цепи. Данный режим особенно важен в том случае, когда необходимо обеспечить постоянную длину волны излучения (например, при накачке лазеров на основе алюмо-иттриевого граната), при этом подбор оптимального температурного режима позволяет прецизионно подстроить длину волны излучения и поддерживать её постоянной. Регулирующая цепь, предназначенная для этих целей, рассматривается в соответствующем подразделе ниже.

В постоянном (CW) режиме функционирования 12-полосковая квантово-размерная лазерная матрица обеспечивает мощность излучения в 250 мВт при типичном пороговом токе всего 280 мА, при этом дифференциальная эффективность составляет примерно 0.7 Вт/А. В сочетании с малым последовательным сопротивлением (приблизительно 0.5 Ом) это обеспечивает эффективность свыше 20%. При увеличении мощности вплоть до области, когда начинает проявляться насыщение (приблизительно 600...800 мВт), полная эффективность может составлять вплоть до 40%.

Лазерные диоды выпускаются также в виде модулей в герметичных металлических корпусах. Схемы соединений соответствуют DIL-конфигурации.

В Табл. 4.3 представлены основные характеристики лазерных матриц.

Мощные лазерные диоды пригодны для функционирования в постоянном режиме, что открывает новые области применения, в число которых входит накачка лазеров на алюмо-иттриевом гранате). Вплоть до последнего времени накачка подобных лазеров осуществлялась с использованием мощных ламп. Однако спектр излучения таких ламп очень широк, в то время как спектр поглощения кристалла алюмо-иттриевого граната (YAG) очень узок, что приводит к очень малой эффективности такой системы. В то же время за счёт оптимизации структуры и конфигурации активной области длина волны лазера на основе GaAlAs может быть настроена в точности на положение максимума спектра поглощения лазера на основе YAG. Это обеспечивает целый ряд преимуществ:

Таблица 4.3. Характеристики 12-полосковой лазерной матрицы

		Тип	SFH 4801	SFH 48E1	SFH 48R1
Предельно допустимые режимы	Φ_{CW}	мВт	200	200	1000
	Φ_{peak}	мВт	300	300	1200
	V_R	В	3	3	3
	T_{sub}	°C	+10...+65	-10...+65	+10...+65
Характерные параметры при $T_{sub} = 25^\circ\text{C}$ $t_p \leq 10 \text{ мкс}$ $D \leq 0.01$	λ_{peak}	нм	805	805	805
	$\Delta\lambda$	нм	2	2	4
	η	Вт/А	0.35	0.35	0.35
	I_{th}	мА	400	400	2000
	Φ_{CW}	мВт	150	150	800
	Φ_{peak}	мВт	250	250	1000
Особенности			12-полосковая	12-полосковая	Матрица форматом 5×12

- Эффективность системы накачки очень высока, что обусловлено высокой эффективностью полупроводникового лазера (более 20%) и точным согласованием длины волны излучения и максимума поглощения.
- Малая тепловая нагрузка кристалла YAG позволяет в рассматриваемом случае обеспечить лучшие оптические характеристики излучения, уменьшить ширину линии излучения и использовать более простую схему охлаждения.
- Полупроводниковые лазеры используют простые источники питания, в то время как лампы накачки требуют применения мощных высоковольтных систем возбуждения.
- Благодаря высокой эффективности использование мощных лазеров на основе GaAlAs в качестве источников накачки обеспечивает более длительный срок службы системы в целом. При этом очень маловероятным является внезапный катастрофический отказ системы, что, как правило, происходит при применении ламп накачки. Единственное, что происходит при использовании лазерных диодов, так это плавное ухудшение оптических характеристик системы.

Регулирующая схема для лазерной матрицы SFH48EI

В мощную лазерную матрицу типа SFH48EI интегрируются контролирующий ФД для управления и регулирования лазером, элемент Пельтье для охлаждения и NTC-термистор в качестве датчика температуры. Вместе с регулирующей схемой эти компоненты обеспечивают оптимальные условия работы прибора.

Мощный операционный усилитель TCA 2465 (2 усилителя в одном корпусе) выдаёт выходной ток вплоть до 2.5 А. Таким образом, прибор идеально подходит для рассматриваемого применения. Описываемая схема поддерживает стабильный режим работы лазерной матрицы, предохраняет её от инверсии полярности, перегрузки по току и напряжению.

Длина волны излучения зависит от рабочей температуры. Благодаря этому она может быть подстроена в определённых пределах и поддерживаться постоянной на уровне, необходимом для конкретного при-

менения. В то же время большая мощность излучения определяется током, протекающим через лазерный диод.

Лазерная матрица вместе с контролирующим ФД, элементом Пельтье и прецизионным NTC-термистором встраивается в корпус типа ТО-3. Лазерная матрица монтируется на охлаждающий элемент Пельтье. Элемент Пельтье переносит тепло с одной стороны на другую в зависимости от величины и направления тока, протекающего через него. Вместе с интегральным NTC-термистором через внешнюю регулируемую цепь он обеспечивает поддержание системы при постоянной температуре.

Для функционирования лазерного диода требуются две цепи управления током, работающие независимо: одна цепь предназначена для регулировки температуры и поддержания её постоянной, в то время как вторая — для управления мощностью излучения. Описанная схема обеспечивает такой режим работы, при котором ни при каких обстоятельствах величины тока и напряжения, подводимых к модулю, не превысят допустимых значений даже на короткий промежуток времени.

Как показано на **Рис. 4.20**, два операционных усилителя действуют непосредственно на лазерный диод и элемент Пельтье. Напряжения, пропорциональные их выходным токам, подаются обратно через токовые шунты к каждому из отрицательных входов. Это означает, что схема действует как контроллер пропорциональности (Р). Потенциометры позволяют установить заданные значения температуры и мощности излучения.

NTC-термистор, интегрированный в корпус лазера, измеряет температуру, значение которой можно отобразить с помощью вольтметра. Встроенная линия задержки подводит к лазеру ток только через 1 с после включения. Это обеспечивает возможность охлаждения в необходимый момент времени.

Экстренное выключение осуществляется разрывом линий подачи питания при срабатывании переключателей в операционных усилителях. Схема спроектирована и рассчитана на постоянный режим работы лазера. В том случае, когда требуются более высокие уровни тока в импульсном режиме, может быть использован прибор TCA 1365 ОР (с выходным током 4 А).

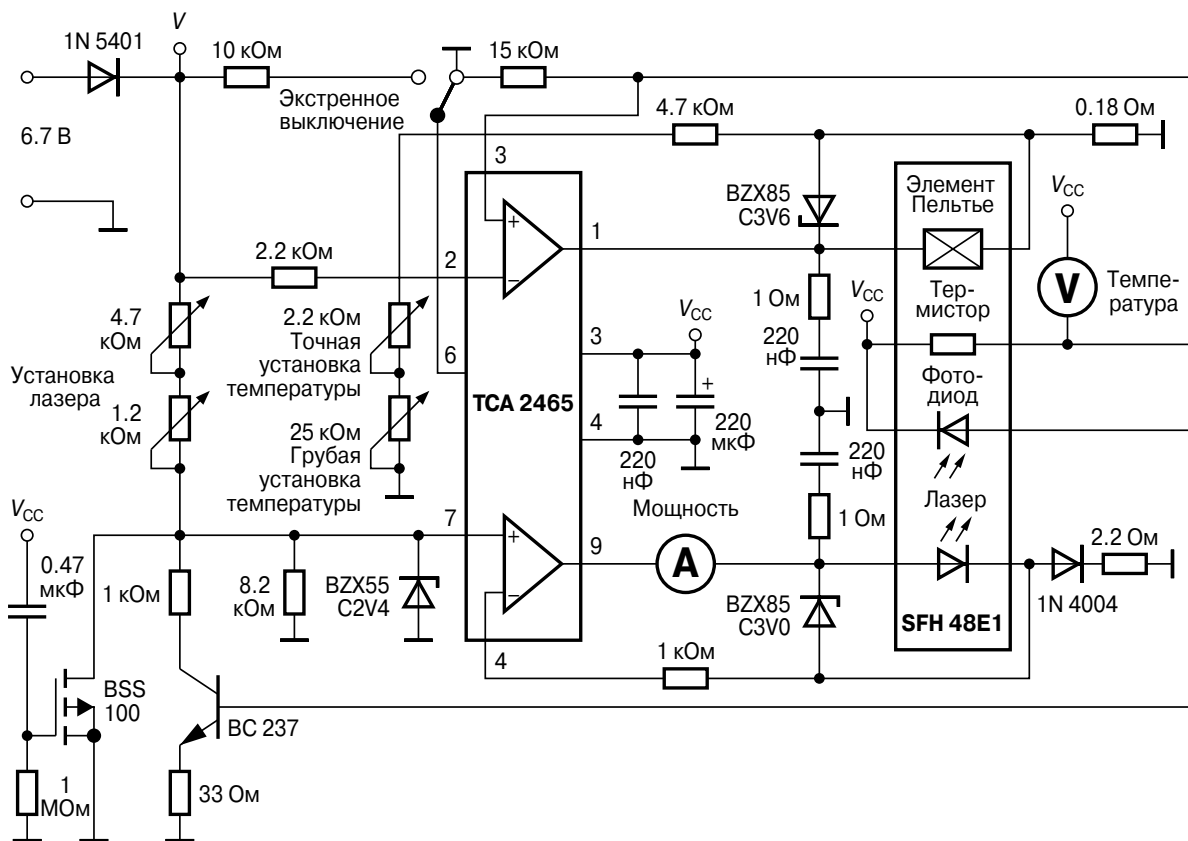


Рис. 4.20. Схема управления мощным лазером.

4.2.4. Другие применения полупроводниковых лазеров

- Благодаря своей когерентности и высокой частоте модуляции (возможна прямая модуляция) описываемые мощные лазеры пригодны для оптической связи через открытое пространство.
- Благодаря большой мощности излучения, которое может быть введено в многомодовое волокно, полупроводниковые лазеры на основе GaAlAs пригодны также для передачи энергии с гальванической развязкой. При помощи современных фотодиодов может быть реализовано эффективное обратное преобразование оптической энергии в электрическую.
- Ещё одно применение связано с практически мгновенным включением высоковольтных тиристоров через волоконно-оптическую сеть.
- Большая мощность излучения делает возможным реализацию режима удвоения частоты в нелинейно-оптических кристаллах. За счёт генерации второй гармоники можно получить когерентное синее излучение, используя инфракрасное излучение.
- Как было описано выше, полупроводниковые лазеры используются для накачки лазеров на основе YAG, предназначенных для обработки материалов, например для сварки панелей при изготовлении автомашин.
- Благодаря своим преимуществам (компактность, эксплуатационный ресурс, модуляционные характеристики, стоимость) по сравнению с газовыми и твердотельными лазерами, лазеры на основе GaAlAs оптимальны для использования в лазерных принтерах.
- Другим известным применением является лазерный пойнтер (указка). Более 10 лет назад предпочтение отдавалось хорошо различимому красному излучению преимущественно от гелий-неонового лазера с типичной длиной волны 633 нм. С тех пор оказалось возможным разработать лазерные диоды с длиной волны около 600 нм, генерирующие очень яркое излучение, сфокусированное практически в точку и имеющее мощность 1 мВт, что достаточно мало по сравнению с безопасным порогом для человеческого зрения.
- Уже на протяжении многих лет импуль-

сные лазерные диоды используются для измерения расстояния и скорости, например в автомобильной электронике для измерения расстояния до впереди идущего транспорта. Импульсные лазерные диоды реагируют на очень короткие, но мощные импульсы тока (длительностью 50...200 нс и амплитудой вплоть до 100 А), что сопровождается столь же короткими и мощными (вплоть до 100 Вт) импульсами инфракрасного излучения (800...1000 нм). Скважность импульсов достаточно мала (несколько тысяч), но, с другой стороны, возможно использование частот повторения в диапазоне кГц.

- Существуют импульсные лазерные диоды, которые хотя и не могут генерировать излучение такой мощности, но способны обеспечивать импульсы излучения длительностью вплоть до 100 мкс. Импульсы указанной длительности несут такую энергию, которая способна вызывать детонацию взрывчатых веществ. Возможен перенос оптической мощности по волноводу, а также дистанционные подрывы без опасности ложного подрыва из-за влияния электромагнитных полей.
- В разделе 4.4 более подробно рассматривается использование лазерных диодов в области связи и передачи данных при проектировании волоконно-оптических систем.

4.3. Оптроны и твердотельные реле

Конструкция

Оптроны способны передавать постоянные и переменные сигналы с частотой вплоть до нескольких МГц при обеспечении электрической изоляции. С этой целью источник излучения преобразует входной электрический сигнал в оптическое излучение (видимое или инфракрасное). Внутри корпуса прибора указанное излучение падает на фотодетектор (фототранзистор, фотоэлектрическую ИС, фототриак), который преобразует оптический сигнал обратно в электрический. Твердотельные реле (SSR) используются для замены миниатюрных механических реле, при этом в фотодетекторной секции они содержат набор фотодиодов и два мощных MOSFET.

Наиболее популярным является пластмассовый корпус типа DIL с 4/6/8/16 выводами. В таком корпусе может быть интегрировано вплоть до 4 каналов. Тенденция на-

стоящего времени (если это позволяет специфика применения) — использование корпусов меньшего размера, таких как SOIC-8 и SOT223.

При приложении высокого напряжения между входом и выходом оптрона, возникает внутреннее электрическое поле с напряжённостью вплоть до 10^4 В/см. Из-за такой высокой напряжённости поля становится возможной миграция ионов на чип фототранзистора, в результате происходит изменение характеристик транзистора за счёт полевого эффекта. В отдельных случаях это может приводить к полной потере работоспособности оптрона. В оптронах Infineon удалось практически полностью устранить этот эффект за счёт нанесения слегка проводящего прозрачного ионного экрана (TRAnsparent IOn Screen — TRIOS®) на поверхность. Для улучшения характеристик поверхности под слоем TRIOS формируется дополнительный слой нитрида кремния, интегрированный в структуру фототранзистора (Рис 4.21). Этот дополнительный слой действует как пассиватор против чужеродных атомов, а также выполняет функцию оптического покрытия.

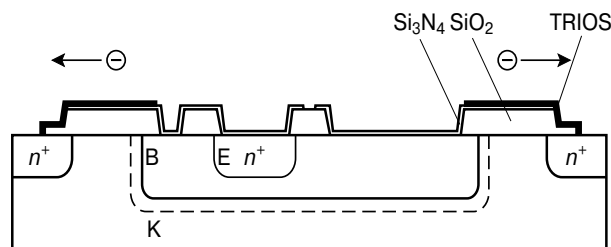


Рис. 4.21. Фототранзистор с TRIOS.

Применение

Сферы применения оптронов очень разнообразны, при этом наиболее популярными являются следующие:

- импульсные источники питания для промышленных и бытовых целей;
- программируемые логические контроллеры (PLC);
- системы связи (модемы, средства доступа к данным, устройства передачи данных);
- периферийное оборудование ПК;
- силовая электроника (контроллеры IGBT);
- медицинские технологии.

Параметры

В случае фототранзисторных оптронов такой параметр, как коэффициент передачи по току (Current Transfer Ratio — CTR) определяет отношение выходного тока к входному. В спецификациях на приборы этот параметр приводится, как правило, для прямого тока через излучающий диод $I_F = 10$ мА и при напряжении на фототранзисторе $V_{CE} = 5$ В. В случае оптронов с цифровым выходом, фототриakov и твердотельных реле вместо CTR приводят пороговый ток I_{FTN} для излучателя, при котором оптрон включается или выключается.

Безопасность

Оптроны и твердотельные реле конструируются таким образом, чтобы разность потенциалов в несколько сотен вольт между входом и выходом на протяжении многих лет не приводила к ухудшению изолирующих свойств. Они должны выдерживать и импульсное перенапряжение амплитудой в диапазоне кВ, которое может возникать на короткое время в источниках питания на 250 В и приводить к пробое изолирующей области.

В процессе изготовления каждый оптрон проверяется на способность выдерживать испытательное напряжение, приводимое в спецификациях. Оценка оптронов для изоляции магистралей проводится в соответствии со стандартом DIN/VDE. Дополнительные испытания, проводимые в других международных испытательных центрах, включая, например, UL, CSA, BSI, FIMKO, обеспечивают максимальную степень безопасности для пользователя.

Основные характеристики оптронов

Доминирующей областью применения оптронов является передача сигналов с гальванической развязкой. В этой связи возможные применения оптронов определяют следующие параметры:

- высокая скорость переключения;
- передача постоянного (CW) и переменного сигналов;
- широкий диапазон температур;
- способность выдерживать высокотемпературные циклы;
- малые габариты;
- высокая надёжность;

- устойчивость к воздействию высокого напряжения;
- ограниченная скорость деградации светоизлучающих диодов;
- стабильность транзисторных характеристик.

Стабильность транзистора

В процессе эксплуатации может проявиться существенное различие характеристик светоизлучающего диода на основе арсенида галлия и кремниевого фототранзистора. Если в дополнение к этому предусматривается работа в условиях высоких температур (например при $+90^\circ\text{C}$), то может быть заметным проявление полевого эффекта в фототранзисторе. Оптроны, предназначенные для работы в жестких условиях, должны проходить 100%-ную тренировку. Это означает, что поставка приборов возможна лишь после стабилизации их оптических и электрических параметров.

Старение светоизлучающих диодов

Минимальное время наработки как характеристика надёжности определяется как промежуток времени, в течение которого интенсивность излучения при постоянном токе падает наполовину по сравнению с первоначальной величиной. На **Рис. 4.22** представлены типичные зависимости, полученные на большом массиве приборов. Рисунок показывает, что минимальное время наработки превышает 200 000 часов эксплуатации. Графики демонстрируют вре-

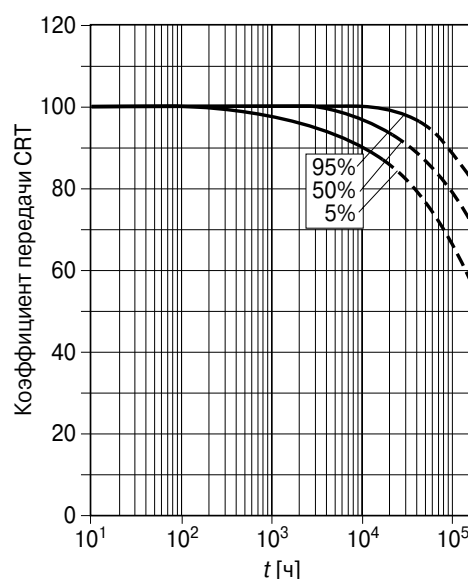


Рис. 4.22. Снижение CTR в процессе наработки.

менную зависимость падения CRT при входном токе $I_F = 60$ мА (измерения проводились при температуре $+25^\circ\text{C}$, $I_F = 10$ мА, $V_{OF} = 5$ В).

Минимальную наработку по критерию 50% называют также эксплуатационным ресурсом (или сроком службы) оптронов.

4.4. Оптические волноводы

В настоящее время открываются всё новые области применения оптических волноводов в виде стеклянных или пластмассовых волокон, предназначенных для оптической передачи данных. Помимо классических применений при проектировании систем дальней связи, они используются и в локальных системах связи (LAN), например в системах передачи данных от центральных компьютеров к периферийным устройствам бортовых систем (самолёты, транспортные средства, корабли), а также во всё возрастающей степени в развлекательной электронике, метрологии, открытых и замкнутых кольцевых системах управления, кабельном телевидении и установках с антенной коллективного пользования.

К числу преимуществ этого вида связи относятся:

- широкая полоса пропускания (высокая пропускная способность);
- гальваническая развязка между передатчиком и приёмником;
- устойчивость к воздействию электромагнитных помех;
- скрытность передачи информации;
- отсутствие рассеянного излучения и, как следствие, отсутствие перекрёстных помех;
- отсутствие цепей заземления;
- отсутствие возможного искрения;
- малый вес и незначительные требования по габаритам;
- практически неограниченная доступность материалов и компонентов.

Основными материалами, используемыми для оптической связи, являются стекло и пластмасса. Для каждого из этих материалов характерны свои применения, использование специфических полупроводников и элементов соединения. Применение стеклянных волокон предпочтительно для систем с высокой скоростью передачи и на большие расстояния или для локальных систем. Пластмассовые волокна пригодны

для использования в локальных сетях с малой скоростью передачи данных, а также для многочисленных применений в контрольно-измерительной технике.

Вследствие того, что пластмассовые волокна имеют больший диаметр волокна (1 мм), допуски на оптические соединители не столь критичны, как для стеклянных волокон, и поэтому они существенно дешевле. В заключительном разделе этой главы описан ряд применений систем связи с пластмассовыми волокнами.

4.4.1. Оптические волокна как среда для передачи информации

Стеклянные волокна, предназначенные для использования в качестве диэлектрических волноводов, изготавливаются либо из чистого силикатного стекла, либо из стёкол, легированных примесными атомами для модификации их коэффициента преломления. Основной принцип волноводного эффекта может быть описан следующим образом (**Рис. 4.23**): если пучок луча падает на торец волокна в пределах некоторого ограниченного угла γ (числовая апертура, NA), то он входит в волокно и распространяется далее за счёт полного внутреннего отражения на границе сердцевина/оболочка при условии, что угол α меньше критического угла для полного внутреннего отражения.

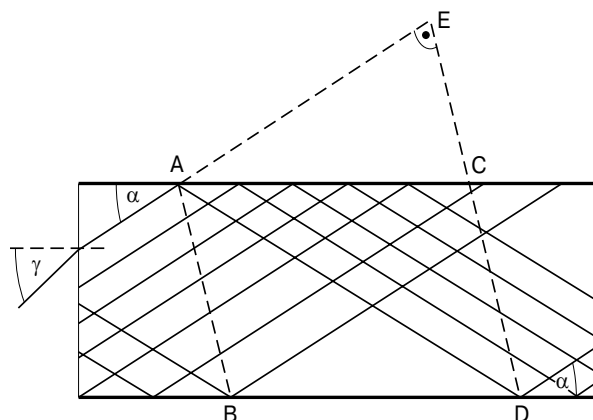


Рис. 4.23. Распространение света в световоде.

Следует различать три типа стеклянных волокон (**Рис. 4.24**):

- **Многомодовые волокна со ступенчатым профилем коэффициента преломления**
В этих волокнах с широкой сердцевиной может распространяться набор мод, что

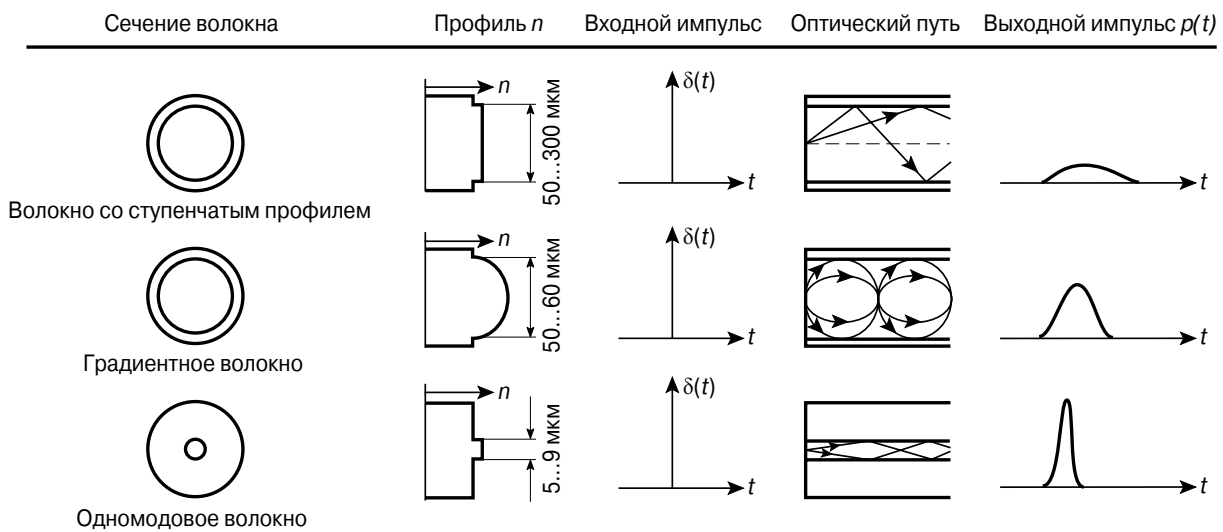


Рис. 4.24. Основные типы волокон и их характеристики.

приводит к удлинению оптического импульса со скоростью 20...50 нс/км. Ослабление/потери в этом случае достаточно велики (несколько дБ/км). Преимуществом является простота (и, следовательно, малая цена) ввода сигнала благодаря большому диаметру сердцевины. К недостаткам следует отнести недостаточную ширину полосы пропускания как следствие увеличения длительности импульса.

- **Многомодовые градиентные волокна**

Параболический профиль распределения коэффициента преломления по сечению волокна вызывает волноводное распространение излучения вдоль границ сердцевины (вместо эффекта полного внутреннего отражения от границы между сердцевиной и оболочкой), что приводит к существенному уменьшению модовой дисперсии. Два стандартных типа волокна имеют сердцевину диаметром 50 и 62.5 мкм. Коэффициент ослабления составляет 2.5...3 дБ/км на длине волны 850 нм и 0.6...0.8 дБ/км на длине волны 1300 нм. Вновь отметим, что простота ввода излучения благодаря большой ширине сердцевины является преимуществом данного типа волокна. В то же время его стоимость несколько выше по сравнению с одномодовым волокном. Пропускная способность для стандартных волокон составляет 500 МГц/км на длине волны передачи 1300 нм. Волокна, оптимизированные для лазерных систем передачи, обладают полосой пропуска-

ния, обеспечивающей скорость передачи 1 Гбит/с на расстояния от 300 до 1000 м.

- **Одномодовые волокна со ступенчатым профилем коэффициента преломления**

В сердцевине этих волокон, типичная ширина которых составляет всего 9 мкм, может распространяться всего одна мода. Коэффициент ослабления составляет 0.15...0.25 дБ/км. Граничная скорость передачи превышает 10 Гбит/с, что обеспечивает возможность передачи данных с такой скоростью на расстояния свыше 100 км. Этот тип волокна имеет невысокую стоимость, но требует использования прецизионных оптических компонентов (стыковочные узлы, оптические разъёмы).

Стекланные волокна стандартизированы международным стандартом IEC 60793.

На Рис. 4.24 показаны общепринятые типы волокон и их характеристики.

4.4.2. Передающие и приёмные модули для оптоволоконных применений

Вследствие спектральной зависимости коэффициента ослабления стекланных волокон (Рис. 4.25) передатчики и приёмники на длину волны около 850 нм изготавливаются на основе Si, GaAs или GaAlAs, а на длину волны около 1300 и 1550 нм — на основе Ge и четырёхкомпонентных структур, таких как InGaAsP.

Оптико-механическое соединение накладывает очень жёсткие требования по взаимной юстировке полупроводниковых компонентов и оптического волновода (до-

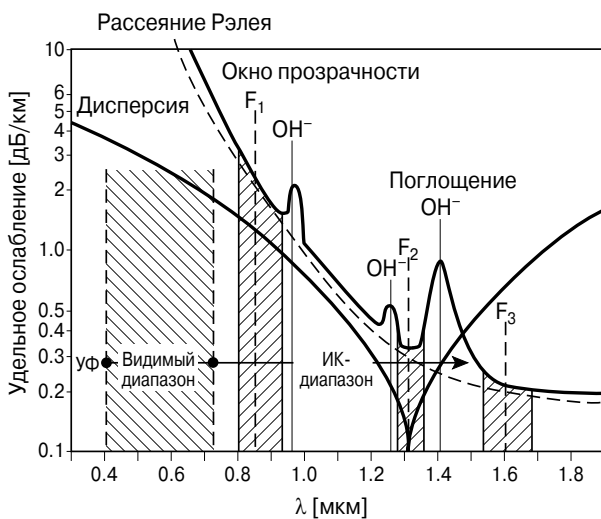


Рис. 4.25. Спектральная зависимость ослабления в кварцевом волокне.

пуск при использовании одномодовых волокон составляет всего ± 0.1 мкм). По этой причине законченные модули, рассчитанные на конкретные применения, включают в себя передатчик и приёмник, интегрированные в едином модуле.

Всё более усиливающейся тенденцией при разработке оптических систем становится применение так называемых трансиверов (приёмопередатчиков, TRX), которые в передающем терминале оснащаются светодиодами или лазерами. Наиболее часто используемыми спектральными диапазонами в рассматриваемом случае являются 850 и 1300 нм, при этом они делятся на 3 категории в зависимости от дальности передачи: длина волны 850 нм используется для локальных сетей (LAN) на расстояния вплоть примерно до 2 км, длина волны 1300 нм — для городских сетей (MAN) на расстояния примерно до 15 км, а для глобальных сетей (WAN) — на расстояния примерно 100 км.

В приёмном терминале обычно размещаются *p-i-n*-фотодиоды, которые подсоединяются к схеме приёмника. В том случае, когда из-за большого расстояния сигнал слишком слаб, может оказаться необходимым использовать лавинный фотодиод (ЛФД) в приёмной цепи.

В то время как трансиверы на основе СИД используются для передачи данных со скоростью до 300 Мбод, применение лазерных трансиверов позволяет существенно увеличить этот предел. При типичной современной скорости передачи вплоть до 10 Гбит/с они наиболее часто используются

при оптоэлектронном преобразовании. По мере расширения области применения лазерных модулей возросла скорость передачи данных, а также вдвое уменьшились габариты приборов (**Рис. 4.26**).

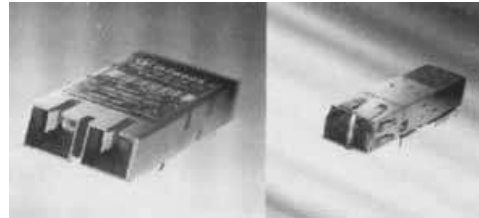


Рис. 4.26. Сравнение универсального 1×9 и SFF-модулей.

В отличие от прежних источников питания на 5 В, в современных модулях практически исключительно используется напряжение 3.3 В, при этом тенденцией является разработка всё более низковольтных модулей. К тому же TTL-интерфейс, который прежде был практически стандартным для подключения светодиодных компонентов, уступает место более быстродействующим интерфейсам, таким как PECL, CML или LVDS.

В **Табл. 4.4** приведены справочные данные для типичного трансивера со скоростью передачи 1.25 Гбод на основе лазера как передающего прибора.

Другим отличием от трансиверов на основе СИД является требование по лазерной безопасности, а также необходимость контроля характеристик трансивера.

В отличие от лазеров, из-за большого угла излучения, составляющего практически 180° , излучение СИД практически не способно повредить человеческое зрение. В то же время лазеры, используемые в трансиверах, имеют угол излучения величиной всего в несколько градусов. Вследствие этого всё излучение может пройти через зрачок в человеческий глаз и, в зависимости от интенсивности излучения, привести к различным повреждениям.

В зависимости от мощности и длины волны излучения лазерные трансиверы разбиваются на классы. Каждый трансивер содержит контролирующую схему, которая отслеживает, чтобы мощность излучения не превысила предельного значения, установленного для конкретного класса трансивера.

Помимо требований по лазерной безопасности, которые должны удовлетворять-

Таблица 4.4. Справочные данные для трансивера на скорость передачи 1.25 Гбод

Параметр	Обозначение	MIN	TYP	MAX	Единица измерения
Рекомендуемые условия эксплуатации					
Окружающая температура	T_{AMB}	0	—	70	°C
Напряжение питания	$V_{CC} - V_{EE}$	3.1	3.3	3.5	В
Передатчик					
Дифференциальное напряжение входного сигнала	V_{DIF}	250	—	1600	мВ
Приёмник					
Центральная длина волны	λ_c	770	—	860	нм
Электрооптические характеристики передатчика					
Введённая мощность (средняя)	P_0	−9.5	−6	−4	дБм
Амплитуда оптической модуляции	OMA	156	450	—	мкВт
Центральная длина волны	λ_c	830	850	860	нм
Спектральная ширина (RMS)	σ_1	—	—	0.85	нм
Относительная интенсивность шума	RIN	—	—	−117	дБ/Гц
Отношение затухания (динамическое)	ER	9	13	—	дБ
Порог сброса	V_{TH}	2.5	2.75	2.99	В
Полное время сброса	t_{RES}	140	240	560	мс
Время сброса (20%...80%)	t_R	—	—	260	пс
Ток питания	—	—	40	65	мА
Электрооптические характеристики приёмника					
Чувствительность (средняя мощность)	P_{IN}	—	−20	−17	дБм
Насыщение (средняя мощность)	P_{SAT}	0	—	—	дБм
Минимальная амплитуда оптической модуляции	OMA	—	19	31	мкВ
Чувствительность приёмника при 50-мкм опто-волокну	SPIN 50 μm	—	24	55	мкВт
		—	−17	−13.5	дБ
Чувствительность приёмника при 62.5-мкм опто-волокну	SPIN 62.5 μm	—	32	67	мкВт
		—	−16	−12.5	дБ
Уровень установки сигнала LOS	P_{LOSA}	—	−21	−18	дБм
Уровень сброса сигнала LOS	P_{LOSD}	−30	−22	—	дБм
Гистерезис сигнала LOS	$P_{LOSA} - P_{LOSD}$	0.5	1	—	дБ
Время установки сигнала LOS	t_{ASS}	—	—	100	мкс
Время сброса сигнала LOS	t_{DAS}	—	—	350	мкс
Полоса пропускания по уровню −3 дБ	—	—	1.25	1.5	Гц
Полоса пропускания по уровню −10 дБ	—	—	1.5	3	Гц
Дифференциальное напряжение на выходе данных	V_{DIFF}	0.5	0.7	1.23	В
Ослабление отражённого сигнала	A_{RL}	12	—	—	дБ
Ток потребления	—	—	60	90	мА

ся в случае сбоев в работе трансиверов, потребителю предоставляется ряд параметров для целей контроля. К их числу относятся такие параметры, как мощность входного излучения приёмника, сигнал при получении данных, ток смещения лазера и выходная мощность передатчика (лазера).

Одновременно с этим для увеличения уровня сигнала в магистральных системах во всё большей степени используются волоконные усилители, устраняющие прежде существовавшую необходимость преобразования оптического сигнала в электрический с последующим его усилением и повторным преобразованием в оптический сигнал. В рассматриваемом случае волокно, легированное эрбием, приводится в возбуждённое состояние излучением накачки. Длина волны излучения накачки должна соответствовать одной из полос поглощения эрбия (например, 1480 нм). При появлении фотона с длиной волны около 1555 нм, переносящего сигнал, несколько электронов переходят на более низкий энергетический уровень, при этом излучается фотон с длиной волны 1555 нм. Это и приводит к эффекту усиления. Для окна прозрачности вблизи 1300 нм используется легирование празеодием.

4.4.3. Ретрансляторы для волоконно-оптических применений

Помимо упоминавшихся в разделе 4.4.2 трансиверов, преобразующих сигнал последовательных данных в световой сигнал и обратно, используются так называемые транспондеры (ретрансляторы) и оптические модули параллельного преобразования. Эти приборы предоставляют системному разработчику дополнительные возможности, поскольку, кроме чисто последовательного оптоэлектронного преобразования, они способны реализовывать дополнительные комбинации функций.

Для объединения каналов, подключённых параллельно, в транспондере используется мультиплексор, при этом транспондер формирует последовательные сигналы и вводит их в световод.

При помощи демультиплексора в секции приёмника последовательные сигналы преобразуются в первоначальный параллельный вид, что позволяет пользователю осуществлять их дальнейшую обработку.

Благодаря этому электрические сигналы на входе, поступающие параллельно, считываются в мультиплексоре с тактовой частотой, генерируемой в данном модуле. Затем сигналы последовательно выводятся из мультиплексора с тактовой частотой, которая превышает частоту считывания в число раз, равное числу входных электрических каналов. В дальнейшем, совершенно аналогично приёмопередатчику, сигнал подаётся в драйверную цепь СИД или лазера, которые и преобразуют его в оптический сигнал.

Последовательные оптические сигналы проходят оптоэлектронное преобразование, после чего они вводятся в демультиплексор, восстанавливающий тактовую частоту из поступающих данных.

Эта тактовая частота используется для преобразования приходящих данных в обратной последовательности по сравнению с мультиплексором снова в параллельный вид, после чего они становятся доступными для пользователя.

Другую возможность параллельной передачи сигналов данных предоставляют оптические модули параллельной передачи. Эти приборы имеют столько же выходных оптических каналов, сколько и входных электрических каналов, что по сути делает прибор набором трансиверов, соединённых последовательно, при этом прибор компактнее в 6...12 раз. Поскольку данные модули используются преимущественно для распределения сигналов магистральной, принципиально важна синхронная передача сигналов. Для этого, в свою очередь, необходимо, чтобы время распространения сигналов по стеклянным волокнам, идущим параллельно, было абсолютно одинаковым. При длительности импульсов 400 пс (2.5 Гбит/с) и длине линии 100 м это означает, что допустимое различие длины всех 12 волокон составляет 0.01%, что соответствует значению всего около 10 мм.

В оптической части упомянутых выше модулей используются оптические разъёмы, соответствующие различным стандартам, которые рассматриваются в разделе 4.4.4.

4.4.4. Подсоединение к стеклянным волокнам

Для соединения оптических волокон используются два основных способа: неразъёмное соединение (сплавное соединение) и

разъёмное соединение (оптические разъёмы, полуразъёмные соединения).

Сплавные соединения

Когда стеклянные волокна соединяются путём сплавления, концы двух волокон оплавляются нагревом электрической дугой. Высокой механической точности и контроля за тепловым процессом добиваются за счёт использования полностью автоматических установок сплавления (**Рис. 4.27**), обеспечивающих оптические потери в местах сплавления менее 0.5 дБ для одномодовых волокон. Место сплавления должно быть защищено. Этот способ используется для соединения отрезков кабелей из многих волокон по маршруту линии, а также для подсоединения к оптическим элементам терминала (разъёмы, передатчики, приёмники, при этом в каждом случае через выведенные отрезки волокна).



Рис. 4.27. Устройство полностью автоматизированного сращивания волокон.

Разъёмные соединения

Оптические разъёмы используются для быстрого и воспроизводимого приведения в контакт волокон при возможности быстрого их разъединения в любой момент времени.

По мере технического развития на рынке утвердился целый ряд таких систем, часть из которых имеет лучшие характеристики. Наиболее распространённые разъёмы стандартизируются в соответствии с международным стандартом IEC 60874.

Базовый принцип наиболее распространённых разъёмов заключается в следующем: концы соединяемых волокон вводятся в ориентирующий элемент. Это обеспечи-

вает (возможно с использованием дополнительных элементов) точную геометрическую юстировку двух волокон (по оси, радиусу, углу). Торцы волокон тонко полируют с тем, чтобы обеспечить по возможности качественную оптическую границу раздела с минимально возможными обратными отражениями (потери на обратные отражения). Для того чтобы не оставалось воздушного зазора между двумя волокнами, который может приводить к ослаблению сигнала из-за френелевских потерь на величину около 0.3 дБ и потерь на обратные отражения величиной 14 дБ, торцы волокон делают выпуклыми, полируются и прижимаются друг к другу с помощью пружины (так называемый физический контакт).

Широко распространённые соединители второго поколения основаны на принципе, при котором волокно встраивается в прецизионную керамическую втулку с внешним диаметром 2.5 мм. Волокно приклеивается в аксиальное отверстие втулки, после чего торцы подвергаются обработке. Две втулки центрируются относительно друг друга с помощью прецизионного керамического рукава. Затем внешние элементы соединителя прижимают контактирующие поверхности, и соединитель вставляется через замковое соединение в соответствующий адаптор.

Это поколение соединителей включает в себя следующие типы: ST (штыковое соединение), FC, DIN-LSA (винтовая фиксация), SC (возвратно-поступательный неразрезной замок, представленный на **Рис. 4.28**), E200 и двухпозиционные соединители ESCON и FDDI-PMD (без винта и с защёлкивающимися крючками).



Рис. 4.28. Соединитель типа SC.

Третье поколение соединителей основано на том же принципе, но диаметр центральных компонентов (втулки и рукава) уменьшен до 1.25 мм. Соответственно, это позволяет уменьшить габариты корпуса. Данное поколение соединителей включает в себя такие типы, как LC и MU (**Рис. 4.29**).



Рис. 4.29. Соединитель типа LC.

Потери на ввод в этих втулочных керамических соединителях варьируются от значения 0.5 дБ и ниже вплоть до 0.05 дБ в зависимости от прецизионности типа волокна. Потери на обратное отражение могут составлять менее 50 дБ.

Четвёртое поколение представляет собой группу многоволоконных соединителей. Наиболее популярный принцип так называемых MT-разъёмов заключается в расположении волокон в прямоугольной втулке с ячейками сетки размером 250 мкм. Два торца разъёмов ориентируются друг относительно друга с помощью направляющих иголок или отверстий, сформированных по сторонам втулок. Используя этот принцип, был разработан целый ряд соединителей: MPO (возвратно-поступательный разъём для 12 волокон), SMC (Рис. 4.30, сеточная ориентация на 12 волокон), MT-RJ (малогабаритный разъём на 4 волокна, аналогичный электрическому разъёму RJ-45).



Рис. 4.30. Соединитель типа SMC на 12 волокон.

Потери на ввод в этих разъёмах также составляют менее 0.5 дБ на одно волокно.

4.4.5. Оптические разъёмы для пластиковых волокон

Разъём представляет собой направляющий канал, диаметр которого соответствует поперечному сечению световода. Волокно просто вводят в этот направляющий канал и фиксируют с помощью капельки клея.

Большой диаметр оболочки пластикового волокна (1 мм) накладывает значительно меньшие требования на геометрические допуски оптических соединительных элементов. Излучающие диоды и фотоприёмники SFH довольно дешёвы, а винтовые соединители позволяют легко подстыковывать и отстыковывать волокно. Для оптического

соединения надо просто ввести волокно в отверстие до ограничителя и зафиксировать винтовым зажимом. При этом нет необходимости удалять защитную оболочку пластикового волокна.

На Рис. 4.31 приведена конструкция диодов типа SFH, а на Рис. 4.32 показана конструкция компонентов с винтовой фиксацией.

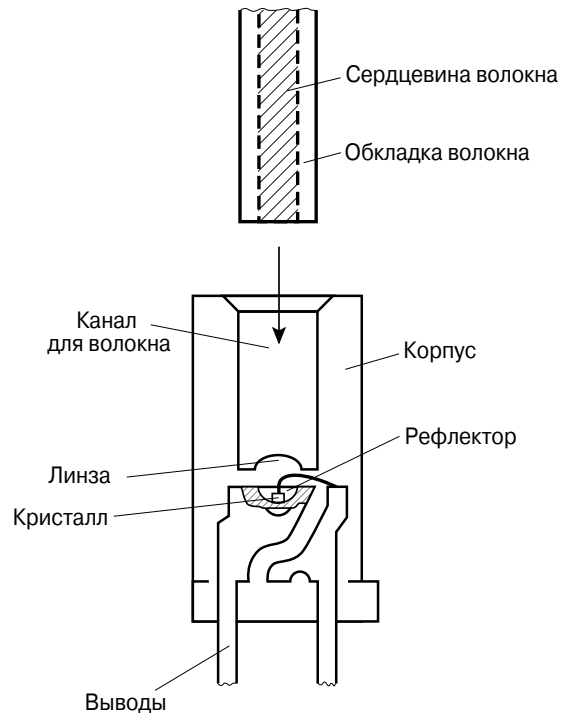
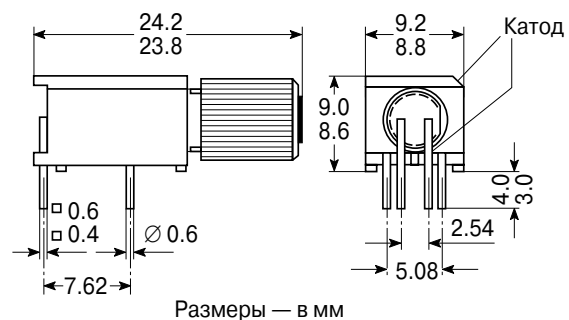


Рис. 4.31. Диоды для передачи и приёма данных через пластмассовые световоды.



Размеры — в мм

Рис. 4.32. Оптические световоды с винтовым креплением.

4.4.6. Типичные применения пластиковых волокон

Благодаря своим преимуществам пластиковые оптические волноводные волокна (Plastic Optical Fiber — POF) всё более широко используются в замкнутых и разомк-

нутых промышленных системах управления и контроля.

Ниже приводятся всего лишь несколько примеров.

В тех случаях, когда речь идёт об экстремально высоких напряжениях, становится невозможным добиться электрической изоляции с использованием корпусных оптронов. Эту проблему решает использование пластиковых волокон. На **Рис. 4.33** показана линия связи, обеспечивающая передачу данных на расстояние более 20 м со скоростью 1 Мбод.

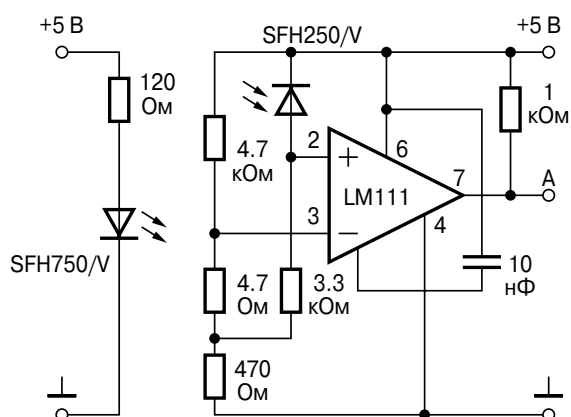


Рис. 4.33. Оптическая передача со скоростью 1 Мбод на расстояния до 20 м.

Помимо использования в качестве элементов оптических дисплеев, пластиковые оптические волокна могут применяться в качестве датчиков. Зависимость их характеристик от температуры и изгиба приводит к изменению параметров пропускаемого излучения. Эти эффекты могут быть использованы в измерительной технике. Благодаря конфигурации с разделёнными волокнами, можно разработать различные типы волоконно-оптических световых барьеров (гибридных и работающих на отражённом излучении). Например, такой подход обеспечивает возможность определения направления движения объектов в зоне измерения при одновременном сохранении гальванической развязки между зонами измерения и анализа.

Открытые торцы волокон могут отстоять друг от друга на расстояние вплоть до 5 мм. В принтере, как правило, необходимо несколько световых барьеров. Благодаря использованию пластиковых волокон оказывается возможным компактно установить электронику в одном месте без необходи-

мости подводить электрические соединения ко всем световым барьерам. Это более надёжно с эксплуатационной точки зрения, более экономично и делает систему менее чувствительной к интерференционным эффектам: характеристики оптической развязки лучше и к тому же данный подход обеспечивает большую гибкость при конструировании.

Пример барьера на принципе отражённого света приведён на **Рис. 4.34**.

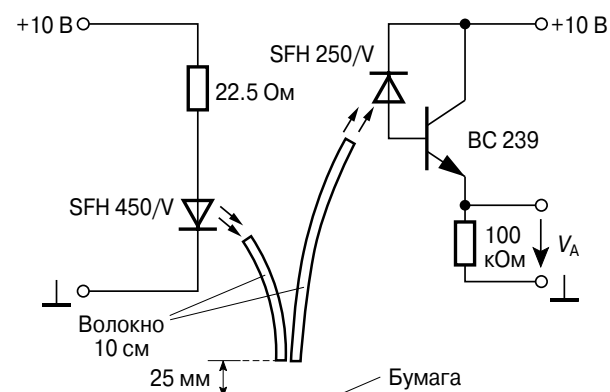


Рис. 4.34. Световой барьер на принципе отражения.

Типичные уровни ослабления в промышленных пластиковых волокнах различной длины и для различных длин волн:

- 660 ± 15 нм:
при длине 1 м — 0.3 дБ/м;
при длине 20 м — 0.25 дБ/м;
при длине 50 м — 0.2 дБ/м.
- 950 ± 15 нм:
при длине 1 м — 4 дБ/м.

4.4.7. Использование технологий оптической передачи данных по пластиковым волокнам в транспортных средствах

Первые попытки использовать системы оптической связи по пластиковым волокнам в транспортных средствах были сделаны около 10 лет назад.

Однако из-за малой скорости передачи по шине данных (например, CAN) для различных систем управления в транспортных средствах, использование оптической связи оказалось неэкономичным.

Вследствие всё более широкого применения мультимедийных устройств, а также предоставления новых коммуникационных услуг, объём обрабатываемых данных вырос

настолько, что оптическая связь стала абсолютно необходимой.

Одновременно с этим стало технически возможным встраивание пластикового волокна в фурнитуру обычного кабеля. На первоначальном этапе исследовались различные конфигурации (кольцевая, в виде двух колец и в виде звезды). Применительно к мультимедийным средствам (MOST) предпочтение было отдано кольцевой конфигурации, в то время как для системы безопасности (byteflight) предпочтительной оказалась конфигурация звезды.

Для реализации оптической связи необходим диод-передатчик с драйвером, обеспечивающим необходимый ток. Использование в транспортных средствах обычных крупногабаритных СИД на длину волны 650 нм оправдало себя. Они надёжны, имеют довольно высокое быстродействие и обладают достаточной температурной стабильностью. В будущем возможно возникнет потребность в системах с большей длиной линии связи, что потребует использования передатчиков зелёного цвета свечения. Как всегда, особую проблему представляет широкий температурный диапазон устойчивости приборов, предназначенных для работы в транспортных средствах.

При конструировании приёмника использовался фотодиод на основе кремния в сочетании с маломощным трансимпедансным усилителем (предусилителем). Далее по схеме следует другой усилитель, усиливающий сигнал до требуемого логического уровня. Применительно к системам с малой скоростью передачи, предусилитель и основной усилитель удалось успешно интегрировать в одной ИС. Ведётся постоянная работа с тем, чтобы сделать то же самое и для систем с большей скоростью передачи (вплоть до 500 Мбит/с). Следующий шаг заключается в интеграции фотодиода в одном кристалле с усилителем. Это позволит уменьшить габариты компонентов и, прежде всего, добиться меньшей чувствительности к интерференционным эффектам.

Конструкция трансиверов типа MOST

Отдельные компоненты, такие как фотодиоды и СИД, вместе с конденсаторами и ИС монтируются на обработанную и очищенную металлическую рамку (выводную рамку). Электрические контакты между

этими компонентами формируют с использованием золотой проволоки. Корпус прибора должен обладать двумя важными характеристиками: помимо удовлетворения механическим требованиям, он должен обладать наилучшими оптическими свойствами в диапазоне температур $-40...+85^{\circ}\text{C}$.

С этой целью при корпусировании используется технология литья, хорошо зарекомендовавшая себя при изготовлении миллионов СИД и обеспечивающая изготовление компонентов, пригодных для автомобильного применения. Компоненты отливаются в небольшой форме при закрытом оптическом окне (Рис. 4.35).

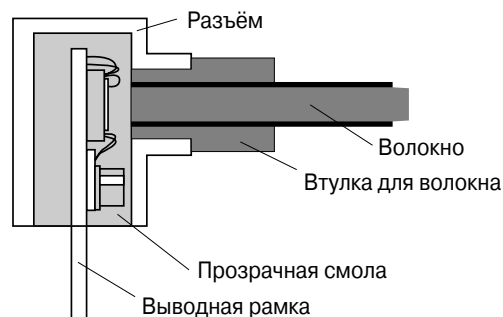


Рис. 4.35. Полостной интерфейс (CAI).

После отливки окно вскрывается, при этом образуется полость, в которую вставляется оптический разъем. Поэтому такая конструкция называется CAI (Cavity As Interface — полость как интерфейс).

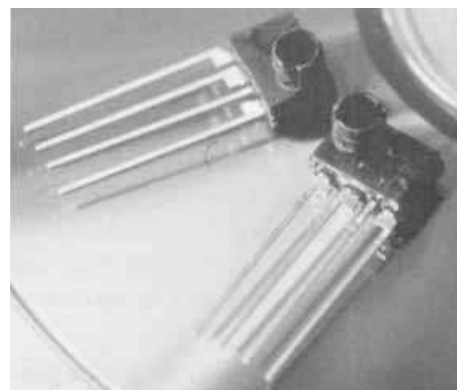


Рис. 4.36. Передатчик (слева) и приёмник (справа) MOST.

На Рис. 4.36 показан законченный прибор (слева MOST-передатчик, а справа MOST-приёмник). На Рис. 4.37 и Рис. 4.38 показан фронтальный вид изготовленного MOST после вскрытия, чтобы можно было

увидеть выводную рамку. На рисунках видны MOST-передатчик в виде СИД с драйверной ИС, а также приёмник в виде фотодиода, ИС усилителя и конденсаторного модуля.

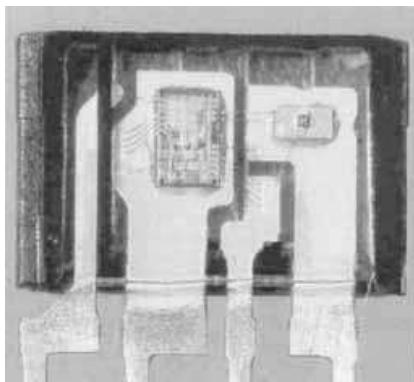


Рис. 4.37. Передатчик MOST и СИД.

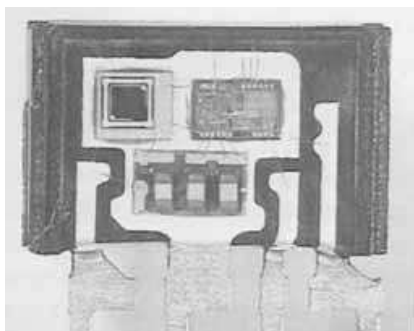


Рис. 4.38. Приёмник и фотодиод.

В дальнейшем эти компоненты встраиваются в корпус соединителя, обеспечивающего необходимую оптическую и электрическую экранировку.

Трансивер Byteflight

В трансивере Byteflight технология CAI также используется как основа формирования компонентов, что обеспечивает двунаправленное функционирование при отсутствии больших потерь на рассеяние в соединителе.

В принципе при данном подходе используется преимущество большого диаметра сердцевины пластикового волокна, составляющего примерно 1 мм. Фотодиод с большой площадью поверхности на конце линии связи преобразует весь падающий свет в ток.

Излучающие диоды передатчика по размерам значительно меньше, что позволяет вводить сжатый световой пучок в волокно без существенного влияния на фотоприёмную секцию.

В конфигурации Byteflight прогрессивная технология «кристалл на кристалле» обеспечивает возможность размещения сравнительно малого кристалла СИД непосредственно на фотодиоде, что позволяет подстыковать передатчик без потерь в мощности излучения. Площадь затеняемой области фотодиода приводит к потерям порядка 1 дБ по сравнению с полностью освещаемым фотодиодом. На Рис. 4.39 показан законченный прибор Byteflight в конфигурации CAI, а на Рис. 4.40 — внутренний вид прибора с ИС трансивера, которая будет иметь защитное оптическое покрытие для устранения интерференционных эффектов от рассеянного света.

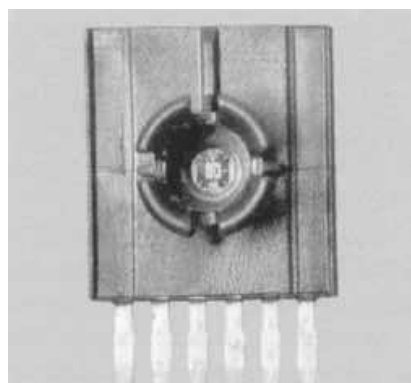


Рис. 4.39. Вид законченного прибора.

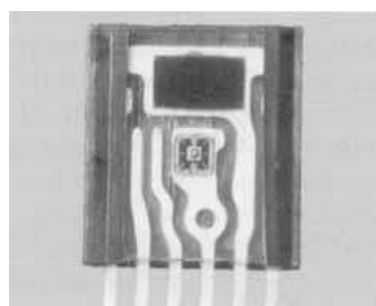


Рис. 4.40. Внутренний вид прибора с ИС трансивера.

Во время работы передатчика часть излучения попадает на фотодиод. Поскольку мощность этого излучения намного превышает минимальный уровень принимаемого излучения, в таком виде прибор не может одновременно передавать и получать сигналы, что было бы необходимо в случае дуплексного режима. Это обстоятельство учтено в Byteflight: система предназначена для работы в полудуплексном режиме.

Бюджет мощности

Для того чтобы обеспечить стабильное и надёжное функционирование системы, очень важным является расчёт бюджета мощности. При этом должны учитываться как уровень мощности, необходимый для передачи, так и минимальная мощность принимаемого сигнала. При расчётах необходимо учитывать следующие факторы:

- мощность излучения в волокне даётся для оптимально подсоединённого волокна, например при длине 30 см и 10 мА;
- в расчёт принимаются возможные дополнительные потери после первого метра POF по сравнению с нормальным ослаблением в волокне;
- величина тока драйвера даётся с определённым допуском, что влияет на мощность излучения;
- вследствие температурного коэффициента излучения, температура влияет на эффективную мощность распространяющегося излучения, что требует учёта минимальной и максимальной величины этого параметра;
- потери в интерфейсе передатчика;
- длина волокон определяет степень ослабления излучения, что, в свою очередь, зависит от длины волны излучения;
- разъём-расщепитель или заменённый соединитель приводит к дополнительным потерям;
- потери на прокладку кабеля и старение волокна.

Минимальная и максимальная величина переносимой мощности, а также минимальный и максимальный уровни затухания в кабеле задают максимальную и минимальную величину принимаемой мощности.

Фототок на входе усилителя может быть определён после учёта потерь в интерфейсе фотоприёмника и чувствительности фотодиода. Как правило, должен быть предусмотрен резервный запас на переменные факторы, величина которого может составлять вплоть до 20 дБ (100 раз).

Не вдаваясь в детали, приведём результат по мощностным параметрам: типичные величины при комнатной температуре, минимальные значения во всём температурном диапазоне и эксплуатационный ресурс (см. Табл. 4.5).

Таблица 4.5. Типичные рабочие характеристики

Параметр	Значение	Единица измерения
Скорость передачи	45 (max)	Мбит/с
Мощность излучения	−6 (typ), −10 (min)	дБм
Принимаемая мощность	−26 (typ), −24 (min)	дБм
Допустимое затухание	20 (typ), 14 (min)	дБ

Интерфейс IEEE 1394

IEEE 1394 представляет собой гибкий, простой и недорогой интерфейс, разработанный для связи мира потребительской электроники с персональными компьютерами. Благодаря стандарту HAVi (Home Audio Video interoperability) практически все лидирующие производители аппаратуры для досуга и развлечений пришли к единому набору инструкций, что обеспечивает взаимную совместную работу устройств различных производителей.

Версия для систем на кабелях с медной жилой продолжает использоваться и сейчас (S400 со скоростью передачи 500 Мбит/с).

Стандарт IEEE 1394 определяет среду, топологию и протокол. Его преимущества заключаются в следующем:

- разъёмное соединение и отсоединение с нагревом в процессе функционирования;
- масштабирование скорости передачи — в настоящее время доступны скорости передачи 100, 200 и 400 Мбит/с, при этом оптимальная скорость выбирается автоматически;
- гибкость — системы могут быть построены в желаемой конфигурации, при этом кольцевой охват не требуется;
- высокая гарантированная ширина полосы — IEEE 1394 устанавливает гарантированные критические данные.

Сравнительно высокие скорости передачи требуют использования технологии оптической связи на большие расстояния.

В настоящее время выпускаются трансиверы для организации интерфейса между MOST на 45 Мбод и S100 (125 Мбод).

С использованием мощных ИД (RCLED) и новых приёмников с повышенной степенью интеграции легко построить систему связи с длиной линии 100 м на основе стандартных POF. Во всём мире проводятся разработки трансиверов типа S200

(250 Мбод) и S400. В случае S400 традиционные пластиковые волокна уже исчерпывают свои предельные возможности, в особенности, когда существует потребность в большей длине линии связи. Здесь следует отметить, что новые волокна, представленные на многочисленных конференциях, должны быть доведены до стадии массового производства.

4.5. IrDA — передача данных с использованием инфракрасного излучения

Использование инфракрасного (ИК) излучения сегодня стало практически обычным делом, в частности, для дистанционного управления телевизором, видеоманитофоном, HiFi-системами и другими электронными устройствами. Как правило, мы пользуемся несколькими системами дистанционного управления, например для автоматического управления дверями гаража или замком в дверях автомобиля.

Большое число таких систем дистанционного управления содержат ИК-компоненты, производимые компанией Infineon. Однако в будущем использование инфракрасного излучения для передачи данных не будет ограничиваться лишь бытовой электроникой, а во всё большей степени станет охватывать офисную технику и мобильную связь: системы передачи данных для ПК, КПК, DVD-плееры, принтеры, мобильные телефоны и многие другие приборы, так как такие системы связи надёжны, безопасны и к тому же дешёвы. Другим аргументом в пользу ИК-излучения является то, что, в отличие от ВЧ связи, его использование никоим образом не ограничено условиями, в которых происходит передача данных. Благодаря единому стандарту, который действует во всём мире, у потребителя нет необходимости заботиться ни о специальных кабельных адаптерах, ни о проблеме интерфейса.

Для этих новых рынков будущего подразделение оптоэлектроники компании Infineon разработало ряд ИК-трансиверов, специально адаптированных к требованиям передачи данных (IrDT). Эти IrDT-приборы передают данные со скоростью 2.4 Кбит/с...4 Мбит/с и совместимы со спецификациями так называемого физического уровня стандарта IrDA.

4.5.1. IrDA — один стандарт для всех приборов

Ассоциация IrDA была учреждена в 1993 году с целью разработки стандартов для универсального обмена данными с использованием ИК-излучения (Рис. 4.41). С тех пор более 140 международных компаний зарегистрировались в ней в качестве официальных членов. Среди них и компания Infineon, поддерживающая эту ассоциацию. Тем временем существуют различные спецификации как для физического уровня, так и для уровня программного обеспечения, которые разрешают неограниченный обмен данными между приборами. Они оснащены соответствующими интерфейсами. В настоящее время IrDA является самым большим и наиболее эффективным в мире консорциумом для разработки ИК-систем и технологий. В качестве члена IrDA компания Infineon имеет возможность активно участвовать в разработке будущей стратегии.



Рис. 4.41. Логотип IrDA.

КПК обмениваются данными с мобильными телефонами, ПК или принтерами

Диапазон возможных применений ИК-трансиверов очень широк. Без сомнения, одним из наиболее полезных применений является обмен данными между КПК и периферийными устройствами. Можно ожидать, что все новые КПК будут оснащены интерфейсами IrDA. Владельцы КПК смогут передавать данные со своих устройств настольному ПК или принтеру без использования каких-либо проводных соединений между приборами. Уже сегодня многие пользователи PDA («персональных цифровых помощников») пользуются данной опцией, когда периферийные устройства оснащены ИК-интерфейсом. Другими вида-

ми продукции, которые могли бы получить большие преимущества от использования этой технологии, являются мобильные телефоны. Передача данных при помощи ИК-излучения между мобильными телефонами и КПК позволит пользователям во время путешествий, например, проверять электронную почту или общаться с бизнес-партнёрами по электронной почте. Крупный производитель цифровых камер анонсировал своё намерение оснащать выпускаемую им продукцию совместимыми IrDA-интерфейсами.

IrDA обладает преимуществами даже при разработке инструментов и предоставлении различных услуг

Системы IrDA имеют огромные преимущества не только в бытовой технике, но и в промышленной электронике. Во всё большем объёме на рынок выходят высокофункциональные PDA для промышленных применений. Подобно отвёртке и плоскогубцам, они становятся всё более незаменимым стандартным инструментом в мастерском ящике технического специалиста сервисной службы. Системы IrDA используются также и в ряде других насущных применений, таких как диагностические приборы для двигателей автомобилей или приборы ввода данных для дантистов, медсестёр, учителей, обслуживающего персонала и т.д.

В случае применений, требующих высокой безопасности, таких как «электронный кошелёк», благодаря инфракрасному излучению невидимым образом изменяется, например, владение денежными средствами. Компьютерные игры, которые уже являются фаворитами, в будущем не будут нуждаться в проводах для подключения к приборам. В принципе, любой прибор, которому сегодня требуются провода для передачи данных управления, является потенциальным кандидатом для переноса данных с помощью ИК-излучения. IrDA-модуль, который может передавать и принимать данные, является ключевым компонентом, готовым для использования в таких продвинутых системах.

Для дистанционного управления радио- и телевизионными приёмниками знакомый ИК-излучатель используется в качестве передатчика, излучение которого модулируется ИС. В этом случае данные передаются только в одну сторону.

4.5.2. Полный IrDA-стандарт

При соответствующем программном обеспечении сигналы будут полностью удовлетворять требованиям стандарта IrDA. Имея размеры $13 \times 6 \times 6$ мм, IrDA-модуль может быть размещён практически в любом корпусе, что не всегда возможно при использовании альтернативных схем на дискретных компонентах.

Для устройств, где пространство для установки чрезвычайно мало, выпускается модуль IRV 6000 (**Рис. 4.42**, левый прибор) с размерами всего $9.1 \times 4.1 \times 4.3$ мм, что делает его идеально пригодным для применения в PDA или мобильных телефонах. Его технические данные в значительной степени сравнимы с параметрами модулей IRM 3001/3105 (**Рис. 4.42**, правый прибор) и, кроме того, впервые становится возможной двунаправленная связь с использованием одного компонента. Это позволяет передавать и принимать сигналы в полудуплексном режиме на короткие расстояния (вплоть до 1 м). При использовании даже на очень небольшом расстоянии не происходит перемодуляции. И поскольку электронная схема модуляции уже встроена в модуль, отпадает необходимость подключения внешних компонентов.

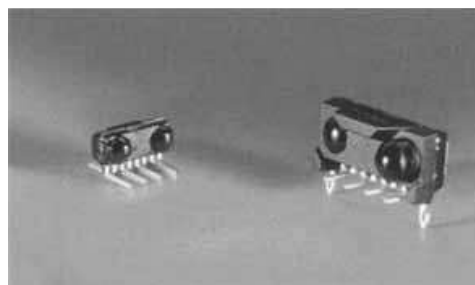


Рис. 4.42. Модули типа IRM 6000 и IRM 3105.

Все типы устройств могут быть реализованы в однорядной или DIL-конфигурации, которая более пригодна для SMT-сборок. По требованию выпускается серия IRM 300X с набором боковых направляющих штырей для автоматического встраивания.

В процессе разработки находятся модули IRM 3401 и 3405 на более высокие скорости передачи вплоть до 4 Мбит/с. Эти модули также полностью совместимы с IrDA.

Пользователям, желающим получить полностью готовое решение, предлагается ИС кодера/декодера IRM 7000, значитель-

но упрощающая подключение к интерфейсу асинхронного приёмопередатчика (UART).

Подразделение оптоэлектроники компании ориентировано и на удовлетворение специальных требований заказчика — на тот случай, когда невозможно найти оптимальное решение с использованием стандартных компонентов.

Информация в Интернете

Справочные данные и другие рекомендации по применению можно найти в Интернете на сайте: <http://www.infineon.com>, а информация об организации IrDA находится по адресу: <http://www.irda.org>.

5. ДАТЧИКИ

5.1. Общий обзор

Датчики преобразуют физические величины, такие как давление, температура, напряжённость магнитного поля и др., в электрические сигналы, которые можно обрабатывать. В зависимости от требований степень сложности выходного сигнала может варьироваться от изменения сопротивления до калиброванного выходного напряжения в цифровой форме.

В датчиках серии КТУ сопротивление изменяется с температурой с высокой воспроизводимостью. Датчики серии КР 200 содержат простой мост сопротивлений, на который подаётся входное напряжение, при этом он выдаёт выходное напряжение, пропорциональное давлению.

С другой стороны, встраивание датчика в интегральную схему открывает возможности обработки сигнала непосредственно в модуле датчика. Таким образом, становится возможным калибровать ИС датчика по заданной выходной характеристике или в диагностических целях переключать её в различные рабочие состояния. ИС датчика способны анализировать сложные входные сигналы и, как результат, переключаться между цифровыми выходными состояниями.

Технически интеграция датчиков в кремниевую технологию уже реализована в целом ряде датчиков. Среди первых интегрированных датчиков оказались датчики магнитного поля. В данном случае используется эффект Холла в кремнии. С развитием технологии микрообработки поверхности кремния датчики давления также были интегрированы в современную КМОП-технологию, что обеспечивает цифровую обработку результатов измерений.

По сравнению с датчиками на основе дискретных компонентов использование «интеллектуальных» датчиков оказалось конкурентоспособным, прежде всего, в автомобильной электронике. При этом предоставляются широкие возможности для оптимизации всей системы с точки зрения обмена данными, точности и контроля неисправностей.

Существуют полупроводниковые датчики различных физических величин для различных областей применения. Следует упомянуть датчики ускорения и скорости вращения, для которых также были проработаны варианты с использованием монолитных интегральных схем. Кремниевый микрофон также относится к полупроводниковым датчикам.

Специальный тип технического датчика — так называемый «датчик отпечатков пальцев», о котором более подробно будет рассказано в главе 8.

5.2. Датчики магнитного поля

5.2.1. Дискретные датчики Холла

Основы функционирования

Эффект Холла, названный в 1879 году в честь Эдвина Холла, является результатом действия силы Лоренца на электроны, которые движутся в поперечном магнитном поле. На **Рис. 5.1, а** представлен ток в среде без магнитного поля. Можно видеть, что точки постоянного электрического поля располагаются вдоль прямой линии, перпендикулярной направлению протекания тока. На **Рис. 5.1, б** показано протекание тока в среде в условиях магнитного поля, направленного под прямым углом к элементу Холла.

Сила Лоренца, действующая на движущиеся электроны, определяется соотношением:

$$\vec{F} = -q \cdot \left(\vec{v} \times \vec{B} \right),$$

где q — заряд электрона,
 v — скорость электронов,
 B — магнитная индукция.

Сила Лоренца перпендикулярна как направлению протекания тока, так и магнитному полю. Следствием этого является возникновение электрического поля поперёк полупроводника, что соответствует напряжению, которое называется напряжением Холла.

При приложении магнитного поля углы между эквипотенциальными линиями (пун-

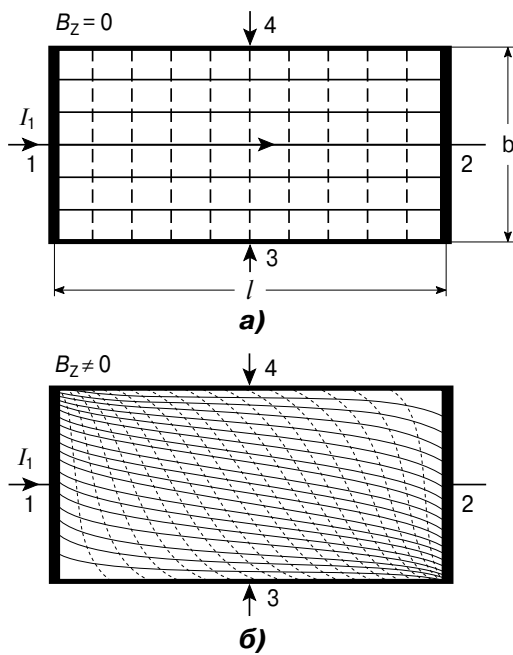


Рис. 5.1. Эквипотенциальные линии протекания тока в отсутствие поперечного магнитного поля (а) и в условиях поперечного магнитного поля (б).

ктирные линии на **Рис. 5.1**) и линиями протекания тока изменяются. Угол является функцией подвижности электронов μ и, таким образом, функцией дрейфовой скорости электронов. Для большинства полупроводников μ настолько мала, что эффект Холла не имеет практического значения. В то же время есть и ряд исключений в случае таких полупроводников, как кремний, германий и, в особенности, соединений $A^{III}B^V$, таких как арсенид галлия и антимонид индия.

Конструкция датчиков Холла

На **Рис. 5.2** показано схематическое представление принципа работы датчика. Полосковая пластина из подходящего материала толщиной d , длиной l и шириной b проводит ток I_1 в продольном направлении и подвергается воздействию магнитного поля B_z , перпендикулярного пластине. В этом случае между точками 3 и 4 возникает разность потенциалов, которую называют напряжением Холла V_{20} . Величина этого напряжения определяется выражением:

$$V_{20} = \frac{R_H}{d} \cdot I_1 \cdot B_z \cdot G,$$

где R_H — константа Холла полупроводника.

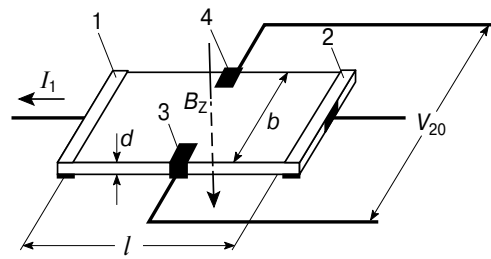


Рис. 5.2. Иллюстрация принципа работы датчика Холла.

Влияние токовых контактов и контактов, с которых снимается разность потенциалов, учитывается с помощью геометрического коэффициента G . В идеальном случае точечных контактов G равнялось бы 1. Однако из-за конечных размеров контактов на практике величина G составляет промежуточное значение между 0 и 1.

Ток вводится и выводится через контакты 1 и 2, а напряжение Холла измеряется между точками 3 и 4. Эффективная площадь датчика Холла ограничивается концами электродов. За счёт изменения размеров и геометрии датчики могут быть оптимизированы для выполнения различных функций. На **Рис. 5.3, а...в** приведены три наиболее распространённые формы датчиков.

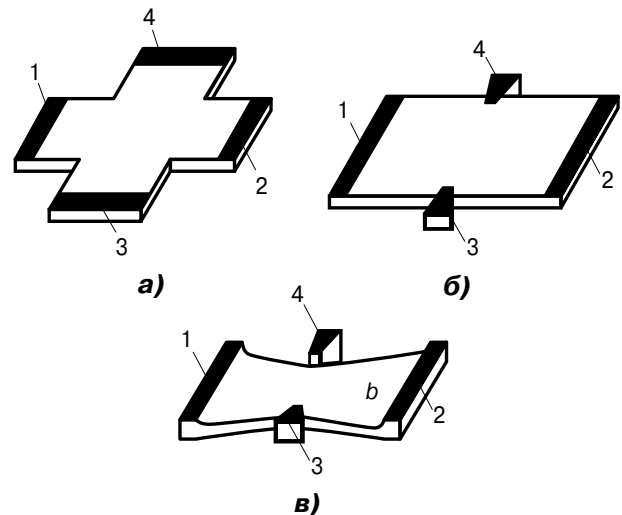


Рис. 5.3. Самые распространённые формы датчиков Холла: а — крестообразный симметричный датчик с высокой чувствительностью к магнитному полю; б — прямоугольный датчик с большим напряжением Холла; в — датчик с геометрией бабочки, который благодаря фиксации тока обладает высокой чувствительностью к магнитным полям.

Концепции и основные технические данные

Номинальный ток I_{IN}

Номинальный ток устанавливается на таком уровне, при котором в нормальных условиях датчик приходит в равновесие с небольшим перегревом в 10...15°C. Влияние температуры на коэффициент Холла и, следовательно, на напряжение Холла показано на **Рис. 5.4**; в спецификациях это влияние определяется значением $TC_{V_{20}}$.

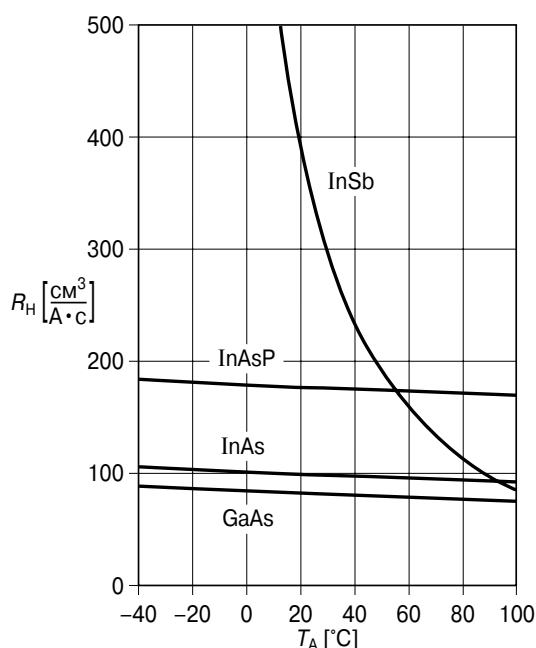


Рис. 5.4. Температурная зависимость постоянной Холла.

Коэффициент Холла R_H является константой материала, которая, как видно из **Рис. 5.4**, зависит от температуры. С другой стороны, в определённых пределах данный коэффициент не зависит от амплитуды магнитного поля. Для арсенида галлия этот предел располагается вблизи 1 Тл.

Ненагруженное напряжение Холла V_{20} (напряжение разомкнутой цепи)

В спецификациях приводятся значения ненагруженного напряжения Холла, представляющего собой выходное напряжение V_{20} , которое генерируется между электродами ненагруженного элемента Холла при пропускании номинального тока I_{IN} и приложении поперечного магнитного поля B_z .

Чувствительность к индукции в разомкнутой цепи K_{BO}

Чувствительность к магнитной индукции в разомкнутой цепи определяется следующим уравнением:

$$K_{BO} = \frac{V_{20}}{(I_{IN} \cdot B_z)} [B / AT].$$

Омическая компонента при постоянном токе

Из-за технологических допусков по воспроизведению геометрии чипа, а также из-за неоднородности материала пластины Холла возникает дополнительное, омическое по природе напряжение, которое при $B_z = 0$ приводит к дополнительной компоненте, перекрывающей напряжение Холла. Его величина определяется соотношением $V_{2R0} = I_1 \cdot R_{10}$. Максимальная величина R_{10} приводится в спецификациях и она может быть скомпенсирована потенциометром с большим сопротивлением, как это показано на **Рис. 5.5**.

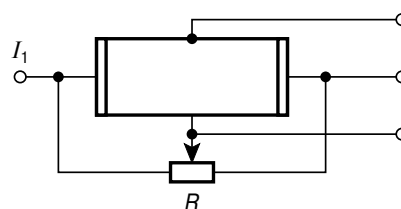


Рис. 5.5. Схема компенсации для омической компоненты постоянного тока.

Индуктивная компонента A_2

Контактные проволоочки к электродам элемента Холла неизбежно образуют петлю, накрывающую область A_2 . Эту петлю даже при тщательной трассировке невозможно свести к нулю. Как следствие, даже при проходящем токе $I_1 = 0$ плотность флуктуирующего магнитного потока наводит в петле напряжение, которое может быть измерено между холловскими электродами и определяется следующим выражением:

$$V_{10} = A_2 \cdot \frac{dB_z}{dt}.$$

Этот параметр называется статической индуктивной компонентой и выражается как площадь петли в см². Он зависит от

нестационарного магнитного потока, его амплитуды и частоты.

Температурная зависимость

Температурная зависимость датчика Холла вызывается двумя эффектами: температурной зависимостью коэффициента Холла и, соответственно, ненагруженного напряжения Холла с температурным коэффициентом TC_{V20} , а также температурной зависимостью удельного сопротивления, т.е. внутреннего сопротивления прибора с температурным коэффициентом TC_{R10} . Средние значения этих параметров приводятся в спецификациях.

В разомкнутой цепи влияние имеет только TC_{V20} , а в цепи с нагрузкой следует учитывать как TC_{V20} , так и TC_{R10} .

Допустимая величина тока управления I_{IM}

Максимально допустимый ток управления сильно зависит от используемого корпуса и режима работы, т.е. от способа охлаждения и окружающей температуры. В спецификации приводится максимальное значение в спокойной атмосфере (неподвижном воздухе). Если эта величина превышает без соответствующих мер охлаждения, то может произойти перегрев с последующим повреждением датчика.

Теплопроводность G_{thc} между материалом датчика и корпусом

Для того чтобы иметь возможность рассчитать максимально возможный управляющий ток для определённых методов охлаждения, в спецификации приводятся подробные данные о теплопроводности между датчиком и поверхностью корпуса. Приводимые данные относятся к теплу, рассеиваемому обеими поверхностями корпуса.

Практические применения

Датчики сигналов

Элементы Холла используются как датчики сигналов во множестве применений. В отличие от индуктивных датчиков, их выходной сигнал не зависит от рабочей частоты, поэтому их можно использовать на очень низких частотах вплоть до нулевой частоты. Основной областью применения являются бесщёточные двигатели постоянного тока, в которых датчик Холла возбуж-

дается непосредственно магнитным полем статора. В других применениях датчики Холла возбуждаются брусковыми магнитами или магнитными полосками, содержащими данные, или же токами, протекающими по расположенным рядом проводникам.

Определение положения

При данном методе может осуществляться просто определение достигнутого положения объекта (переключатель предела), установление факта, что объект занимает какое-либо определённое положение (т.е. определение присутствия объекта), или же датчик может непрерывно сообщать о перемещении объекта с тем, чтобы определять силу, давление, изгиб или ускорение.

В общем случае измерение этого параметра не требует линейности характеристик датчика при условии, что нелинейные характеристики преобразователя (например, диафрагмы для измерения давления) могут быть скомпенсированы или приведены к линейному виду с помощью электронных методов.

Фронтальный режим

На Рис. 5.6 показан датчик KSY-14, который возбуждается фронтально маленьким магнитом на основе SmCo диаметром 4 мм и высотой 2 мм. В данном случае датчик позиционируется перед полюсом магнита. График показывает зависимость напряжения Холла от воздушного зазора.

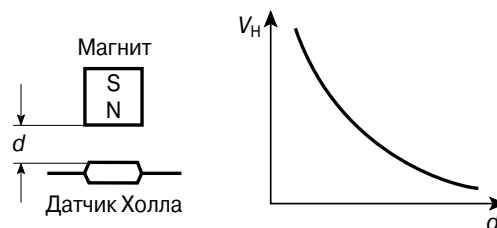


Рис. 5.6. Фронтальный режим для датчика Холла типа KSY-14.

5.2.2. Интегральные датчики Холла с заказными ИС (ASIC)

Датчики Холла на дискретных компонентах, описанные в разделе 5.2.1, требуют от пользователя достаточных затрат для реализации последующей обработки сигналов. По этой причине промышленности не-

обходимы, главным образом, датчики, интегрированные с заказными ИС. Эти специализированные ИС (ASIC) предлагают пользователю ряд преимуществ по сравнению с модульным подходом.

- Первым преимуществом является простое устранение сдвига рабочей точки: используя метод так называемого холловского зонда с переменной траекторией тока (SCHP), омическая компонента (сдвиг) может быть выделена из полезного сигнала, пропорционального магнитному полю, и в практических целях адекватно удалена. Данный метод, иллюстрируемый на **Рис. 5.7**, реализуется в симметричных зондах Холла, в которых входные и выходные боковые электроды могут меняться местами. Для этого в течение первой тактовой фазы ток инжектируется в зонд через контакты 1 и 2, и выходное напряжение $V_{20} + V_{2R0}$ снимается с контактов 3, 4. Во время второй тактовой фазы ток инжектируется в зонд через контакты 3 и 4, а выходное напряжение $V_{20} - V_{2R0}$ снимается с контактов 1 и 2. Видно, что знак смещения V_{2R0} при этом изменяется, в то время как знак сигнала V_{20} , пропорционального магнитному полю, не изменяется. Таким образом, простое усреднение позволяет устранить сдвиг.

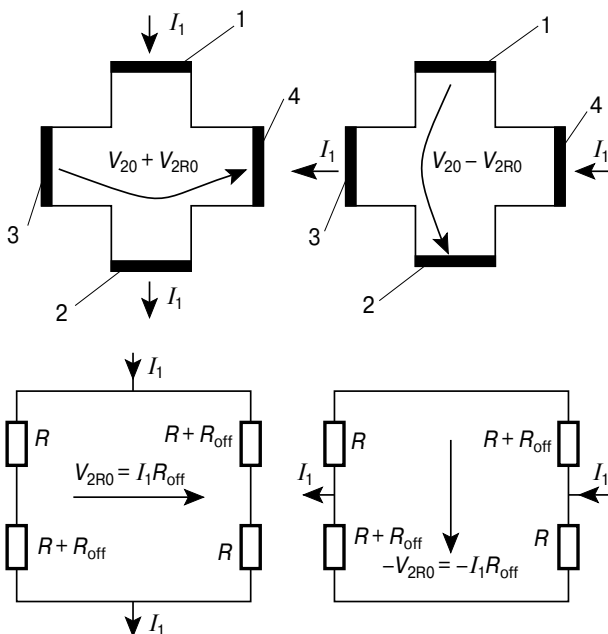


Рис. 5.7. Устранение омической компоненты прямого тока с помощью метода SCHP.

Хотя данный принцип был известен давно, его промышленное применение стало возможным с середины 90-х годов в результате успехов аналоговой обработки сигналов с использованием стандартной КМОП-технологии. Благодаря этой технологии оказывается возможным поддерживать магнитный сдвиг всей системы, включая холловский зонд и схему обработки сигнала, на уровне менее 50 мкТл.

- Вторым преимуществом является возможность усиления без смещения: амплитуда выходных сигналов с зонда Холла составляет порядка мВ. Это означает, что сигналы должны быть усилены, по крайней мере, в 1000 раз. Недостатком традиционных усилителей постоянного тока с таким большим коэффициентом усиления является проявление эффекта смещения. Однако в интегральных датчиках Холла с ASIC, использующих метод SCHP, холловский зонд уже работает в переключательном режиме, что позволяет осуществлять обработку сигнала стробируемыми усилителями без эффекта сдвига. В связи с тем, что реализация такой концепции требует опыта в проектировании аналоговых схем, потребителю было бы выгодно, чтобы изготовитель объединил в одном чипе схему обработки сигнала и интегральный зонд Холла.
- Третьим преимуществом данного метода является высокая температурная стабильность: интегральные датчики Холла часто используются в жёстких температурных условиях. Стандартным является диапазон температур от -40 до $+150^\circ\text{C}$, а в специальных применениях верхняя граница может достигать $+210^\circ\text{C}$. Для минимизации тепловых токов утечки и паразитных ёмкостных петель, через которые шумовые импульсы могут проходить в схему обработки сигнала, все элементы электронной схемы, которые чувствительны к интерференционным эффектам, в особенности зонд Холла, должны быть как можно меньше. Интегральный подход обеспечивает снижение индуктивной компоненты до пренебрежимо малого уровня. Антенный эффект проволоочной разводки чипа также существенно слабее по сравнению с аналогичным эффектом дискретной сборки из-за длинных выводов. В случае специ-

альных требований по электромагнитной совместимости, таких как микропробой, имеется возможность интегрировать фильтрующие ёмкости в корпус. Это демонстрируется на **Рис. 5.8** для ABS-датчика типа TLE 4942C в корпусе P-SSO-2-2. Кроме того, проходящие паразитные сигналы сильно ослабляются в кристалле за счёт применения защитных диодов и стабилизированных источников питания. Благодаря встроенной защите на основе стабилитронов, защите от перегрева и короткого замыкания, интегральные датчики Холла ASIC очень легко использовать, при этом они не будут повреждены даже при некорректной установке (например, если будут перепутаны выводы источника питания).

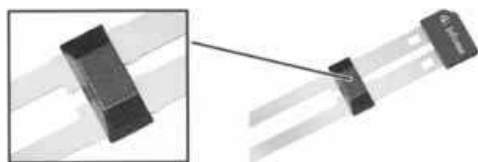


Рис. 5.8. В корпус типа P-SSO-2-2 для датчика TLE 4942C встроен фильтрующий конденсатор (деталь на вставке) на выводную рамку ИС.

- Четвёртым преимуществом является калиброванный цифровой выходной сигнал: во время сборки датчика магнитного поля в виде модуля допуски возрастают. Кроме того, источниками магнитного поля являются, как правило, недорогие постоянные магниты, подверженные существенным вариациям. Указанные эффекты делают необходимой калибровку ASIC-датчика после сборки модуля. Для этого ИС датчика содержит ЗУ для дан-

ных калибровки, а также интерфейс для обмена данными во время процедуры калибровки. В этом смысле можно говорить о приборе как об интеллектуальном датчике. Используемое ЗУ, как правило, выполняется в виде предохранителей, как это описано в разделе 5.3.2.

- Если раньше сигнал от дискретного датчика Холла должен был пройти аналоговое усиление с последующей оценкой и калибровкой микропроцессором, то современный ASIC-датчик Холла обеспечивает уже калиброванный цифровой выходной сигнал, который может содержать также информацию по сбоям (таким, как перегрев ИС датчика). Это снижает нагрузку на микропроцессор и распространяет «интеллектуальность» на целую систему, что приводит к более высокой скорости прохождения данных в сочетании с повышением надёжности.

Представителем современных интегральных датчиков Холла является линейный датчик Холла TLE 4990, который будет описан далее. Данный модуль преобразует компоненту магнитного поля, перпендикулярную поверхности чипа, в выходное напряжение V_{OUT} :

$$V_{OUT} = S \cdot B_Z + V_{ZERO}.$$

С этой целью для устранения эффекта смещения зонда Холла используется метод SCHP, рассмотренный выше (**Рис. 5.9**). Затем сигнал усиливается примерно в 5000 раз. Для этого модулю требуются 30 бит: 13 бит используются для установки магнитной чувствительности S в диапазоне 15...180 мВ/мТл, 11 бит обеспечивают установку выходного напряжения при 0 мТл ($= V_{ZERO}$).

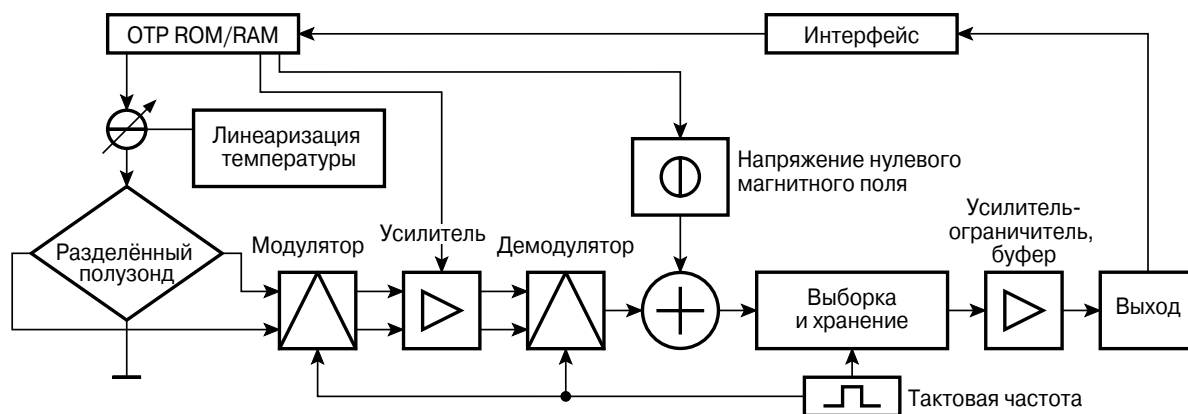


Рис. 5.9. Блок-схема интегрального линейного датчика Холла.

Кроме того, температурный коэффициент магнитной чувствительности может быть задан таким образом, чтобы он, например, компенсировал тепловые эффекты постоянных магнитов, используемых в модуле.

Особенностями этого модуля являются его высокое разрешение, линейность и слабый дрейф выходного напряжения при изменении температуры и в процессе наработки. В данном случае аналоговый выходной сигнал прямо пропорционален рабочему напряжению. Это особенно важно, если выходное напряжение V_{OUT} оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с рабочим напряжением датчика Холла в качестве опорной меры. Если рабочее напряжение изменяется на 10% по сравнению с номинальным значением 5 В, то ASIC выдаёт выходное напряжение, которое также изменяется на 10%. В то же время цифровой код АЦП остаётся неизменным, поскольку он рассчитывается как отношение выходного напряжения датчика и опорного напряжения.

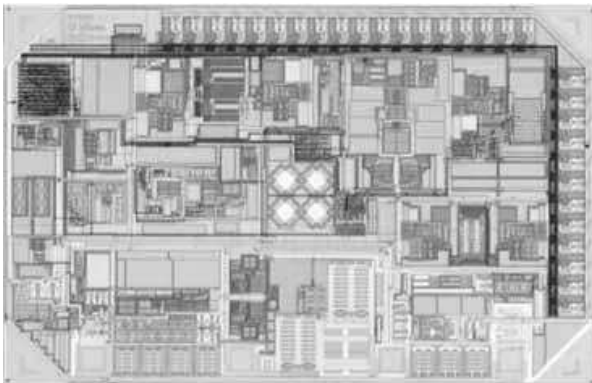


Рис. 5.10. Фотография кристалла ИС линейного датчика Холла типа TLE 4990.

На **Рис. 5.10** показана фотография кристалла микросхемы TLE 4990. В середине кристалла можно увидеть 4 зонда Холла. Вдоль правого и верхнего краёв кристалла расположены 30 полостных предохранительных ячеек. Вдоль нижнего края располагаются 4 контактные площадки для подсоединения к выводам модуля: TST, OUT, GND, VDD (слева направо), при этом вывод TST используется только для тестирования. Модуль TLE 4990 поставляется в корпусе типа P-SSO-4-1. Серия корпусов типа P-SSO-4-1 была разработана компанией Infineon специально для датчиков магнитного поля таким образом, чтобы их можно

было использовать в магнитных цепях с воздушным зазором всего 1.1 мм.

5.2.3. Датчики на основе гигантского магниторезистивного эффекта (GMR)

Магнитные датчики прекрасно подходят для всех видов бесконтактного детектирования данных положения, зазоров, скоростей, а также детектирования вращения, бесконтактного измерения токов и мощности. При реализации этих функций гарантируется работа датчиков даже в жёстких условиях окружающей среды, связанных с наличием грязи, абразивной крошки и высокой температурой. Это обеспечивает широкое использование датчиков магнитного поля особенно в автомобильных и промышленных применениях, а также обуславливает постоянное расширение номенклатуры датчиков различных типов на рынке.

Датчики на основе гигантского магниторезистивного эффекта (GMR) устраняют слабое место обычных магниторезисторов и датчиков Холла, связанное с их высокой чувствительностью к флуктуациям воздушного зазора. В связи с тем, что все традиционные магнитные датчики реагируют на силу магнитного поля, даже малейшие изменения зазора между магнитом и датчиком будут приводить к существенным изменениям сигнала, чего можно избежать за счёт существенных затрат и усложнения обработки сигнала.

В отличие от них, GMR-датчики, которые компания Infineon специально разработала для применений, связанных с детектированием положения, измеряют только направление внешнего поля независимо от его интенсивности, благодаря чему допускаются достаточно большие зазоры и установочные допуски. В результате процедура сборки у пользователя существенно упрощается, и издержки снижаются. При соответствующем возбуждении допустимы воздушные зазоры вплоть до 25 мм, что открывает совершенно новые применения в области магнитного детектирования.

В последующих разделах сначала описываются основы эффекта GMR, конструкция и функционирование GMR-датчика. Затем следуют примеры применения, демонстрирующие разнообразие функций, которые просто и эффективно могут реализовать GMR-датчики.

Основы гигантского магниторезистивного эффекта

В конце 1980-х годов было обнаружено изменение сопротивления более чем на 50% в магнитном поле при низких температурах в структурах, содержащих очень тонкие слои железа и хрома. Поскольку такие слоистые структуры на основе железа и других магнитных материалов реагируют на магнитное поле (**Рис. 5.11**), данное явление получило у специалистов название гигантского магниторезистивного эффекта (GMR).

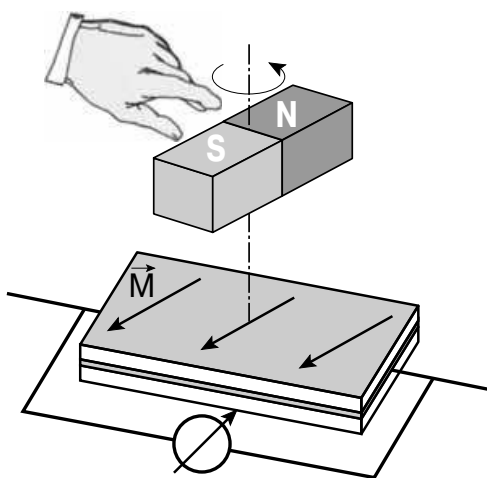


Рис. 5.11. Ориентация внешних слоёв во внешнем магнитном поле.

Толщина отдельных слоёв в структуре составляет несколько нанометров. Немагнитная медь разделяет слои железа и ферромагнитного кобальта (**Рис. 5.12**). Слои меди настолько тонки, что слои кобальта взаимодействуют с образованием искусственной антиферромагнитной среды (ААР). Внешние слои образуют магнито-мягкое железо, при этом они ориентируются по внешнему магнитному полю, тогда как магнито-жесткий кобальт сохраняет свою постоянную намагниченность.

Спины электронов во внешних слоях также ориентируются по магнитному полю. Средняя длина свободного пробега электронов со спинами параллельно намагниченности в искусственном антиферромагнетике превышает толщину набора слоёв, что приводит лишь к слабым потерям на рассеяние. С другой стороны, электроны с антипараллельной ориентацией спинов дают вклад в возрастание сопротивления, поскольку они в большей степени рассеива-

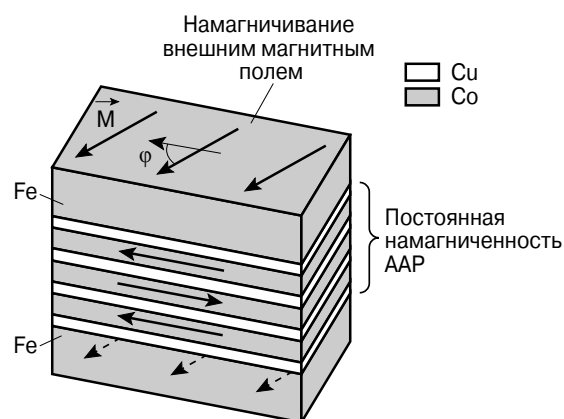


Рис. 5.12. Последовательность слоёв: внешние слои железа, структура искусственного антиферромагнетика (ААР) на основе слоёв меди и кобальта.

ются в слоистой структуре. Если магнитная ориентация магнито-мягких и жестких слоёв одна и та же, то электроны испытывают рассеяние в меньшей степени, и проявление эффекта минимально; если же ориентация полностью противоположна, то сопротивление достигает максимального значения (**Рис. 5.13**). Эффект GMR не зависит от направления тока; угол между ориентацией намагниченности в магнито-жестких и мягких слоях является единственным фактором, определяющим полное сопротивление системы.

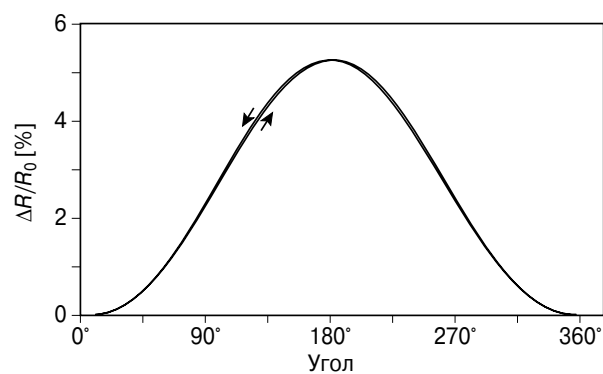


Рис. 5.13. Относительное изменение сопротивления как функция угла между намагниченностью магнито-жестких и мягких слоёв.

В пределах широкого магнитного окна, в котором намагниченность магнито-мягких слоёв вращается с внешним полем, в то время как в магнито-жестких слоях она остаётся неизменной, сопротивление зависит лишь от направления внешнего магнитного поля (режим насыщения).

С увеличением температуры эффективность $GMR \Delta R/R_0$ падает из-за теплового возбуждения колебаний решётки и спиновых волн, из-за возрастания исходного сопротивления R_0 , а также из-за ослабления общей ориентации спинов. Экспериментально было установлено постоянство температурного коэффициента GMR.

Конструкция

Ультратонкие слои, обеспечивающие антиферромагнитное взаимодействие, требуют самых современных методов технологии напыления. Система, используемая компанией Infineon, содержит одиннадцать слоёв общей толщиной 25 нм. Магнитные слои кобальта и немагнитные медные слои в качестве прокладок образуют искусственный антиферромагнетик.

Для того чтобы гарантировать номинальное сопротивление величиной более 700 Ом, на планарной стороне вытравливаются токовые дорожки в виде меандра (Рис. 5.14). Изменение вследствие эффекта GMR превышает 4%.

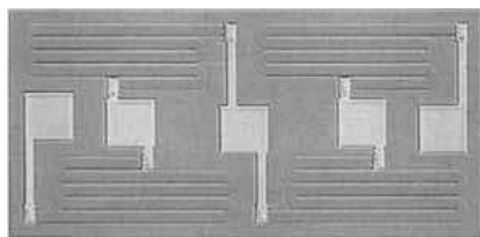


Рис. 5.14. Кристалл мостовой схемы датчика B6 на основе GMR.

Сильное внешнее поле, прикладываемое в процессе изготовления, ориентирует искусственный антиферромагнетик и устанавливает жёсткую намагниченность индивидуальных токовых дорожек. GMR-резисторы могут использоваться и как самостоятельные датчики, и как интегральные мосты (Табл. 5.1).

Полумосты содержат два резистора с антипараллельной намагниченностью, соединённые последовательно. Датчик типа GMR B6 (Рис. 5.15, а) содержит два полумоста, соединённые параллельно и имеющие противоположную ориентацию намагниченности; эти же элементы могут быть соединены и по полной мостовой схеме. Скрещённые полумосты датчика GMR C6 (Рис. 5.15, б) имеют жёсткую намагничен-

Таблица 5.1. Варианты GMR-датчиков

Тип		Ме- анд- ры	Ориента- ция намаг- ниченности		Корпус
S4, S6	Отдельный датчик	1	0°		SOH SMT (MW6)
B6	1 полный мост/ 2 включённых встречно- параллельно полумоста	2 + 2	0° 180°	180° 0°	SMT (MW6)
C6	2 скрещённых полумоста	2 + 2	0° 180°	90° 270°	SMT (MW6)

ность в 90° по отношению друг к другу. Стрелки на рисунке показывают направление внутренней намагниченности.

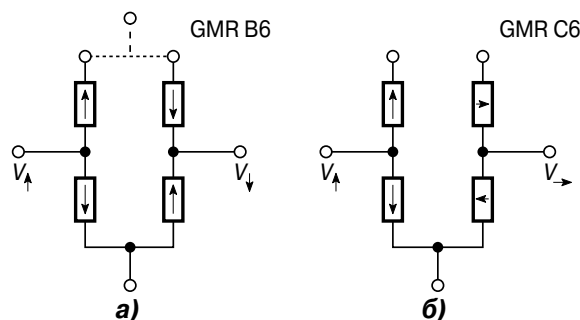


Рис. 5.15. Конфигурация элементов датчика на мостовых кристаллах. GMR B6 (а): 2 встречно-параллельных полумоста или 1 мост; GMR C6 (б): 2 скрещённых полумоста.

Функционирование

В условиях приложенного внешнего поля сопротивление GMR-резистора изменяется в зависимости от угла между направлениями фиксированной внутренней жёсткой намагниченности и направлением намагниченности мягкого магнитного слоя (Рис. 5.13), позволяя отслеживать магнитное поле с гистерезисом амплитудой менее 2°. Изменение детектируется в виде изменения напряжения отдельного датчика или мостовой схемы. Форма сигнала имеет вид косинусной функции с протяжённой линейной областью.

Мостовые схемы

В то время как сопротивление отдельных резисторов изменяется в магнитном поле всего на несколько процентов по сравнению со своей полной величиной, с мостовой схе-

мы может быть снято разностное напряжение, что соответствует изменению только сопротивления без какого-либо сдвига. Величины, зарегистрированные в точках Sens 1 и Sens 2 (Рис. 5.16, в), оцениваются непосредственно или после усиления.

Мостовые датчики GMR B6 и GMR C6 содержат по 4 индивидуальных датчика, интегрированных в одном чипе, в конфигурации двух полумостов с различной исходной намагниченностью. Каждый полумост содержит два индивидуальных датчика с антипараллельной ориентацией (Рис. 5.16). Сигнал от полумоста снимается как разность двух фиксированных сопротивлений, и он изменяется симметрично относительно нулевой точки. Различные предустановочные ориентации фиксированной намагниченности индицируются фазовым соотношением сигналов.

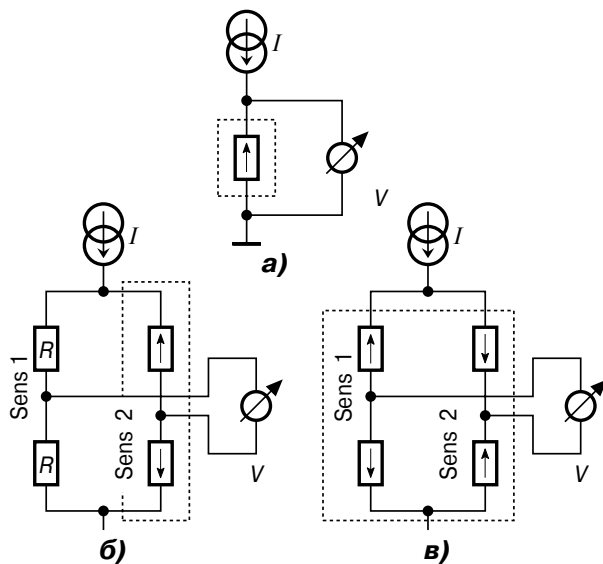


Рис. 5.16. Измерение напряжения моста: а — на отдельном датчике; б — на полумосте с делителем; в — на полном мосте.

Два сигнала от скрещённых полумостов (GMR C6) сдвинуты друг относительно друга на 90° , что позволяет однозначно определить направление магнитного поля по всем ориентациям (нижняя осциллограмма на Рис. 5.17).

Мост, образованный двумя встречно-параллельными полумостами (GMR B6), не требует внешних опорных сопротивлений. Два полумоста вырабатывают противоположенные сигналы так, что их разность обеспечивает двойную амплитуду полного сигнала (верхняя осциллограмма на Рис. 5.17).

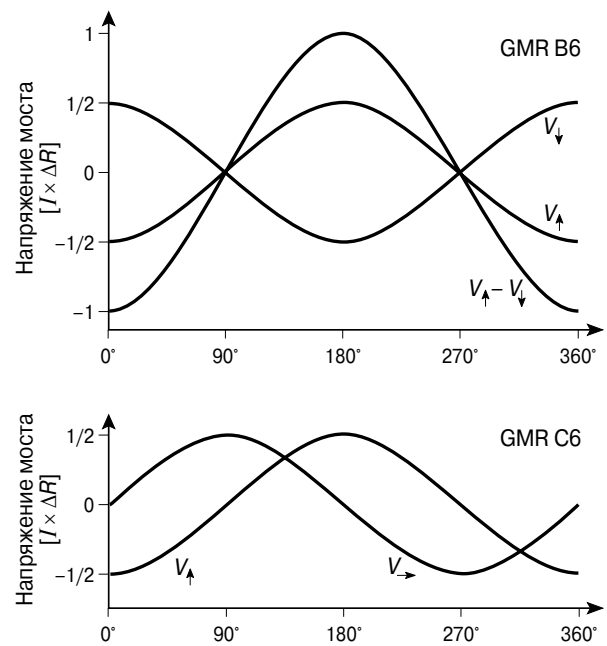


Рис. 5.17. Мостовое напряжение на полумостах ($V_\uparrow$, $V_\downarrow$, $V_\rightarrow$) и на полном мосте ($V_\uparrow - V_\downarrow$) при вращении внешнего магнитного поля.

Пространственные характеристики

Максимальный уровень сигнала устанавливается, как только внешнее магнитное поле достигает уровня, достаточного для того, чтобы поддерживать слой мягкой намагниченности в состоянии, обеспечивающем вращение ориентации намагниченности с внешним полем (Рис. 5.18). Рабочий режим заканчивается в точке, где внешнее магнитное поле настолько сильно, что оно начинает влиять на слой жёсткой намагниченности и необратимо уменьшает чувствительность.

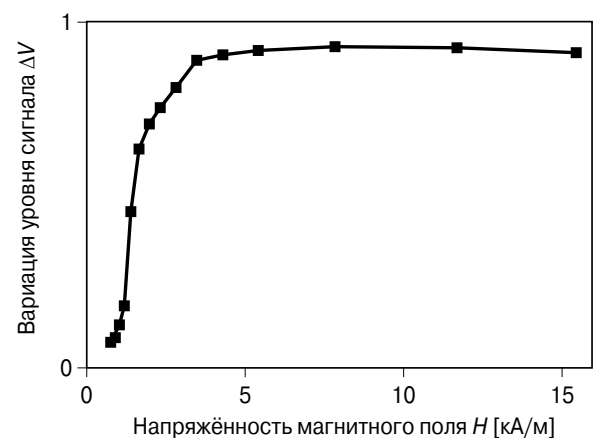


Рис. 5.18. Максимальное изменение уровня сигнала ΔV как функция уровня магнитного поля.

В пределах «магнитного окна» от 5 до 15 кА/м изменение уровня сигнала не зависит от силы поля; GMR-датчик определяет только направление приложенного поля.

Расстояние между магнитом и датчиком не играет никакой роли до тех пор, пока интенсивность поля находится в пределах окна. Например, на **Рис. 5.19** показаны расстояния от магнита на основе самария-кобальта в аксиальном и поперечном направлении, при которых изменение сигнала составляет 100%, 75% и 50% от максимального значения. Допустимая длина воздушного зазора необычно велика для магнитного датчика, что обеспечивает очень большие конструкционные допуски.

Первичные магнитные элементы

По мере движения датчика или магнита направление магнитного поля, регистрируемое GMR-датчиком, изменяется. В зависимости от характера движения, размера зазора и требуемого разрешения в качестве магнитного источника может использоваться постоянный магнит простой стержневой (диполь на **Рис. 5.11**) или роторной формы.

Как правило, магнитные роторы содержат наборы северных и южных полюсов, расположенных по периферии. Одно полное вращение магнитного ротора генерирует полный цикл цифровых сигналов для

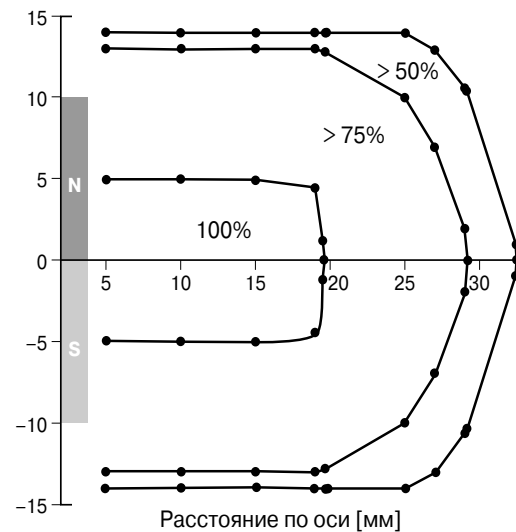


Рис. 5.19. Относительная эффективность GMR вблизи постоянного магнита размерами $20 \times 10 \times 5$ мм на основе самария-кобальта.

каждой пары полюсов. Обращение обеспечивает более высокое разрешение.

Расположение датчика по отношению к магнитному ротору задаёт форму выходного сигнала (**Рис. 5.20**, **Табл. 5.2**). Возможны разнообразные формы сигнала, поскольку волновая форма магнитного поля в пространстве изменяется, а датчик регистрирует только ту компоненту поля, которая вращается в плоскости чипа.

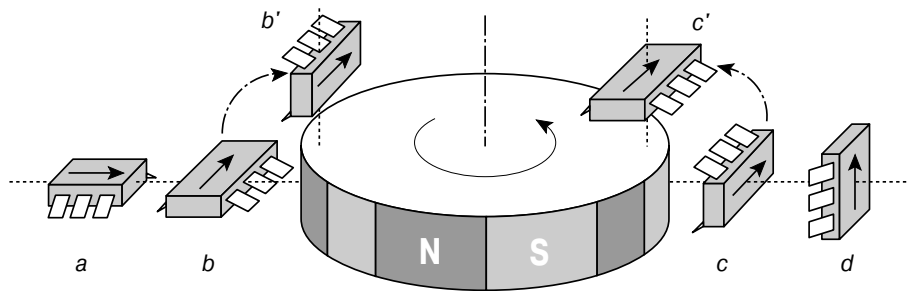


Рис. 5.20. Варианты ориентации и намагничивания (показаны стрелками) датчика в плоскости магнитного ротора (*a...d*) и по одной стороне в пределах окружности магнитного ротора (*b'*, *c'*).

Таблица 5.2. Форма сигнала для различных конфигураций датчика (см. **Рис. 5.20**), намагниченного в направлении стрелки

	Перпендикулярно поверхности	Намагниченность	Примерная форма сигнала
<i>a</i>	Параллельно оси вращения	Радиальная	Синусоидальная
<i>b</i>		Тангенциальная	Треугольная
<i>c</i>	По радиусу	Тангенциальная	Прямоугольная
<i>d</i>		Параллельно оси вращения	—
<i>b'</i>	Перпендикулярно оси вращения	Тангенциальная	Такая же, как для <i>b</i>
<i>c'</i>	Параллельно оси вращения	Тангенциальная	Такая же, как для <i>c</i>

В зависимости от требований форма сигнала может варьироваться от синусоидальной к треугольной и до последовательности пиков. Прямоугольная форма (Табл. 5.2, с) возникает тогда, когда поле вращается перпендикулярно датчику, а не в плоскости датчика, при этом детектируется только компонента, параллельная намагниченности. Вращение датчика вокруг периметра магнитного ротора и вне плоскости датчика ($b \rightarrow b'$, $c \rightarrow c'$) задаёт форму сигнала.

В отдельных случаях магнитные роторы с другими вариантами намагниченности могут обеспечивать особенно эффективную конфигурацию.

Применение

Датчики на основе эффекта GMR, разработанные компанией Infineon, имеют самое широкое применение в области детектирования положения, линейного и вращательного движения. В пределах широкого диапазона напряженности магнитного поля датчик определяет только направление приложенного поля, при этом возможны широкие зазоры и большие допуски регулировки. В зависимости от конкретного применения используются постоянные магниты стержневой либо роторной формы (см. подраздел о первичных магнитных элементах).

Обратите внимание: для того чтобы избежать повреждения жёсткого магнитного слоя, сильные магниты должны располагаться на небольшом расстоянии от GMR-датчиков. Напряжённость магнитного поля в кристалле GMR не должна превышать 15 кА/м.

Датчик абсолютного угла

Сопротивление GMR-датчика изменяется в зависимости от внешнего магнитного поля, что обеспечивает абсолютное измерение угла. Угловой диапазон детектирования и разрешение зависят от первичного магнитного элемента (число пар полюсов), от типа GMR-датчика (скрещённая полумостовая или мостовая конфигурация), а также от специфики обработки сигнала. Датчик типа GMR C6 со скрещёнными полумостами однозначно детектирует вращение простого стержневого магнита в пределах 360° (Рис. 5.21).

Сигналы двух полумостов (Рис. 5.17) смещены по фазе на 90° и могут быть дешифрованы из простого сравнения 4 квадрантов (Рис. 5.22).

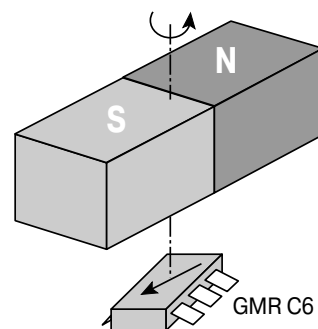


Рис. 5.21. Вращение первичного магнитного элемента над GMR-датчиком.

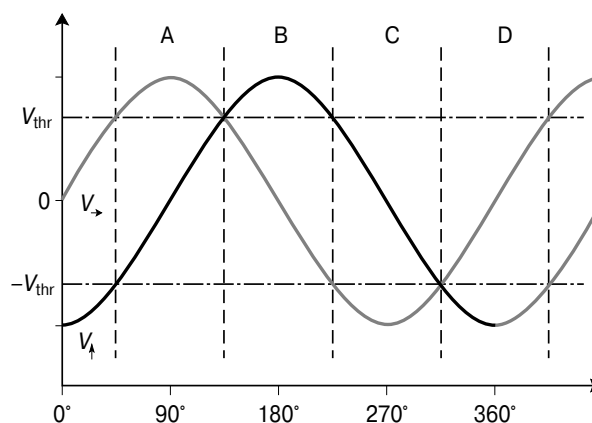


Рис. 5.22. Сигнал в 4 квадрантах от скрещённых полумостов (GMR C6).

В пределах квадранта сигнал с большей крутизной (V_+ — в А и С, V_- — в В и D) позволяет определить угол путём линейной интерполяции или лучше из табличных данных (Табл. 5.3).

Таблица 5.3. Обработка сигнала для скрещённых полумостов GMR C6

Квадрант	Условие	Угол (линейная аппроксимация)
A	$V_{\rightarrow} > V_{thr}$	$90^\circ + V_{\uparrow} \cdot (45^\circ / V_{thr})$
B	$V_{\uparrow} > V_{thr}$	$180^\circ - V_{\rightarrow} \cdot (45^\circ / V_{thr})$
C	$V_{\rightarrow} > V_{thr}$	$270^\circ - V_{\uparrow} \cdot (45^\circ / V_{thr})$
D	$V_{\uparrow} > V_{thr}$	$360^\circ + V_{\rightarrow} \cdot (45^\circ / V_{thr})$

При напряжении источника питания $V_{IN} = 5$ В и эффективности GMR $\Delta R/R_0 > 4\%$ флуктуация уровня неусиленного сигнала достигает по крайней мере 200 мВ. Точка пересечения двух измерительных кривых определяет пороговое значение

$$V_{thr} = \frac{200 \text{ мВ}}{\sqrt{2}}.$$

Угловое разрешение в 2° соответствует 180 точкам в пределах всей окружности или 45 точкам на квадрант, для чего требуется разрешение электрического сигнала

$$\frac{200 \text{ мВ}}{45\sqrt{2}} = 3 \text{ мВ}.$$

Разрешение в 1.5% ограничивается температурным коэффициентом эффекта GMR, который составляет около 0.1%/K. При температурных флуктуациях более 7°C для достижения требуемого разрешения необходимо использование схем компенсации.

Варианты

Использование магнитного ротора с N парами полюсов увеличивает разрешение в N раз и ограничивает угловой диапазон до $360^\circ/N$.

Мостовой датчик типа GMR B6 может однозначно распознавать сигналы только в диапазоне 180° , но выдаёт сигнал вдвое большей амплитуды.

Типичные применения

К типичным применениям относятся педаль газа, рулевое управление, регулятор положения сидения, потенциометр.

5.3. Датчики давления

5.3.1. Микромеханика поверхности, датчики давления с цифровым выходом (KP 100)

С учётом возрастающей потребности в интеллектуальной электронике, увеличивается необходимость применения всё более сложных датчиков не только в промышленности, но и в домашнем хозяйстве и автомобильной электронике. В этих областях кремниевые датчики давления стали доминировать в устройствах измерения давления благодаря своим малым размерам и замечательным свойствам кремния как материала. Современные датчики имеют значительный потенциал развития с возможностью интеграции в одном кристалле собственно элементов датчика и электронных схем обработки сигналов (компенсация температуры, аналого-цифровое преобразование и т.д.).

Решающим шагом в этом направлении явилось овладение технологией микромеханики поверхности. В рамках данной техно-

логии полный набор элементов датчика формируется в поверхностной области пластин кремния, что позволяет проводить технологический маршрут с использованием стандартной технологической БиКМОП-линейки. Благодаря этому можно формировать в одном кристалле не только ячейки датчика, но и схемы обработки сигнала и оцифровки. С точки зрения применения это приводит к сокращению числа требуемых компонентов, что положительно отражается на сложности схем и их надёжности.

Датчик давления типа KP 100 (Рис. 5.23) был первым видом такой продукции, серийно освоенной в 1998 году. Этот датчик давления используется в спутниковых системах, в боковых подушках безопасности, а также в дверях автомобилей. Благодаря тому, что выходной сигнал является цифровым, микропроцессор может обмениваться данными непосредственно с датчиком. В случае аварии датчик детектирует волну давления на двери и запускает рутинную процедуру. При использовании определённого алгоритма анализа микропроцессор гарантирует предотвращение некорректного срабатывания подушек безопасности, например, в случае слишком резкого закрывания двери или удара по ней. Решение о надуве подушек безопасности может быть принято значительно быстрее по сигналу давления, чем по сигналу ускорения. Это является критическим преимуществом с точки зрения ограниченных боковых зон сжатия при боковом ударе.

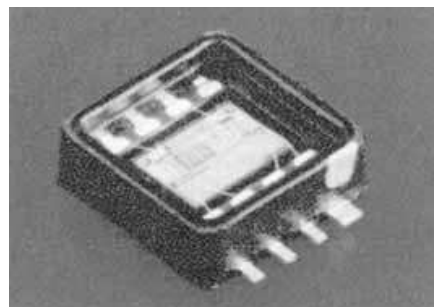


Рис. 5.23. Внешний вид датчика давления типа KP 100 в SMD-корпусе P-DSOF-8.

Работа датчика KP 100 основана на ёмкостном принципе, когда изменение давления окружающей среды приводит к изменению ёмкости кристалла. Для такого преобразования физической величины, над герметично закрытой полостью формируется

чувствительная к давлению мембрана. Эта мембрана образует верхнюю обкладку конденсатора, в то время как нижний электрод формируется на подложке.

Изготовление такой мембраны (см. **Рис. 5.24**) размерами 70×70 мкм и толщиной около 400 мкм является фундаментальной особенностью этого датчика, поскольку, в отличие от традиционных кремниевых датчиков давления, в данном случае используется стандартная 6-дюймовая БиКМОП технологическая линейка. Для реализации поставленной цели полевой окисел формируется над нижним электродом конденсатора (подложка), который на следующем этапе покрывается слоем легированного поликремния, после чего он сначала перфорируется с использованием сухого травления. Через эти поры лежащий ниже окисел (жертвенный слой) вытравливается с использованием травления в плавиковой кислоте. Это приводит к формированию свободно висящей кремниевой мембраны. Окисный купол в центре мембраны усиливает жёсткость мембраны. Благодаря этому лежащая ниже полость герметизируется при требуемом давлении (**Рис. 5.25**). Чувствительность датчика в значительной степени определяется геометрическими параметрами (площадью и толщиной структуры). Поскольку все технологические операции хорошо контролируются, датчики могут быть изготовлены с высокой воспроизводимостью.

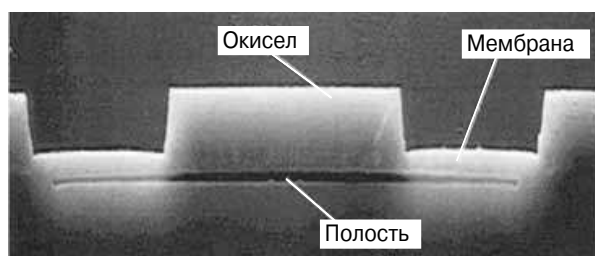


Рис. 5.24. Изображение поперечного сечения ячейки датчика в сканирующем электронном микроскопе.

При возникновении импульса давления мембрана смещается, что приводит к изменению ёмкости. Для увеличения уровня сигнала формируется матрица из 4 панелей, в каждой из которой 14 мембран соединены параллельно; две из этих панелей предназначены для детектирования давления, а две других используются как опорные. Выходной сигнал формируется как разность

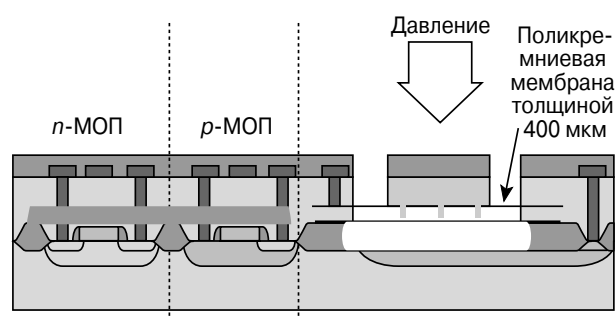


Рис. 5.25. Схематическое представление структуры ячейки датчика, соответствующей приведённому на **Рис. 5.24** поперечному сечению.

сигналов, чувствительных к давлению, и сигналов опорных панелей.

Полученный сигнал претерпевает аналого-цифровое преобразование в самом чипе благодаря интеграции АЦП. Это гарантирует как очень хорошее отношение сигнал/шум, так и высокую точность. На модуль поступает внешний тактовый сигнал с возможностью выбора тактовой частоты 4 МГц или 8 МГц. С помощью сигма-дельта-модулятора аналоговый ёмкостной сигнал сначала преобразуется в поток цифровых данных. Фильтр децимации придаёт потоку вид последовательности 16-битных слов. Высокочастотный шум устраняется из сигнала давления с помощью фильтра с верхней граничной частотой 360 Гц. Затем данные записываются в последовательный сдвиговый регистр (SPI — последовательный периферийный интерфейс) со скоростью 7.8 кГц, откуда в конце концов он может быть считан с помощью микропроцессора со скоростью 500 кГц. Последующий сдвиговый регистр может быть использован микропроцессором для определения режима функционирования (штатный или диагностический).

Датчик рассчитан на диапазон давлений 60...130 кПа, значения определяются с точностью в 12 бит.

Датчик работает в диапазоне температур $-40...+90^{\circ}\text{C}$ при номинальном рабочем напряжении 5 В и максимальном токе от источника питания 2.5 мА.

Для того чтобы соответствовать жёстким требованиям автомобильной электроники, в датчике используются три различных диагностических режима. Это позволяет осуществлять различные варианты автотестирования датчика и непрерывно проверять его работоспособность. Диагностические

режимы позволяют проверять мембранные матрицы, полное прохождение сигнала или только цифровую секцию.

При проверке секции полного сигнала вместо считывания сигнала детекторной ёмкости по сигнальному каналу считывается сигнал с фиксированной ёмкости, интегрированной в кристалле. Поскольку эта ёмкость не зависит от давления при адекватной работе электроники, устройство выдаст на выход определённый цифровой сигнал.

При проверке цифровой секции генерируются определённые цифровые коды, которые проходят цифровой фильтр децимации. Появляющиеся на выходе 16-битные слова должны быть идентичны словам, предписанным в спецификации.

При проверке мембранных матриц устанавливается определённая величина разбаланса сигналов между мембранами датчика и опорными мембранами, специфичная для каждого датчика. Этот разбаланс может быть считан и сохранён. Любое изменение разбаланса свидетельствует о возможном механическом повреждении мембраны.

Используя указанные диагностические режимы, можно контролировать правильное функционирование датчика во время работы, например в случае модуля боковых подушек безопасности, когда ключ зажигания уже повернут. Кроме того, путём контроля бита чётности может быть проверено прохождение данных.

Для того чтобы сборка датчика была максимально экономичной, был разработан специальный SMD-корпус. Этот пластмассовый корпус типа P-DSOF8-1 имеет 8 выводов и открыт с верхней стороны. После посадки чипа и его проволоочной разводки он покрывается силикагелем. Внешнее давление передаётся на поверхность датчика через этот гель. Кроме того, покрытие защищает кристалл от влияния внешней среды.

Этот корпус предназначен для автоматической установки на печатные платы, что является его принципиальным (с точки зрения стоимости) преимуществом по сравнению с традиционными корпусами.

5.3.2. Датчик давления с аналоговым выходом (КР 120)

В настоящее время в большинстве применений используются датчики с аналоговым выходом, например, когда на выходе

датчика вырабатывается сигнал, пропорциональный давлению. К их числу относится и датчик типа КР 120, используемый, в частности, в системах управления двигателем. В рассматриваемом случае детектируется как давление окружающей среды (Barometric Air Pressure — BAP), так и внутреннее давление (Manifold Air Pressure — MAP). Для расчёта оптимального количества горючего во время передвижения необходимо точно знать отношение этих двух параметров.

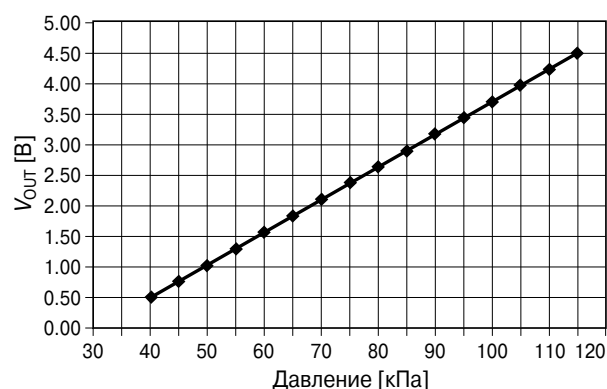


Рис. 5.26. Выходная характеристика датчика типа КР 100.

Такое использование датчика требует прецизионной калибровки выходного сигнала, который пропорционален доминирующему давлению (Рис. 5.26). Сдвиг, чувствительность и линейность ячеек датчика варьируются вследствие производственных разбросов, в связи с чем необходимо калибровать каждый датчик (в качестве иллюстрации см. Рис. 5.27).

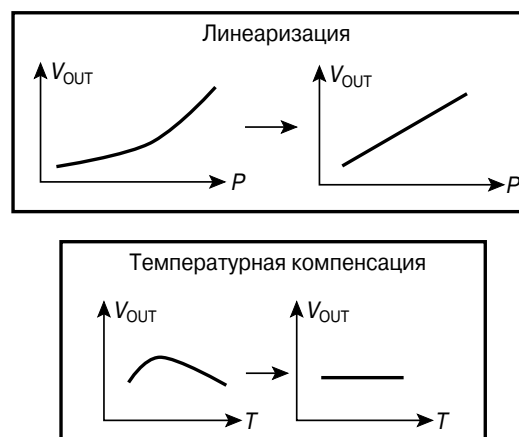


Рис. 5.27. Линеаризация и температурная компенсация.

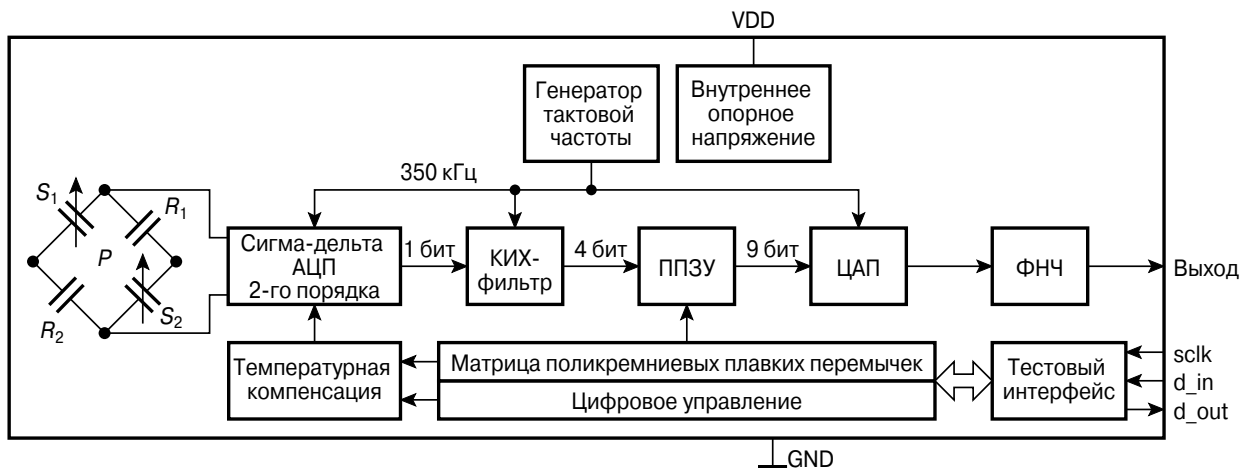


Рис. 5.28. Тракт сигнала датчика давления с аналоговым выходом.

С целью такой калибровки производитель проводит измерения при различных давлениях и температурах. На основе проведённых измерений определяются параметры каждого датчика, которые затем сам прибор использует в процессе функционирования для «расчёта» выходного напряжения, связанного с измеренным давлением.

Это осуществляется либо подсоединением ёмкостей к схеме (например, для компенсации сдвига или температурной зависимости) или в случае линеаризации характеристики за счёт обращения к табличным данным. Параметры, необходимые для данной процедуры, определённые в результате калибровки, записываются в чип через цифровой интерфейс и хранятся в ППЗУ датчика. После того как данные были записаны в ППЗУ, тестовые параметры для анализа датчика также могут быть введены через этот интерфейс.

Архитектура чипа КР 120 аналогична архитектуре датчика КР 100, предназначенного для контроля боковой подушки безопасности (Рис. 5.28). И вновь ячейки датчика, работающие на ёмкостном принципе (ёмкость C_S), соединяются по мостовой схеме вместе с опорными ёмкостями, нечувствительными к давлению (C_R). При приложении напряжения V_{ref} возникает заряд $(C_S - C_R) \cdot V_{ref}$ на входе сигма-дельта-преобразователя.

Для компенсации сдвига и температурных зависимостей сдвига и чувствительности, в нижнюю часть схемы вводятся конденсаторы (на рисунке не показаны). Изменения заряда (как суммы зарядов, приходящих вместе к узлу схемы), преобразуются в

4-битные цифровые сигналы с помощью сигма-дельта-модулятора и последующего фильтра децимации. Этот сигнал корректируется по сдвигу и является уже температурно компенсированным. С помощью параметров из таблицы линеаризации, хранящихся в ППЗУ, генерируется программируемая характеристика, и, наконец, поток данных преобразуется в аналоговый сигнал.

Конструктивно ППЗУ датчика состоит из так называемых полостных плавких перемычек (Рис. 5.29). Они представляют собой

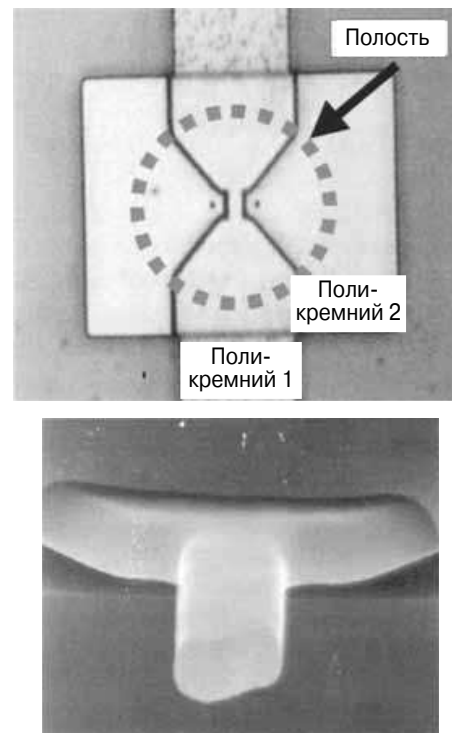


Рис. 5.29. Фотография полостного предохранителя.

поликремниевые проводящие дорожки, проходящие через закрытые полости. Эти полостные плавкие перемычки содержат суженную область и в значительной степени термоизолированы в полости. Короткого токового импульса (как правило, 50 мА, 10 мс) достаточно для плавления предохранителя и, таким образом, для изменения битового состояния. В отличие от обычной лазерной подгонки такая малая мощность позволяет программировать датчики прямо через выводы даже после того, как они были собраны в корпусе. В свою очередь, это обеспечивает увеличение точности прибора, поскольку сборка обычно приводит к малым, но ощутимым изменениям рабочей характеристики. Другим дополнительным преимуществом данного типа ЗУ по сравнению со стандартными СППЗУ является высокая надёжность и теплостойкость.

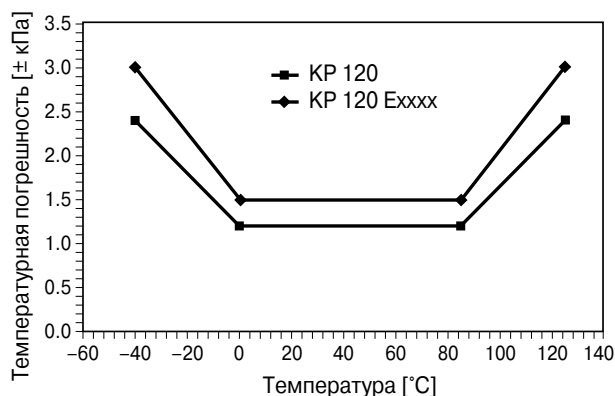


Рис. 5.30. Кривая температурной погрешности KP 120.

Серия датчиков KP 120 обладает особенно высокой точностью (Рис. 5.30). Их ха-

рактеристическая кривая может быть запрограммирована на диапазон 40...115 кПа (0.4...1.15 бар). Они монтируются в тот же самый корпус, что и KP 110, и могут работать при температуре вплоть до +125°C.

5.3.3. Пьезорезистивный датчик давления в SMD-корпусе (KP 200)

В дешёвом SMD-корпусе предлагаются также пьезорезистивные датчики давления, хорошо показавшие себя в наиболее требовательных промышленных применениях.

В отличие от ёмкостных датчиков, пьезорезистивные датчики давления выдают большой первичный сигнал. Пьезорезистивный эффект (изменение электрического сопротивления вследствие механического напряжения) сильно проявляется в кремнии. В связи с этим он используется в большинстве современных полупроводниковых датчиков давления. Физические свойства монокристаллического кремния дают существенное преимущество, поскольку этот материал не обладает усталостью вплоть до точки раскалывания. Благодаря своей точности и долговременной стабильности датчики давления данного типа (серия KPY компании Infineon) используются, в основном, в промышленной метрологии.

В отличие от поверхностной микромеханики, в случае объёмной микромеханики пластина Si протравливается с тыльной стороны (Рис. 5.31). В результате формируются мембраны монокристаллического кремния. В зависимости от диапазона давлений, чувствительности и сопротивления раскалыванию оптимизируется выбор толщины и диаметра мембраны. В типичном случае мемб-

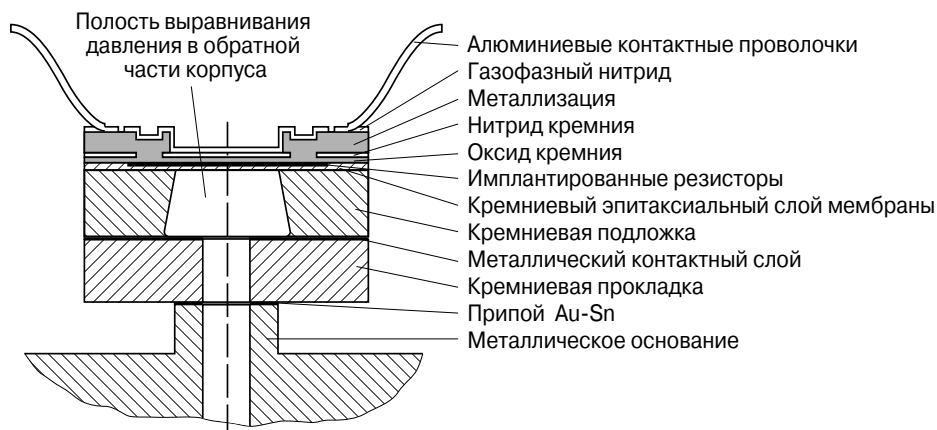


Рис. 5.31. Конструкция пьезорезистивного датчика давления.

раны имеют толщину 20 мкм при диаметре 1.5 мм. Под давлением мембрана слегка изгибается. Пьезорезисторы, встроенные в мембрану, чувствуют механическое напряжение, что приводит к изменению сопротивления. Резисторы формируют с помощью стандартной биполярной технологии, при этом для защиты от влияния окружающей среды (например, электрических зарядов) на них наносятся пассивирующие слои. Мост Уитстона из четырёх пьезорезисторов выдаёт линейный выходной сигнал. При номинальном давлении и напряжении источника питания 5 В типичный выходной сигнал имеет амплитуду 100...200 мВ.

Во избежание нежелательного влияния корпуса детекторный чип монтируется на чипе подложки с герметичным уплотнением по технологии сцепления подложек с использованием Au/Si. Это позволяет поддерживать погрешности, возникающие за счёт изменения температуры и из-за гистерезиса, на низком уровне. Для изготовления датчиков относительного давления в подложке чипа вытравливается окно таким образом, чтобы можно было детектировать разность давлений с нижней и верхней сторон мембраны. В датчиках абсолютного давления давление окружающей среды измеряется по сравнению с внутренним опорным вакуумом.

Новая особенность датчика КР 200 — его сборка в корпусе типа P-DSOF-8. Оптимизированная сборка с использованием специальных силиконовых клеев является экономичной и предохраняет от потери качества. Для защиты от механической нагрузки на выводные проволоки датчик покрывается гелем. Кроме того, температурно чувствительный резистор, интегрированный в корпус, обеспечивает очень простую температурную компенсацию с погрешностью в несколько процентов. С этой целью датчик включается в схему с двумя резисторами. Если сопротивление резисторов имеет фиксированную величину (как это требуется для автоматизированной сборки), то можно добиться погрешности около 2% в диапазоне температур $-20...+60^{\circ}\text{C}$. Величина сопротивления компенсирующих резисторов может быть подобрана в соответствии с индивидуальными температурными характеристиками датчика, что дополнительно улучшает его температурную компенсацию.

Датчик КР 200 является наиболее дешёвым вариантом прецизионных датчиков давления с большой долговременной стабильностью и предназначен для массового производства и экономических применений. Целевой рынок таких приборов включает в себя товары бытовой техники, например пылесосы (контроль тяги) и стиральные машины (контроль уровня воды).

5.4. Датчики температуры

Как альтернатива металлическим резисторам из никеля и платины широко используются и кремниевые датчики температуры. Они более дешёвы, обеспечивают более высокую чувствительность, а по допускам и воспроизводимости характеристик близко подходят к металлическим датчикам температуры.

Чип так называемого термистора очень прост и, по сути, состоит из кристалла, облучённого нейтронами кремния, с двумя контактами. Базовый материал получают облучением в реакторе нейтронами, что приводит к трансформации части атомов кремния в атомы фосфора. Этот процесс задаёт определённый уровень легирования донорной примесью фосфора. Сопротивление облучённого нейтронами кремния обеспечивает хорошо воспроизводимую температурную характеристику, что используется в базовой серии датчиков типа КТУ. Кремниевый датчик обладает следующими характеристиками:

- диапазон температур от -50 до $+150^{\circ}\text{C}$;
- сопротивление при $+25^{\circ}\text{C}$ — $2\text{ кОм} \pm 2\%$;
- долговременная стабильность $\pm 0.2\%$;
- отношение сопротивлений $R_{(105^{\circ}\text{C})}/R_{(25^{\circ}\text{C})} = 1.67 \pm 1.2\%$.

В пределах группы с допуском сопротивления $\pm 2\%$ с помощью измерений могут быть выделены и поставлены подгруппы приборов с допуском $\pm 0.5\%$, что обеспечивает погрешность измерений в 1°C без необходимости проведения дополнительных проверок компонентов.

Зависимость величины сопротивления от направления протекания тока, часто вызывающая проблемы с полупроводниковыми датчиками температуры, с помощью технологических мер была сведена к допуску менее 2 Ом.

Таким образом, если необходимо измерять температуру в широком диапазоне с

точностью в несколько десятых долей градуса, то серия кремниевых датчиков типа КТУ является экономичным решением. Элементы датчиков изготавливают в различных типах корпусов (от КТУ10 до КТУ16), и они делятся на группы в зависимости от величины сопротивления (от КТУ10-3 до КТУ10-9). Из-за производственного разброса значение номинального сопротивления может изменяться примерно на ± 30 Ом при среднем значении 2000 Ом. Могут быть осуществлены поставки датчиков с номиналом допусков 0,5, 1, 2, 5 и 10% при температуре $+25^\circ\text{C}$.

На **Рис. 5.32** показана типичная температурная характеристика датчика КТУ10-6.

Примеры применений датчиков температуры будут приведены в главе 9.

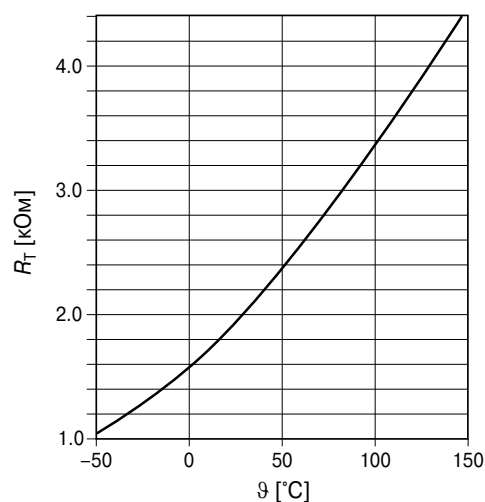


Рис. 5.32. Типичная характеристика датчика КТУ10-6.

6. ПАМЯТЬ

Устройства памяти (запоминающие устройства, устройства хранения данных) предназначены для того, чтобы хранить данные в течение более или менее длительного периода времени. Впечатляющие технологические достижения, позволившие, в первую очередь, значительно сократить затраты на производство запоминающих устройств и снизить розничную цену на них, обеспечили условия для их триумфального шествия на рынке электроники. Сегодня они, так или иначе, применяются практически во всех сферах повседневной жизни.

Существует четыре основные области, в которых используются различные типы запоминающих устройств:

- процессоры (в некоторых случаях — с внутренней кэш-памятью);
- внешняя кэш-память (SRAM, обычно её объём составляет несколько Кбайт);
- основная память (DRAM, обычно её объём измеряется в мегабайтах);
- жёсткий диск (обычно его информационная ёмкость измеряется в гигабайтах).

6.1. Типы запоминающих устройств

Классификация устройств хранения данных определяется их назначением либо основана на принципе действия и технологии производства этих устройств (см. **Рис. 6.1**).

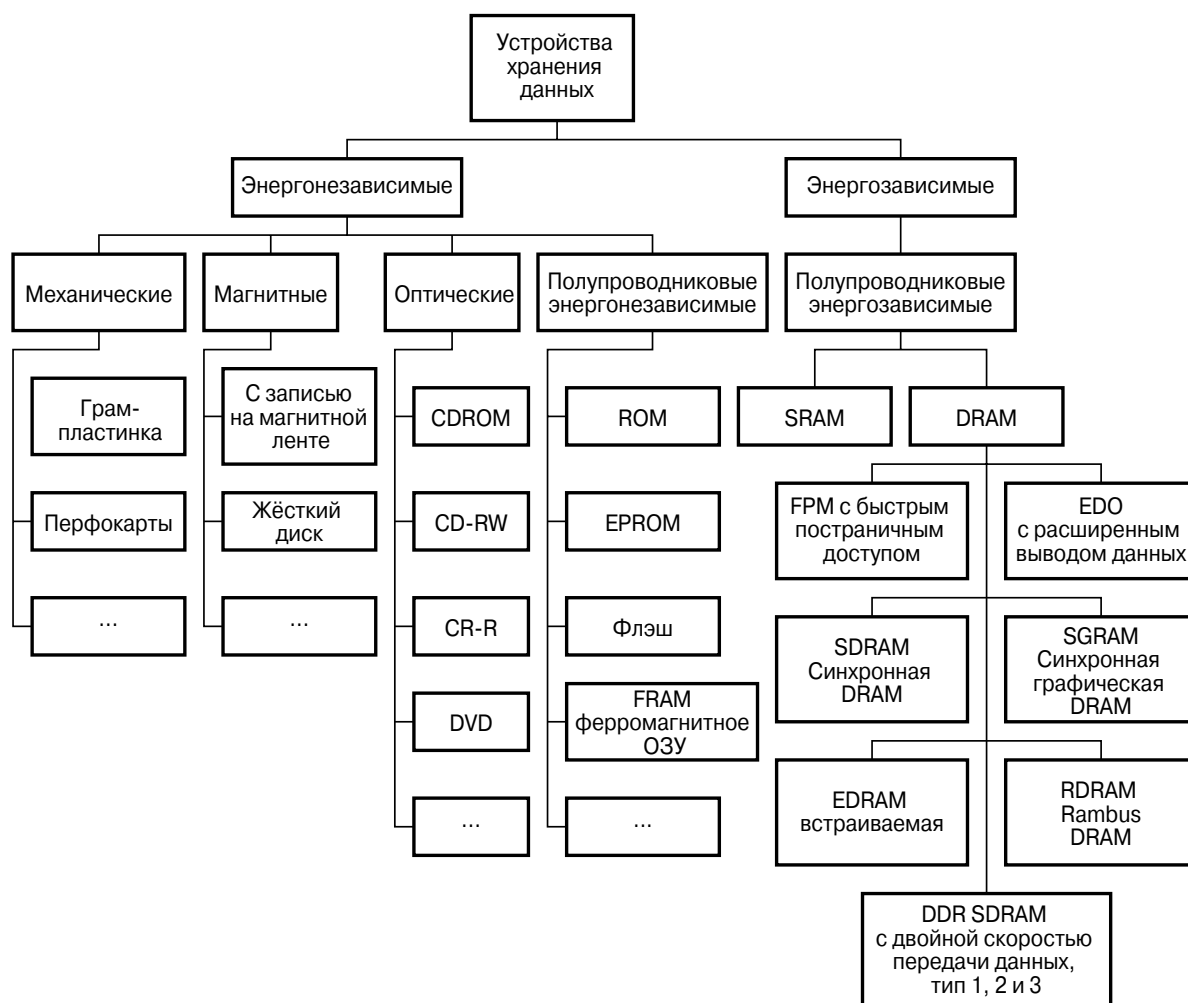


Рис. 6.1. Общая классификация устройств хранения данных.

Прежде всего, запоминающие устройства делятся на энергозависимые и энергонезависимые: первые не сохраняют записанную в них информацию при отключении питания, тогда как вторые способны хранить данные и при отсутствии питания.

6.1.1. Механическая память

Первые запоминающие устройства были механическими и использовались в основном для сохранения информации о конфигурации оборудования или для управления последовательностью тех или иных операций. Примером механического аналогового устройства хранения данных является грампластинка. Подобные устройства уже давным-давно не используются в цифровых технологиях, уступив своё место устройствам памяти, работа которых базируется на совершенно иных принципах.

6.1.2. Магнитные устройства хранения данных

Это энергонезависимые устройства, предназначенные для длительного хранения данных. Обычно такое устройство состоит из приводного механизма (привода) и движущегося магнитного носителя, который может либо постоянно находиться в контакте с приводом (как, например, в жёстком диске), либо быть сменным (дискеты, магнитные ленты и т.п.). Для чтения/записи данных используется специальная магнитная головка. В дисковом устройстве памяти эта головка подвижна, за счёт чего обеспечивается относительно малое время доступа к любой области носителя и, соответственно, к любой области массива данных. В системах с ленточным носителем магнитная лента движется вдоль неподвижной головки, поэтому время доступа к массиву данных очень велико. Основными недостатками устройств хранения данных, использующих магнитный носитель, являются слишком малая, по сравнению со скоростью работы процессора, скорость доступа к данным и наличие в них движущихся механических частей, что повышает риск возникновения неисправностей. К важнейшим их достоинствам следует отнести дешёвизну и энергонезависимость.

6.1.3. Оптические устройства хранения данных

Данная энергонезависимая технология используется исключительно для долговременного хранения информации. Как правило, такое устройство представляет собой диск, поверхность которого сканируется лазерным лучом. Диски могут быть многократно перезаписываемыми (CD-RW), с возможностью однократной записи (CD-R) или же содержать информацию, которая записывается на них ещё на этапе производства (CD-ROM). В настоящее время повсеместное распространение получили DVD (Digital Versatile Disk — цифровой универсальный диск), вследствие чего устройства хранения данных на магнитной ленте (стримеры) практически перестали использоваться для хранения гигабайтных объёмов данных. Существуют также гибридные магнитно-оптические устройства хранения данных. Как недостатки, так и достоинства «гибридов» в основном те же, что и у магнитных устройств хранения данных.

6.1.4. Полупроводниковые устройства хранения данных (микросхемы памяти)

Это название объединяет как различные устройства, предназначенные для долговременного хранения информации (постоянные запоминающие устройства, или ПЗУ), так и различные виды программируемой/перезаписываемой полупроводниковой памяти. Последняя бывает как энергонезависимой, так и энергозависимой, и производится в различных вариантах (DRAM, SRAM, EPROM, флэш-память и т.д.). Расшифровка соответствующих аббревиатур приведена в Глоссарии (см. главу 16). Основными достоинствами полупроводниковой памяти являются малое, а для некоторых типов памяти и предельно малое время доступа к данным, миниатюрность микросхем памяти и небольшое энергопотребление. Немаловажным достоинством является и высокая устойчивость к воздействию внешних факторов: полупроводниковые микросхемы памяти практически не подвержены износу, поскольку не содержат движущихся частей, и могут выдерживать значительные ускорения и вибрации без потери работоспособности. Основным недостатком подобных устройств является от-

носительно высокая удельная стоимость сохраняемой информации.

Далее в этой главе мы подробно обсудим различные аспекты технологии DRAM.

6.2. Принцип работы и область применения DRAM

В компьютерной схемотехнике одними из наиболее часто используемых запоминающих устройств являются микросхемы, изготовленные по технологии DRAM. Причина заключается в относительно низкой, по сравнению с полупроводниковой памятью других типов, удельной стоимости хранения бита данных, миниатюрности корпуса и высокой скорости доступа к ячейкам памяти.

Единственным их конкурентом с точки зрения удельной стоимости хранения данных и объёма сохраняемой информации являются жёсткие диски. Однако жёсткие диски содержат механические движущиеся части, поэтому они значительно уступают микросхемам памяти DRAM по скорости доступа к данным. По этой причине жёсткие диски в основном применяются в качестве устройств долговременного хранения программ и данных.

Микросхемы статической памяти (SRAM) обеспечивают более высокое быстродействие, чем DRAM. Однако производство устройств SRAM требует больших затрат, что увеличивает удельную стоимость хранения бита данных; кроме того, информационная ёмкость микросхем SRAM оказывается ниже, поэтому для получения того же объёма памяти, что и у микросхем DRAM, приходится использовать корпуса больших размеров. По информационной ёмкости устройства SRAM всегда отстают от DRAM, как минимум, на одно поколение. Поэтому по объёму доступной памяти современные микросхемы DRAM значительно превосходят наиболее быстродействующие микросхемы SRAM. Однако память SRAM по-прежнему широко используется, в первую очередь, в качестве кэш-памяти (быстродействующего буфера) между процессором и основной памятью DRAM.

6.2.1. Чем SRAM отличается от DRAM?

Как DRAM, так и SRAM представляют собой оперативные запоминающие уст-

ройства с произвольным доступом (Random Access Memory — RAM). Это означает, что обращение может осуществляться к любой, выбранной произвольным образом, ячейке памяти. Альтернативный подход реализован в устройствах так называемой последовательной памяти, в которой обращение к ячейке с адресом n может производиться лишь после обращения к предшествующим ей ($n - 1$) ячейкам.

SRAM — это статическая память. То есть, данные в ячейке памяти хранятся до тех пор, пока они не будут заменены новыми или не будет отключено питание. Если речь идёт только о хранении данных, то в этом режиме ток, потребляемый микросхемой памяти, чрезвычайно мал, поскольку чтобы поддерживать изготовленную по КМОП-технологии триггерную схему в том или ином устойчивом состоянии, практически не требуется энергии. Ток потребления увеличивается лишь при обращении к какой-либо ячейке памяти. Процедура обмена данными с такой микросхемой предельно проста. Если нужно получить доступ к некоторой ячейке памяти, то выборка требуемых адресов строки и столбца производится одновременно.

DRAM — это динамическая память. Термин «динамическая» характеризует способ хранения данных в ячейке такой памяти. В то время как ячейка статической памяти SRAM построена на основе триггера, который (при наличии напряжения питания) может сохранять своё состояние сколь угодно долго, в DRAM для хранения данных используется конденсатор, который характеризуется определённой величиной утечки заряда. Период времени, в течение которого ячейка DRAM может хранить данные, обычно не превышает одной секунды. Для того чтобы не потерять данные, их следует периодически восстанавливать (регенерировать). Однако несмотря на наличие сложного механизма регенерации данных, геометрические размеры микросхемы DRAM меньше, чем размеры микросхемы SRAM, поскольку матрица DRAM состоит из очень маленьких однотранзисторных ячеек памяти. Таким образом, габариты микросхем DRAM и их стоимость оказываются ниже, а область применения — шире, чем у микросхем SRAM.

Впрочем, главную роль в снижении габаритов корпуса микросхем DRAM играет не

гораздо меньший, по сравнению с SRAM, геометрический размер ячеек памяти, а использование при их адресации мультиплексированной адресной шины. Обращение к ячейке памяти в микросхемах DRAM осуществляется в два этапа: сначала выбирается строка матрицы ячеек, а затем столбец. Адрес строки и адрес столбца поступают на адресную шину микросхемы последовательно по времени (т.е. осуществляется их временное мультиплексирование). Поэтому при одинаковом объёме памяти микросхемы DRAM используют в два раза меньше адресных линий, чем микросхемы SRAM (в которых, как мы помним, выбор адреса строки и адреса столбца производится одновременно).

Структура ячеек DRAM отличается простотой, что позволяет размещать на кристалле большое количество таких ячеек. Благодаря этому микросхемы данного типа очень удобно использовать при проверке и внедрении новых полупроводниковых технологий. Определяя в ходе тестирования общее количество работоспособных ячеек памяти на кристалле, можно вполне адекватно оценивать качественные показатели производственного процесса. Впрочем, характеристики КМОП-транзисторов, требуемые для устройств DRAM и для логических схем, сильно различаются. Поэтому в настоящее время технология DRAM уже не рассматривается в качестве передовой технологии, на основе которой может быть реализовано производство КМОП-микросхем других типов.

6.2.2. Виды памяти DRAM

Классификация микросхем DRAM осуществляется на основе нескольких различных критериев.

Объём памяти

В зависимости от существующих на данный момент технологий производства микросхем DRAM классифицируются по объёму памяти, доступной для хранения данных, например 256 Мбит, 512 Мбит, 1 Гбит.

Организация ввода/вывода данных

Ввод/вывод данных может быть организован как $\times 1$, $\times 4$, $\times 8$, $\times 9$, $\times 16$, $\times 18$ или $\times 32$. При этом для памяти объёмом 512 Мбит с организацией $\times 4$ (читается: на 4) четверть

из 536 870 912 ячеек памяти подключены к одному из четырёх входов/выходов ($128\text{М} \times 4$). Для памяти с организацией $\times 16$ ($32\text{М} \times 16$) шестнадцать блоков памяти объёмом по 32 Мбит получают данные по 16 линиям ввода/вывода.

Время доступа

Данный параметр представляет собой интервал времени с момента активации микросхемы для обращения к произвольной ячейке памяти до момента появления данных на соответствующем выходе микросхемы (иногда его называют также временем обращения к памяти). С появлением каждого нового поколения микросхем памяти, благодаря уменьшению размеров кристалла становится возможным обеспечивать всё меньшие значения времени доступа. Некогда для микросхем с объёмом памяти 256 Кбайт время доступа составляло 120 нс, для поколения микросхем с объёмом памяти 16 Мбайт оно уменьшилось до 60 нс, а микросхемы с объёмом памяти 256 Мбайт обеспечивают время доступа менее 30 нс. За счёт тех или иных усовершенствований в технологии производства и схемотехнике некоторые отдельные представители каждого из поколений микросхем памяти демонстрировали скорость доступа, значительно превышавшую типовые показатели. Тем не менее, вследствие нестабильности технологических параметров, всегда существует разброс времени доступа микросхем, по которому они подразделяются на быстрые, стандартные и медленные.

Напряжение питания и диапазон допустимых напряжений ввода/вывода

В последние несколько лет, с внедрением новых технологий производства полупроводниковых структур, удалось добиться поистине беспрецедентного уменьшения их размеров. В связи с этим при разработке микросхем памяти существует тенденция к постоянному снижению напряжения питания. На смену стандарту TTL (+5 В) пришёл низковольтный (+3.3 В) стандарт LVTTTL, а затем появились сверхнизковольтные (+2.5 В и +1.8 В) стандарты SSTTL. Благодаря использованию пониженного напряжения питания и применению новых требований к организации интерфейсов, удалось значительно сократить потери энергии в процессе ввода/вывода данных.

Интерфейсы DRAM

В течение многих лет стандартным был асинхронный доступ к памяти. Его развитием явились режим быстрого постраничного доступа (FPM) и режим расширенного (во времени) вывода данных (EDO). С середины 1990-х годов началось активное использование синхронных интерфейсов. В настоящее время SDRAM (синхронная DRAM) используется очень широко. С появлением микросхем DDR SDRAM с удвоенной скоростью передачи данных (т.е. обеспечивающих в два раза больший объём передаваемых данных при сохранении той же тактовой частоты) микросхемы SDRAM первых поколений стали соответственно именоваться SDR DRAM (Single Data Rate — с обычной скоростью передачи). Согласно стандарту JEDEC микросхемы DDR DRAM подразделяются на три различных поколения: DDR1, DDR2 и DDR3. Минимальная скорость передачи данных для каждого из указанных поколений по сравнению с предшествующим удваивалась (200, 400 и 800 Мбит/с на один вывод). Наряду с этим было выпущено несколько поколений микросхем с интерфейсом Rambus; впрочем, объём их производства был невелик, поэтому их появление не оказало сколько-нибудь значительного влияния на развитие рынка запоминающих устройств.

Специализированные микросхемы DRAM

Кроме перечисленных выше стандартных микросхем DRAM, производились также специализированные микросхемы, представлявшие собой микросхемы с типовым объёмом памяти, но имевшие дополнительные функциональные возможности. В качестве примера можно упомянуть микросхемы графической DRAM, оптимизированные с точки зрения скорости обмена данными в устройствах обработки графической информации (видеоконтроллерах), и запоминающие устройства с пониженным энергопотреблением, предназначенные для использования в мобильной аппаратуре.

6.2.3. Спецификация

Для того чтобы потребитель мог убедиться, что приобретённый им компонент является именно тем, который ему требуется, характеристики продукции, гарантирован-

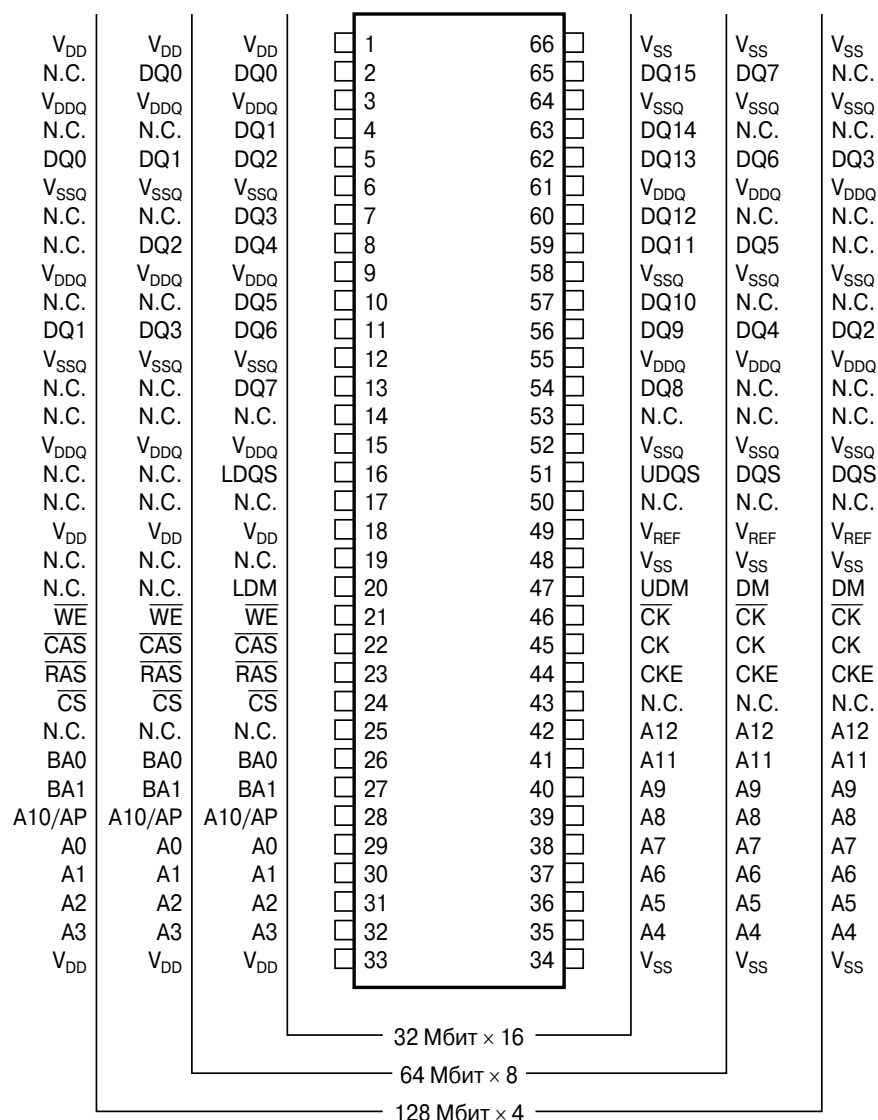
ные производителем, публикуются в виде специального документа — так называемой спецификации (data sheet) электронного компонента.

Этот документ является хорошим подспорьем при разработке схем, в которых данный компонент будет корректно функционировать при условиях, указанных в спецификации; в то же время можно быть уверенным в том, что характеристики компонента соответствуют приведённым в спецификации.

В условиях высокой конкуренции на мировом рынке запоминающих устройств очень важно, чтобы спецификации на микросхемы DRAM были, насколько это только возможно, стандартизированы. Благодаря этому пользователи могут в процессе приобретения электронных компонентов сравнивать продукцию от различных производителей и в значительной степени обезопасить себя от проблем, связанных с отсутствием в продаже тех или иных микросхем. Для производителя важнейшая задача при разработке микросхемы памяти состоит в приведении её характеристик в соответствие с техническими требованиями. Как правило, даже если некий производитель выпускает в продажу усовершенствованную версию микросхемы, но при этом «не укладывается в рамки» спецификации, он с большим трудом может найти соответствующую нишу на потребительском рынке. Поэтому новые разработки микросхем памяти обычно проводятся в сотрудничестве с международными институтами стандартов, например JEDEC, или в рамках двухсторонних или трёхсторонних кооперативных соглашений между производителями микросхем памяти.

6.2.4. Механическая конструкция микросхем памяти DRAM

Микросхемы DRAM поставляются в различных корпусах. Корпуса DIP (Dual-In-line Package) и ZIP (Zigzag-In-line Package) относятся к устаревшим и в настоящее время заменены корпусами для поверхностного монтажа (Surface Mounted Device — SMD). Микросхемы с объёмом памяти 1 Мбит и 4 Мбит выпускались в малогабаритном корпусе с J-образными выводами SOJ (Small Outline J). В настоящее время широко используются тонкие малогабарит-



Примечание. N.C. — вывод не подключен

Рис. 6.2. Корпус TSOP-II-66 микросхемы DDR SDRAM с объёмом памяти 512 Мбит.

Таблица 6.1. Назначение выводов корпуса TSOP для DDR SDRAM

Вывод	Описание	Вывод	Описание
V _{DD}	Положительное напряжение питания	RAS, CAS, WE	Сигналы шины управления памятью
V _{SS}	Отрицательное напряжение питания, обычно обозначается на схемах как земля (GND)	BA _n	Адрес банка
VDDQ VSSQ	Напряжение питания выходных драйверов (Q = Query, запрос чтения данных)	A _n	Сигнал адреса
CK	Тактовый сигнал	DQ _n	Вход/выход данных (Data&Query)
CKE	Вывод разрешения тактового сигнала	DM _n	Сигнал маскирования данных
CS	Сигнал выбора кристалла	DQS _n	Тактовый сигнал данных (DQ Strobe)

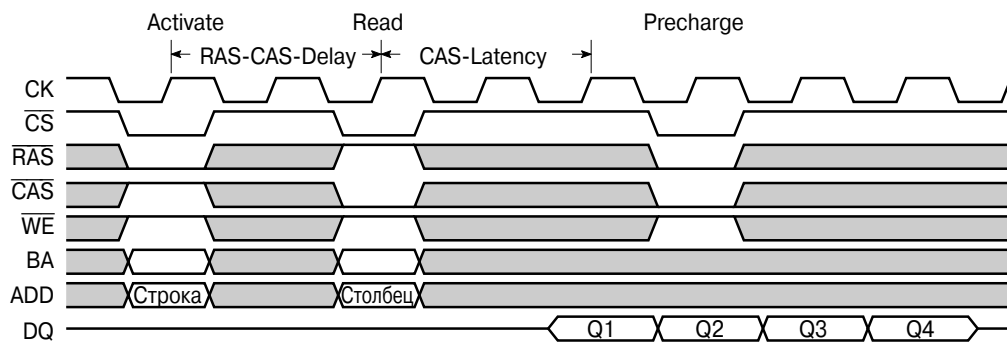


Рис. 6.3. Цикл чтения SDRAM.

ные корпуса TSOP (Thin Small Outline), а также корпуса FBGA (Fine-pitch Ball Grid Array), у которых выводы расположены не по периметру, а в виде матрицы в нижней части микросхемы. Кроме того, корпус FBGA стал одним из первых корпусов, габариты которого определяются размерами кристалла (Chip Size Package — CSP), а не стандартным расстоянием между выводами корпуса.

Напряжение питания и различные сигналы поступают в микросхему через выводы, имеющие форму штырьков или шариков (см. Рис. 6.2 и Табл. 6.1).

6.2.5. Описание работы DRAM на примере SDR SDRAM

Микросхемы DRAM имеют три основных режима работы: запись элемента данных в ячейку (write — запись), чтение этих данных из ячейки (read — чтение) и обновление (регенерация) содержимого ячеек памяти (refresh — обновление). Кроме того, существует ряд дополнительных режимов энергосбережения и режим начальной инициализации микросхемы.

Работа в каждом из трёх указанных режимов производится в два этапа:

- адресация (выбор) ячейки памяти;
- операции с выбранной ячейкой памяти (чтение, запись, обновление).

В синхронной DRAM (SDRAM) единственными сигналами управления её интерфейсом являются тактовые импульсы. В то время как при использовании асинхронного интерфейса временные характеристики и режимы работы микросхемы DRAM задавались фронтами управляющих сигналов, в синхронном интерфейсе эти функции выполняет нарастающий фронт тактового импульса, а логические уровни сигналов управ-

ления на момент его прихода определяют, какая именно управляющая команда должна быть загружена в микросхему памяти.

Цикл чтения

Команда Activate инициирует чтение адреса строки и запуск внутреннего процесса считывания данных из ячеек этой строки (см. Рис. 6.3).

По команде Read производится чтение адреса столбца. Этот адрес определяет выбор конкретной ячейки в адресованной ранее строке. Минимально допустимый интервал времени между командами Activate и Read обычно приводится в спецификации микросхемы памяти как время задержки между сигналами RAS и CAS (RAS-CAS delay). Через некоторое время после установления сигнала CAS, равное двум или трём периодам тактового сигнала, информация, содержащаяся в выбранной ячейке памяти, появляется на выходах данных DQ. Этот интервал времени называется временем задержки, или временем выборки сигнала CAS (CAS latency). Количество выводимых последовательно слов данных определяется значением параметра burst length (длина пакета). В нашем примере значение этого параметра равно 4.

Команда Precharge завершает цикл обращения к строке ячеек памяти.

Цикл записи

Цикл обращения к памяти для записи данных очень похож на цикл обращения к памяти для считывания (см. Рис. 6.4). Однако сигнал разрешения записи $\overline{WE}$ (write enable) должен находиться в активном состоянии (которому соответствует уровень логического нуля, то есть НИЗКИЙ уровень). По фронту тактового импульса, сле-

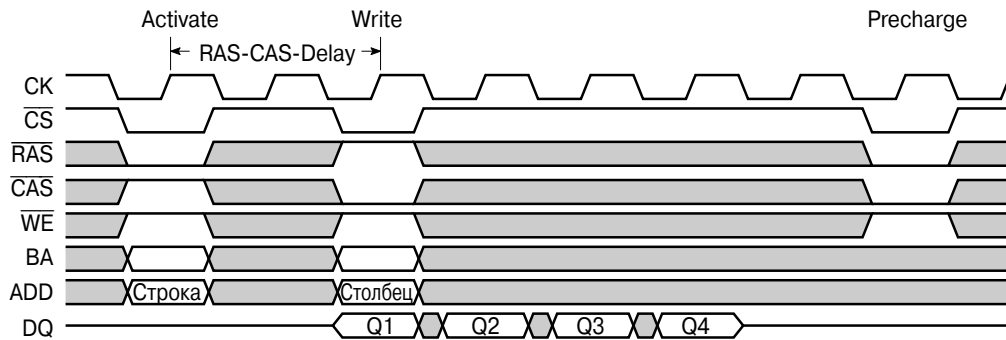


Рис. 6.4. Цикл записи SDRAM.

дующего после команды разрешения записи, данные записываются в выбранную ячейку.

Тот случай, когда данные в циклах чтения и записи могут быть такт за тактом маскированы сигналом DQM, здесь не рассматривается. Кроме того, между командами Activate и соответствующей ей командой Precharge допустимо выполнение нескольких команд чтения и записи. Однако следует обратить особое внимание на те случаи, когда направление передачи данных изменяется, поскольку ни контроллер управления памятью, ни SDRAM не могут передавать данные в обоих направлениях одновременно.

Цикл обновления

Любая динамическая память устроена таким образом, что данные в ячейках гарантированно сохраняются лишь в течение очень короткого времени (32 или 64 мс). Поэтому в процессе обращения к ячейке памяти производится обновление данных с периодом, равным этому интервалу времени.

Команда Auto Refresh запускает цикл обновления строки ячеек памяти в каждом из банков микросхемы SDRAM. Во время

цикла обновления адрес строки определяется состоянием внутреннего счётчика, а внешний адрес на шине ADD игнорируется. Поскольку обновление выполняется одновременно во всех банках памяти, необходимо, чтобы на момент начала исполнения этой команды ни к одному из этих банков не производилось обращение. Следующая внешняя команда может быть обработана микросхемой памяти лишь по окончании цикла обновления, длительность которого обычно приводится в спецификации на микросхему. Временные параметры всех процессов, необходимых для обновления данных, контролируются аппаратно (см. Рис. 6.5).

Альтернативным решением при обновлении данных строки может быть использование команд Activate и Precharge, поскольку каждый раз, когда строка активируется (т.е. к ней производится обращение), содержимое всех её ячеек считывается, а после исполнения команды Precharge — полностью обновляется. Однако в этом случае требуется выполнение двух команд для каждого банка памяти, в то время как команда Auto Refresh используется сразу для всех банков.

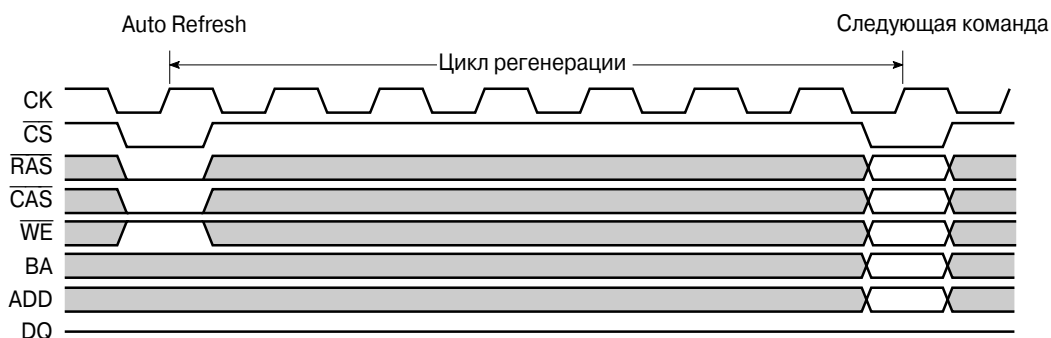


Рис. 6.5. Цикл обновления SDRAM.

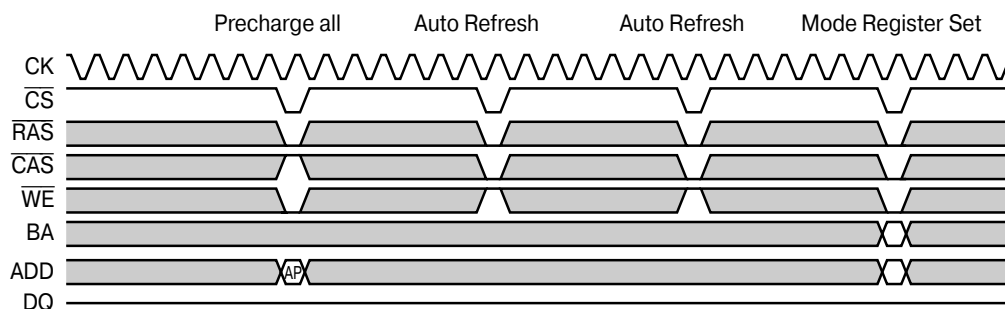


Рис. 6.6. Цикл инициализации SDRAM.

Цикл инициализации

Прежде чем микросхему SDRAM можно будет использовать для хранения данных, необходимо выполнить процедуру её инициализации (см. **Рис. 6.6**). Первым этапом данной процедуры является закрытие всех банков командой Precharge All. При этом все банки памяти переводятся в режим ожидания, чем обеспечивается корректная обработка следующих за ней команд Auto Refresh. Цикл инициализации включает в себя, как минимум, две таких команды. После этого командой программирования параметров системного регистра (Mode Register Set) задаются длина пакета передаваемых данных, время выборки сигнала CAS и тип пакетной передачи. Последний параметр определяет, каким образом изменится состояние внутреннего счётчика при пакетной передаче данных в том случае, когда адрес стартовой ячейки пакета не является самым младшим адресом среди ячеек, соответствующих этому пакету.

6.2.6. Технология производства микросхем DRAM

Современные микросхемы DRAM изготавливаются исключительно по КМОП-технологии. По сравнению с более простой технологией *n*-МОП, использовавшейся при изготовлении предыдущих поколений DRAM, применение КМОП-технологии позволяет значительно снизить уровень энергопотребления микросхем памяти.

В отличие от управляемых током биполярных транзисторов, полевые транзисторы, или МОП-транзисторы, управляются напряжением. Существуют транзисторы с *p*-каналом и *n*-каналом.

Металлический затвор изолируется от поверхности полупроводника тонким слоем диэлектрика — оксида кремния (поэто-

му технология и носит название Metal Oxide Semiconductor, так как при этом используется структура металл—окисел—полупроводник). Однако в настоящее время вместо металла в качестве материала затвора используется поликристаллический кремний. Если к затвору приложено соответствующее напряжение, то на поверхности полупроводника формируется проводящий канал, который соединяет области стока и истока и обеспечивает протекание тока между ними.

Процессы, происходящие внутри *n*-канального транзистора

Подложка *n*-канального транзистора легирована донорной примесью, т.е. в ней создаётся избыточное количество неосновных носителей заряда (дырок). Если к затвору будет приложено положительное по отношению к подложке напряжение, то в непосредственной близости от оксидного слоя, отделяющего затвор от подложки, образуется зона объёмного заряда, в которой количество дырок резко снижено.

Во всем объёме полупроводника, включая зону объёмного заряда, в процессе генерации и рекомбинации постоянно образуются и исчезают носители заряда. Вследствие этого, при наличии разницы потенциалов на границе между полупроводником и изолирующим оксидным слоем, электроны мигрируют к поверхности диэлектрика, а дырки — к подложке. Электроны, скапливающиеся на поверхности диэлектрика, формируют токопроводящий слой, называемый также инверсным слоем, заряд которого противоположен заряду материала подложки (см. **Рис. 6.7**).

«Соседствуя» с *p-n*-переходами истока и стока (сильно легированных областей, которые служат для подключения к токопроводящим цепям внутри микросхемы), ин-

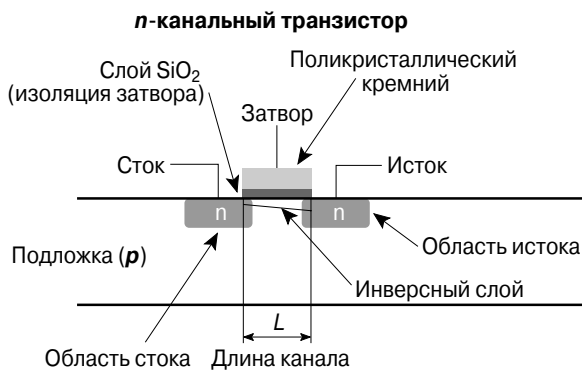


Рис. 6.7. Схематическое изображение структуры n -канального транзистора.

версионный слой может быть сформирован очень быстро за счёт притока электронов из этих областей. Поскольку напряжения исток—подложка V_{SV} и сток—подложка положительны, соответствующие p - n -переходы смещены в обратном направлении, вследствие чего они оказываются изолированными от подложки.

Наличие инверсионного слоя обеспечивает создание токопроводящего канала между истоком и стоком. Для образования инверсионного слоя необходимо, чтобы напряжение на затворе превышало некоторое пороговое значение V_t .

Пороговое напряжение зависит также от напряжения исток—подложка V_{SV} из-за управляющего влияния подложки. Причина данного влияния заключается в том, что заряд затвора, величина которого при сильной инверсии является постоянной, может различным образом распределяться между инверсионным слоем и зоной объёмно-пространственного заряда (при этом заряды указанных областей взаимно противоположны по знаку). С ростом напряжения V_{SV}

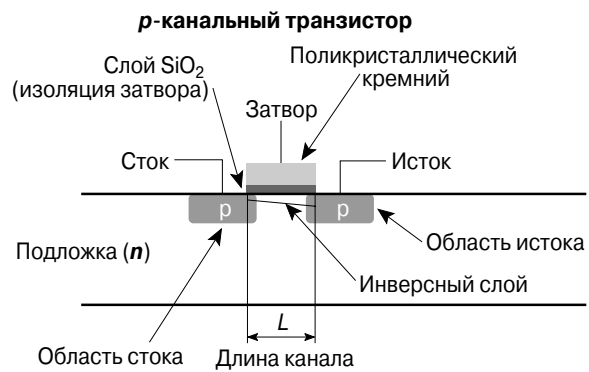


Рис. 6.8. Схематическое изображение структуры p -канального транзистора.

увеличивается ширина зоны объёмно-пространственного заряда, соответственно уменьшаются заряд и ширина инверсионного слоя. Неприятным следствием данного эффекта является увеличение порогового напряжения.

В принципе, всё описанное выше вполне применимо к p -канальным транзисторам (см. Рис. 6.8) с учётом обратной полярности напряжений. Однако в p -канальном транзисторе носителями заряда являются не электроны, а имеющие гораздо меньшую подвижность дырки. Это приводит к тому, что при прочих равных условиях n -канальный транзистор обеспечивает в 2-3 раза больший коэффициент усиления по току, чем p -канальный.

В КМОП-схемах (см. Рис. 6.9) n -канальные и p -канальные транзисторы формируются на одной и той же подложке. Для того чтобы сформировать p -канальный транзистор на p -подложке, при помощи повторного легирования создаётся так называемый n -карман (локальная область, обогащённая электронами).

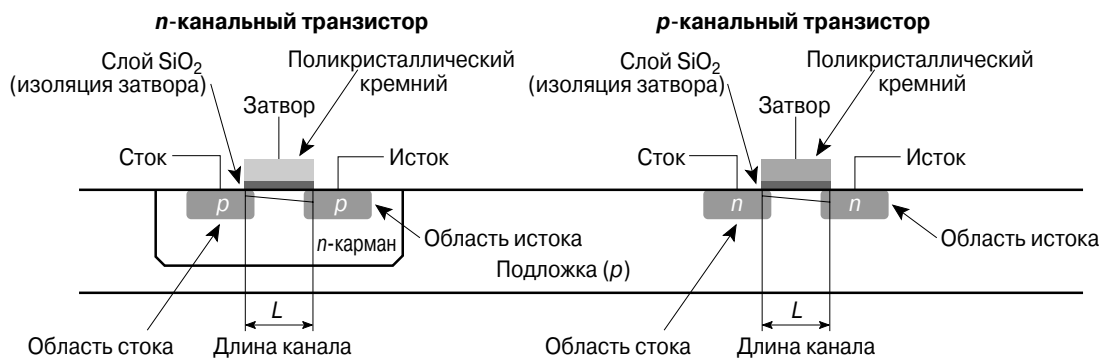


Рис. 6.9. Схематическое изображение структуры комплементарной пары транзисторов, выполненных по КМОП-технологии.

Для транзисторов с малой (менее 1 мкм) длиной канала наблюдается снижение порогового напряжения из-за уменьшения заряда в зоне объёмно-пространственного заряда под влиянием зарядов, находящихся в зонах стока и истока. Это, в свою очередь, приводит к увеличению заряда инверсионного слоя, и пороговое напряжение уменьшается. Дополнительным фактором, влияющим на пороговое напряжение, является напряжение сток—исток V_{DS} .

Воздействие данного фактора проявляется в том, что уменьшение длины канала и рост напряжения сток—исток вызывают снижение порогового напряжения затвора. В конце концов, это может привести к соприкосновению зон истока и стока и появлению тока между ними, которым невозможно будет управлять, изменяя напряжение затвора. То есть, возникнет так называемый пробой.

ESD-чувствительность (пробой диэлектрика)

Диэлектрический слой изоляции затвора имеет очень малую толщину, поэтому существует вероятность его пробоя. Это происходит, если напряжение затвор—подложка настолько велико, что токопроводящий канал «захватывает» и часть оксидного слоя, в результате транзистор окончательно выходит из строя.

Выбросы напряжения, приводящие к печальным последствиям такого рода, на практике происходят довольно часто. Как правило, их причиной является разряд через электронный компонент, изготовленный по КМОП-технологии, электростатического заряда, накопившегося на людях или механизмах.

Подобное повреждение называется пробоем диэлектрика под воздействием электростатического разряда (ElectroStatic Discharge — ESD). Пробои возникают, в основном, в транзисторах, находящихся в непосредственном контакте с внешним миром, т.е. во входных и выходных каскадах микросхем DRAM или иных устройств, изготовленных по МОП-технологии.

Для того чтобы исключить возможность повреждения микросхем DRAM в результате воздействия электростатического разряда, в них встроены дополнительные защитные элементы (см. **Рис. 6.10**). Резистор R ограничивает пиковый ток через защитные

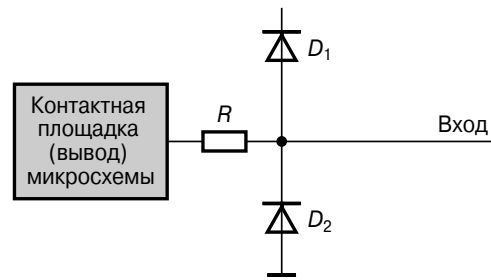


Рис. 6.10. Схема защиты выводов микросхем DRAM от электростатического разряда.

диоды D_1 и D_2 , которые открываются, если напряжение на входе превышает V_{DD} или опускается ниже V_{SS} .

Тиристорный эффект (эффект защёлки)

В полупроводниковых компонентах, изготовленных по КМОП-технологии, области истока, затвора и подложки образуют паразитный биполярный транзистор, который обычно не создаёт никаких проблем, поскольку его p - n -переходы смещены в обратном направлении и находятся в непроводящем состоянии. Однако если по тем или иным причинам напряжение исток—подложка (V_{SB}) изменится таким образом, что станет отрицательным, то паразитный p - n -переход окажется смещённым в прямом направлении и начнёт проводить ток. Если в КМОП-микросхеме имеется последовательность n - p - n и p - n - p -переходов (а при использовании данной технологии такие последовательности встречаются достаточно часто), то формируется структура, аналогичная тиристор (четырёхслойному транзистору). Как известно, тиристор обладает способностью сохранять устойчивое открытое состояние («защёлкиваться» подобно триггеру), т.е. после открывания тиристора закрыть его можно лишь снятием напряжения питания. Таким образом, тиристорный эффект приводит к возникновению высокого сквозного тока (тока короткого замыкания) между шинами питания V_{DD} и V_{SS} КМОП-микросхемы, что, как правило, означает выход микросхемы из строя.

С целью противодействия данному явлению разработаны определённые меры. Там, где это возможно, практикуется пространственное разделение комплементарных транзисторных пар. В других случаях используются защитные кольца вокруг n -карманов или выводов подложки. Эти кольца

снижают сопротивление между эмиттером и базой паразитного биполярного транзистора и уменьшают вероятность возникновения эффекта защёлки.

Вероятность возникновения данного эффекта может быть также значительно уменьшена за счёт применения технологии, в которой высокоомный эпитаксиальный слой создаётся на сильно легированной низкоомной подложке. А использование глубоких, сильно легированных n -карманов (так называемая технология ретроградного легирования n -карманов) позволяет обойтись без установки защитных колец.

Характеристики переключения КМОП-микросхем

Для включения n -канального МОП-транзистора с индуцированным каналом требуется, как минимум, обеспечить некоторое положительное пороговое напряжение затвор—исток ($V_{GS(th)}$). Поэтому при передаче логической 1 максимально возможное напряжение на стоке МОП-транзистора должно быть ниже управляющего напряжения на его затворе на величину порогового напряжения (т.е. сигнал логической 1 передаётся с ослаблением). Зато p -канальный транзистор передаёт сигнал логической 1 без ослабления, поскольку в этом случае напряжение на его затворе соответствует уровню логического 0, т.е. напряжение V_{GS} гораздо больше, чем отрицательное пороговое напряжение $V_{GS(th)}$. С другой стороны, n -канальный транзистор лучше использовать при переключении сигнала из состояния логической 1 в состояние логического 0, так как сигнал логического нуля будет передаваться без ослабления, поскольку V_{GS} вновь оказывается гораздо больше, чем пороговое напряжение $V_{GS(th)}$. Напротив, для p -канального транзистора при переключении сигнала логического 0 напряжение на стоке отличается от входного на величину порогового напряжения.

Таким образом, если требуется создать логический элемент, который обеспечит переключение логических сигналов как ВЫСОКОГО, так и НИЗКОГО уровня с пренебрежимо малыми потерями, необходимо соединить n -канальный и p -канальный транзисторы параллельно, а управление ими осуществлять комплементарными тактовыми сигналами. При этом сигнал логической 1 (ВЫСОКОГО уровня) будет

проходить через p -канальный МОП-транзистор, а сигнал логического 0 — через n -канальный МОП-транзистор.

Можно также использовать характеристики переключения n -канальных и p -канальных МОП-транзисторов при реализации логического КМОП-инвертора (в этой схеме исток n -канального транзистора подключён к земле, а исток p -канального транзистора — к положительной шине питания). Когда на входе инвертора присутствует уровень логической 1, n -канальный транзистор полностью открывается, а p -канальный транзистор остаётся в закрытом состоянии; при этом напряжение на выходе будет равно нулю. Если же на входе инвертора присутствует уровень логического 0, то p -канальный транзистор открывается, а n -канальный — закрывается, и напряжение на выходе будет равно напряжению питания. Таким образом, в каждый момент времени один из комплементарных транзисторов полностью открыт, а другой — полностью закрыт, что предотвращает возникновение сквозного тока в процессе переключения сигналов. Кроме того, такое схемное решение означает, что «непроизводительные» потери тока при переключении КМОП-элемента оказываются чрезвычайно малы.

Тем не менее, КМОП-микросхема всё же потребляет ток. Во-первых, для переключения транзистора необходимо накопить на его затворе заряд определённой величины. А перемещение заряда — это, собственно говоря, и есть электрический ток, и он будет течь в цепи управления транзистором до тех пор, пока требуемое количество заряда не попадёт на затвор. Во-вторых, ИС КМОП содержит такие схемные элементы, в которых предумышленно (например, в модуле стабилизатора напряжения) или непредумышленно (из-за «мелких» ошибок в разводке соединений) протекают уравнивающие токи. Поэтому даже при работе в статическом режиме КМОП-микросхема всё-таки имеет некоторые потери.

Конечно, львиная доля потребления тока приходится на активный режим работы. Например, микросхема DRAM потребляет 50...500 мА в активном режиме и менее 5 мА в режиме ожидания.

В отличие от «чисто» переключательных КМОП-микросхем, реализация ключевого режима работы устройств, выполненных по

технологии *n*-МОП, требует использования дополнительного резистора в схеме инвертора. Поэтому такие устройства, хотя и являются высокоомными, характеризуются значительно более высоким уровнем потерь при переключении, чем КМОП-схемы.

6.2.7. Внутренняя структура и принципы работы DRAM

Микросхема DRAM организована как матрица. В массиве хранения данных (странице) строки соответствуют словам данных, а столбцы — битам. Реальное соответствие внешнего адреса внутреннему расположению информации определяется физическим распределением ячеек внутри кристалла, а также требуемой производительностью и пространством, необходимым для их размещения.

Адресация в микросхеме DRAM

Адресация данных осуществляется в двоичном коде. Это значит, что если имеется 1М (1 048 576) ячеек, то необходимо задействовать 20 адресных линий (по одной линии можно адресовать две ячейки, по двум линиям — 4 ячейки, по трём линиям — 8 ячеек, а двадцать линий обеспечивают адресацию 2^{20} ячеек). В отличие от статической памяти, в микросхемах DRAM используется мультиплексирование адреса, поэтому для адресации 1 Мбит требуется только 10 линий адреса вместо 20. Именно с данной целью структура памяти DRAM организована в виде двумерной матрицы; при этом существует определённое различие в адресации по оси *X* и по оси *Y* матрицы, или, в терминах, используемых при описании микросхем DRAM, — по адресам строк и столбцов. Итак, с помощью десяти адресных линий можно адресовать 1024 строк и 1024 столбцов. Матрица из 1024 строк и 1024 столбцов содержит соответственно 1 048 576 ячеек микросхемы DRAM объёмом 1 Мбит.

Временное мультиплексирование адресных линий осуществляется посредством внешних команд, поступающих в микросхему DRAM. Адрес строки поступает с командой *Activate*, а адрес столбца — с командами *Read* или *Write*. В течение интервала времени между приходом этих команд содержимое выбранной линии считывается в соответствии с процедурой, которая более детально будет описана ниже.

Память SDRAM организована в виде набора так называемых банков данных, что обеспечивает дополнительные возможности по управлению памятью и создаёт своего рода «третье измерение» в матрице хранения информации. Развитие новых технологий производства модулей памяти привело к увеличению степени интеграции, т.е. для реализации больших объёмов памяти требуется меньшее количество модулей. Платой за это стало уменьшение гибкости управления памятью. Поскольку для каждого из модулей памяти в любой момент времени активной является только одна строка (обращение к памяти осуществляется путём выбора строки), количество строк, которое может быть выбрано одновременно, уменьшается с уменьшением количества модулей. Использование же технологии банков позволяет осуществлять обращение к микросхеме памяти как к набору из двух, четырёх и более виртуальных модулей (страниц). При этом функциональные узлы и блоки (например, входные каскады и схема регенерации динамической памяти), которые необходимы для работы всей микросхемы в целом, являются общими для всех банков. В остальном, каждый банк работает независимо от других. Соответственно, при обращении к микросхеме памяти SDRAM вместо индивидуального сигнала выбора каждого дискретного модуля памяти теперь используются общий сигнал выбора кристалла и двоичный адрес выбираемого банка.

Организация DRAM

Одной из основных причин разработки DRAM было стремление обеспечить малые размеры корпуса микросхемы при относительно больших объёмах хранимых данных. Поэтому первые такие микросхемы имели не только меньшее, по сравнению с микросхемами статической памяти, количество адресных линий (мультиплексированных), но и только один вход и один выход данных. В следующих поколениях DRAM, начиная с объёма памяти 64 Кбит, была реализована идея разделения всей доступной памяти на четыре области (сегмента), при этом каждый из указанных сегментов имел свой вход/выход данных. Как и прежде, движущей силой инноваций стали достижения в области микроминиатюризации: при одинаковом объёме памяти один чип

нового поколения (версии $\times 4$) заменял 4 модуля памяти предыдущего поколения (версии $\times 1$). А это открывало прямую дорогу к созданию следующих поколений памяти с меньшими геометрическими размерами кристалла и меньшим энергопотреблением.

Помимо способа адресации, важнейшее значение имеет общий объём задействованной памяти. Например, если для обработки графической информации требуется 128-битная шина данных, то для её создания потребуется использовать 32 модуля с организацией $\times 4$ (что, собственно, и даст 128 линий ввода/вывода). При использовании 256-мегабитных микросхем DRAM суммарный объём графической памяти составит 8 Гбит (1 Гбайт), что значительно больше, чем объём основной памяти компьютеров 2003./2004 годов выпуска. С другой стороны, при использовании модулей с организацией $\times 32$ общий объём видеопамати будет равен всего лишь 128 Мбайт.

Появление модулей с большим количеством вводов/выводов облегчило создание систем с меньшим количеством компонентов и, следовательно, с меньшим энергопотреблением. Однако плата за большее количество выводов микросхемы заключалась в увеличении габаритов её корпуса или в повышенных затратах на новую и дорогую технологию установки кристаллов в корпус с меньшим шагом выводов.

В отличие от устаревших модулей памяти с организацией $\times 1$, в наше время в микросхемах памяти принято использовать совмещённые линии ввода/вывода данных. Это не создаёт проблем при их использовании, поскольку процессорная шина организована аналогичным образом. Впрочем, некоторые современные микросхемы всё-таки имеют отдельные входы и выходы данных, что позволяет одновременно считывать и записывать данные. При использовании же универсальных линий ввода/вывода какие-либо данные не могут быть считаны из модуля памяти до того, как будет завершён цикл их записи в память.

Скремблирование

Когда речь идёт о необходимости «физической» проверки ячеек памяти на неисправность или проведения тестовой записи в массив ячеек специальной последовательности данных, следует помнить, что реаль-

ное расположение ячеек памяти на кристалле не соответствует представлениям об «идеальной» матрице. Одна из причин этого состоит в том, что кристалл обычно не является квадратным. Другая, гораздо более важная причина заключается в стремлении производителей модулей памяти разместить как можно больше ячеек на минимальной площади кристалла и сократить время их адресации до минимума. Иными словами, чтобы записать данные в интересующую нас ячейку или прочесть их оттуда, предварительно потребуется осуществить преобразование адреса.

Для того чтобы появилась возможность физического обращения к той или иной ячейке памяти, её адрес должен быть расшифрован с использованием специальной программы или с помощью таблицы перекодировки адреса. Перекодировка состоит в преобразовании адреса, позволяющем определить, какая именно ячейка на кристалле была адресована, поскольку физический адрес ячейки, реально выставяемый на адресных входах микросхемы, отличается от её логического адреса.

Поэтому для упрощения процесса тестирования большого количества микросхем DRAM при их массовом производстве для каждого типа DRAM разрабатываются и программируются специальные устройства, так называемые дешифраторы адреса (скремблеры), которые преобразуют логический адрес, поступающий с выхода генератора адресов, в физический адрес ячейки памяти.

Поскольку принципы физической адресации ячеек памяти в микросхемах, разработанных различными производителями, обычно различаются, для управления адресацией этих микросхем должны использоваться соответствующие скремблеры. Впрочем, скремблеры могут видоизменяться даже для различных версий одной и той же микросхемы от одного и того же производителя. Сведения об алгоритме скремблирования обычно не приводятся в спецификации, такая информация может быть предоставлена производителем лишь по особому запросу.

Помимо скремблирования адресов, важную роль играет и скремблирование данных. Как будет показано ниже (см. подраздел «Считывание данных»), в зависимости от того, к слову (строке) или к столбцу стра-

ницы памяти происходит обращение, реальная запись данных в ячейки памяти осуществляется в прямом или инверсном виде. При анализе состояния массива ячеек чрезвычайно важно знать, какая в действительности информация была записана в ту или иную ячейку. Использование скремблера данных позволяет записывать в ячейки памяти именно ту информацию, которая необходима.

Следует отметить, что скремблирование данных должно осуществляться с учётом того, проводилось или нет предварительное скремблирование адресов. Если преобразование адреса имело место, то скремблирование данных осуществляется иначе, чем в ситуации, когда скремблирование адресов не проводилось.

Избыточность

Вне зависимости от количества ячеек памяти, которое может быть размещено на кристалле, необходимо, чтобы все они, до единой, сохраняли работоспособность в рабочем диапазоне эксплуатационных параметров. Поскольку размеры внутренней структуры микросхемы относятся к субмикронному диапазону, как правило, невозможно предотвратить все единичные отказы. Так, например, в процессе производства кристалла мелкие пылевые частицы могут оказать негативное влияние на формирование отдельных ячеек и их последующую работу. При этом с финансовой точки зрения очень важно, чтобы в продажу поступали только абсолютно исправные микросхемы.

На начальном этапе разработки новой микросхемы DRAM, когда технология её изготовления ещё недостаточно отработана, введение избыточности является одним из основных способов повышения надёжности готовой продукции. Количество избыточных элементов, которое может быть размещено на кристалле, определяется тем, сколько свободного пространства удастся (тем или иным способом) зарезервировать для их размещения. Наличие избыточных элементов позволяет увеличить выход годных микросхем на 30...40%, а порой и ещё больше. По мере того как первые образцы изготовленных кристаллов DRAM «нарабатывают» определённый срок службы, а производственный процесс становится всё более отлаженным, потребность в размеще-

нии избыточных элементов на кристалле снижается. Это дает возможность изготавливать чипы меньшего размера и, соответственно, увеличить их количество, получаемое из исходного полуфабриката — полупроводниковой пластины.

Для того чтобы дефекты отдельных ячеек не становились причиной фатальных отказов всей микросхемы, предусмотрена возможность устранения неисправностей прямо в ходе технологического цикла. Кроме основного массива ячеек, на кристалле создаются дополнительные строки и столбцы ячеек, которые могут быть использованы вместо дефектных. Поскольку количество этих дополнительных элементов ограничено, некоторые дефекты не могут быть исправлены, поэтому определённое количество чипов всегда оказывается непригодно к дальнейшему использованию.

Возможность замены дефектных ячеек на заведомо исправные из числа избыточных ячеек обеспечивается тем, что адрес неисправной ячейки памяти записывается («прожигается») в банк адресов, соответствующий избыточной строке. Каждый такой банк, через который осуществляется управление адресацией всех строк и столбцов матрицы дополнительных ячеек, с технической точки зрения представляет собой программируемое ПЗУ (PROM). Его программирование осуществляется после проведения тестов и обнаружения неисправных ячеек. Существует два метода реализации данной процедуры: разрушение лучом лазера (прожиг) металлических перемычек, соответствующим образом внедрённых в структуру кристалла ПЗУ, или расплавление этих перемычек вследствие кратковременной токовой перегрузки калиброванной амплитуды и длительности. После программирования логическая схема адресации будет «знать», обращения к каким из адресов должны быть перенаправлены на соответствующую строку дополнительных ячеек памяти.

Ячейки памяти

Ячейка памяти состоит из конденсатора и управляющего транзистора. Конденсатор представляет собой созданный в кристалле токопроводящий слой, изолированный слоем диэлектрика (оксида кремния) от подложки (общей для всех ячеек). Он может находиться в одном из двух состояний

(«заряжен» или «разряжен»), соответствующих логической единице и логическому нулю. Ёмкость конденсатора тем больше, чем больше площадь поверхности проводящего слоя и чем меньше толщина изолирующего оксидного слоя. Значение ёмкости конденсатора должно позволять уверенно отличать логическую 1 от логического 0 при считывании содержимого ячейки.

Пока объём памяти микросхем не превышал 1 Мбит, конденсаторы ячеек памяти располагались непосредственно на поверхности кремниевого кристалла параллельно подложке. Но уже начиная с поколения микросхем с объёмом памяти 4 Мбит от использования планарных ячеек пришлось отказаться, даже несмотря на совершенствование технологий создания сверхтонких диэлектрических слоёв. В обиход вошли трёхмерные структуры — так называемые канавки. Как следует из их названия, канавки — это выемки или специальным образом протравленные углубления в кремниевой пластине. Поверхность такой канавки используется как обкладка конденсатора, чем обеспечивается высокая ёмкость при ограниченной площади конденсатора.

Поскольку управлять процессом создания таких канавок достаточно сложно, ряд производителей полупроводниковых компонентов разработали так называемые стекловые ячейки памяти. В сущности, стекловая ячейка — это вариант ячейки с трёхмерной структурой, когда вместо канавок для увеличения ёмкости на поверхности полупроводника создаются выступы.

Считывание данных

Значительной проблемой с точки зрения разработки и функционирования DRAM является вопрос организации считывания данных из ячейки памяти. Дело в том, что данные хранятся в виде заряда на конденсаторе очень малой ёмкости (примерно 25...30 фФ), к тому же эта ёмкость может снижаться под воздействием различных факторов. Следовательно, для обеспечения уверенного распознавания данных необходимо использовать усилитель заряда.

Конденсатор каждой ячейки подключён или, как иногда говорят, «подвешен» к коммутирующему транзистору, через который проходит ток его заряда или разряда. Этот транзистор управляется (открывается или закрывается) сигналом выбора строки

(wordline). Данные считываются или записываются в ячейку через соответствующую линию столбца (bitline), к которой подключён коммутирующий транзистор. При записи не возникает никаких проблем, поскольку необходимый для изменения состояния ячейки заряд поступает от источника питания. При считывании данных из ячейки её конденсатор подключается к линии (шине) столбца. Заряд конденсатора изменяется, это изменение воздействует на чувствительный усилитель (так называемый усилитель считывания) и усиливается, благодаря чему можно уверенно определить, соответствует ли это значение логическому 0 или логической 1.

Линия столбца представляет собой пару комплементарных шин, каждая из которых подключена к усилителю считывания. Эти шины обозначаются соответственно как основная (BT) и дополнительная (BC). Конденсатор каждой ячейки памяти соединён через канал соответствующего полевого транзистора с шиной столбца; затвор транзистора управляется сигналом выбора строки. Когда такой сигнал поступает (строка активируется), все ячейки из этой строки подключаются к соответствующим шинам столбцов. В результате напряжение на каждой из шин столбца изменяется под влиянием заряда, стекающего в неё из ячейки памяти. Указанное изменение довольно мало и определяется соотношением ёмкости конденсатора ячейки и ёмкости шины (которое приблизительно равно 1:5), но оно может быть зарегистрировано. Для этого используется усилитель считывания, который по минимальному изменению напряжения на шине столбца корректно распознаёт данные. Каждая шина столбца имеет один *p*-канальный и один *n*-канальный усилитель считывания. Их функция заключается в усилении малого напряжения на конденсаторе ячейки памяти, которая подключается к комплементарным шинам столбца после активации строки, поскольку только так можно однозначно различать напряжения, соответствующие логическому 0 и логической 1. Более детальное рассмотрение процесса считывания данных из ячеек памяти выходит за рамки данной книги; скажем только, что этот процесс определяется конструкцией микросхемы памяти и конкретными принципами организации считывания.

Заметим, что попытка «отменить» мультиплексирование адреса (т.е. активизировать строку и столбец одновременно) никоим образом не позволит ускорить работу DRAM. Принцип организации динамической памяти предполагает наличие небольшой, но обязательной временной задержки с момента выбора (активации) строки до того момента, когда данные станут доступны (считаны в буфер данных строки), и можно будет активировать адрес столбца.

Обновление памяти

Поскольку основой ячейки памяти DRAM является конденсатор очень маленькой ёмкости, с течением времени, вследствие различного рода утечек, неизбежна потеря хранящегося в ней заряда. Одной из главных причин утечек является повышение температуры, которое придает носителям заряда большую энергию и позволяет им легче преодолевать изолирующий барьер. Временной интервал с момента записи данных в ячейку до момента, когда данные из ячейки начинают считываться некорректно из-за потери части заряда на конденсаторе, называется временем обновления, или временем хранения данных. Длительность этого интервала зависит от значения хранящегося в ячейке сигнала данных. Например, если в ячейке памяти хранится логический 0 и окружающая ячейку подложка имеет нулевой потенциал, то нет никакой причины для возникновения тока утечки, который мог бы изменить потенциал ячейки (т.е. время обновления увеличивается). При более точной оценке времени обновления необходимо учитывать, что вокруг данной ячейки располагаются другие строки и столбцы ячеек памяти, в которых вполне могут содержаться логические 1. Тем не менее, если ячейка была изготовлена оптимальным образом и не имеет случайных дефектов, предельное время обновления данных является вполне адекватной величиной. Производители микросхем DRAM обычно приводят этот параметр в спецификации как собственное (внутреннее) время обновления.

При проектировании устройств DRAM следует очень хорошо понимать, что при отсутствии обновления данных в течение некоторого времени, примерно через несколько миллисекунд после записи, данные будут потеряны. Необходимо также стре-

миться к тому, чтобы паузы в работе, связанные с процессом обновления данных, были минимальными.

Чтобы исключить возможность потери данных в ячейках памяти, эти данные должны через определённые интервалы времени обновляться, т.е. считываться, усиливаться и записываться обратно в ячейки. Данный процесс осуществляется каждый раз при обращении к строке матрицы DRAM. Сигнал выбора строки управляет открыванием коммутирующих транзисторов в ячейках памяти. Транзисторы, в свою очередь, подключают запоминающие конденсаторы к входам усилителей считывания соответствующих столбцов. В процессе считывания данных, как указывалось выше, происходит утечка заряда из ячеек памяти. Поэтому после завершения указанного процесса усиленные напряжения, соответствующие исходным логическим уровням сигналов, поступают обратно на конденсаторы ячеек памяти, восстанавливая их заряд. Как правило, для того чтобы ускорить процесс обновления данных, используется метод одновременной адресации нескольких строк. Так, например, у микросхем SDRAM при выполнении команды Auto Refresh происходит одновременное обращение к строкам длиной 8 Кбит в каждом из банков памяти, и данные из всех ячеек в этих строках считываются и записываются обратно.

Для того чтобы все ячейки памяти вовремя обновлялись, обращение к каждой строке должно производиться с заданным интервалом времени. Поскольку в процессе обычной работы компьютера такая регулярная адресация никогда не происходит, обновление памяти осуществляется с помощью специальной команды. Для асинхронных DRAM это команда CAS before RAS (CBR), а для SDRAM — Auto Refresh. В процессе выполнения этой команды адреса строк не поступают извне, а генерируются встроенной логической схемой на основе счётчика. Имеется также команда Self Refresh (иногда она называется Sleep Mode), вызов которой переводит DRAM в режим непрерывного, полностью автономного обновления памяти.

Устройством, определяющим, когда и каким способом будет осуществляться обновление DRAM, обычно является процессор. Существует два стандартных подхода к

решению этой проблемы: так называемое пакетное обновление (Burst Refresh), когда все строки памяти адресуются последовательно в одной команде, и распределённое (Distributed/Steal) обновление, которое осуществляется посредством выполнения одной или нескольких команд (циклов) обновления отдельных строк. В последнем случае временной интервал между циклами должен быть выбран так, чтобы все строки успели обновиться за время, не превышающее максимальное время обновления (указанное в спецификации на микросхему DRAM).

Поскольку обращение ко всем входящим в строку ячейкам памяти производится одновременно, это заметно увеличивает общее энергопотребление микросхемы. Сократить ток потребления можно путём уменьшения количества ячеек, выбор которых производится в один и тот же момент времени. Для этого надо изменить соотношение строк и столбцов в матрице, т.е. увеличить число ячеек (длину строки) и уменьшить число ячеек (высоту столбца). Конечно, в случае использования отдельной команды обновления ток потребления, как, например, при выполнении 4096 циклов обновления 1024 ячеек, так и при выполнении 2048 циклов обновления 2048 ячеек, будет одинаковым. Однако следует учесть, что в каждом цикле обращения к памяти для чтения или записи производится обновление количества ячеек, соответствующего длине строки. Поэтому очевидно, что при обращении к 2048 ячейкам в каждом цикле чтения/записи будет потребляться в два раза больший ток, чем при чтении/записи 1024 ячеек.

Вот почему в современных DRAM не используется симметричная адресация, а количество адресуемых строк всегда больше, чем количество столбцов. Такой подход требует некоторого увеличения числа адресных выводов микросхем DRAM, но этот недостаток компенсируется заметным снижением их энергопотребления. С целью использования DRAM в мобильных устройствах, работающих от аккумуляторов или батарей, предусмотрены дополнительные энергосберегающие функции. Снижение тока потребления достигается при этом за счёт использования специального алгоритма обновления данных в спящем режиме с учётом температуры внешней среды, сокра-

щения области автоматического обновления памяти в рабочем режиме, а также использования специальных схемотехнических решений, позволяющих, в случае необходимости, снижать рабочую частоту микросхем DRAM.

Обновление памяти по сигналу выбора строки (RAS)

Как уже отмечалось выше, для обновления данных во всех ячейках строки достаточно произвести обращение к этой строке (выполнить её адресацию). Это означает, что для обновления данных в ячейках достаточно лишь активировать соответствующую адресную линию строки, а затем выполнить команду Precharge. При этом нет никакой необходимости задавать адрес столбца. Единственное, в чём следует быть уверенным, так это в том, что адрес следующей строки, для которой предполагается проводить обновление данных, задан корректно. Контроль за этим возлагается на процессор или же на специальный контроллер обновления памяти.

Самообновление

Обычно все временные параметры цикла обновления памяти определяются внешней схемой. В противоположность этому, в режиме автоматического обновления или самообновления корректный интервал между командами Auto Refresh задаётся внутренним таймером микросхемы DRAM, а процесс обновления не требует использования внешних команд или адресации. Перевод микросхемы памяти из рабочего режима в режим самообновления осуществляется по команде Self Refresh, а выход из него — только по команде Self Refresh Exit. Поскольку микросхема памяти в режиме самообновления находится в состоянии, напоминающем спящий режим, обозначение последнего (Sleep Mode) часто используется, когда речь идёт о самообновлении. При этом микросхема переходит в режим минимального энергопотребления, а данные, записанные в ячейках памяти, гарантированно сохраняются. Однако первой же командой, которую необходимо выполнить после вывода микросхемы памяти из режима Sleep Mode, должна быть команда полного обновления данных (Burst Refresh), поскольку пользователю неизвестно, за какое в точности время

до выхода из этого режима обновление памяти проводилось в последний раз.

Характеристики внутреннего таймера, управляющего процессом обновления данных, как и характеристики всех других элементов микросхемы DRAM, могут несколько изменяться вследствие технологических разбросов. Задать корректное значение интервала обновления можно с помощью специальной схемы коррекции; методика такой коррекции аналогична используемой при подключении резервных ячеек памяти.

Некоторые проблемы, связанные с процессом обновления данных в DRAM

Термин «обновление данных» относится к процедуре и механизму обновления информации, записанной в ячейках памяти. Соответственно, время обновления — это временной интервал между записью данных в ячейку памяти и последующим их считыванием; в случае превышения указанного интервала возникают ошибки, связанные с потерей хранящейся в ячейке информации. Это время также называется временем хранения данных.

Поскольку главная задача микросхемы DRAM состоит именно в хранении данных, значение такого её параметра, как время хранения данных, играет чрезвычайно важную роль. Оно зависит от разных факторов и может быть различным для различных ячеек. Применительно к массиву ячеек памяти это значение является великолепным «индикатором» качества технологического процесса. Действительно качественный и отлаженный технологический процесс обеспечивает максимально высокое (и практически одинаковое для всех ячеек памяти) время хранения данных.

Одна из основных проблем состоит в том, что любая купленная потребителем микросхема, несмотря на существование большого количества взаимонезависимых факторов, влияющих на ее функционирование, должна обеспечивать гарантированное минимальное время хранения данных при любых условиях. Выполнение этого требования должно подтверждаться соответствующими тестами. Однако создавать тесты, имитирующие все возможные условия работы микросхемы, очень сложно. Кроме того, время тестирования не должно превышать разумные пределы.

Поэтому приходится применять тесты, которые не моделируют поведение микросхемы во всех возможных условиях, а направлены на обнаружение физических дефектов ячеек памяти и соседствующих с ними элементов. Всё это влечёт за собой необходимость разработки специализированного набора тестов для каждой архитектуры микросхем памяти и для каждой из технологий их производства.

Если взять за основу подход, связанный с исследованием всех возможных механизмов неисправностей, то процесс обнаружения дефектных ячеек и их исправления может быть осуществлён за вполне приемлемое время. Такой подход более предпочтителен, поскольку обеспечивает стабильность процента выхода годной продукции и позволяет избежать нареканий со стороны потребителей.

При оценке времени обновления памяти, его следует рассматривать с двух точек зрения. Во-первых, важную роль играет внутреннее время обновления. Для исправных ячеек памяти время хранения данных, лимитированное значением внутреннего времени обновления, зависит только от физических характеристик ячеек памяти и технологии их производства. Внутреннее время обновления в основном определяется имеющим чётко выраженную температурную зависимость процессом рекомбинации зарядов в полупроводнике.

Помимо использованной технологии, время хранения также зависит и от типа данных, хранящихся в ячейках памяти. Дело в том, что основные потери данных связаны с утечками, которые происходят через ближайшее окружение ячейки памяти. Конденсатор ячейки, при условии, что его вторая обкладка имеет потенциал земли, может находиться в одном из двух состояний: заряжен или не заряжен (что соответствует логической 1 или логическому 0). Если в одном из этих состояний разность потенциалов с соседними ячейками равна нулю, то очевидно, что никакого «перетекания» заряда происходить не будет. Таким образом, ячейки памяти, в которые записаны логические данные (биты), соответствующие малому значению разности потенциалов с соседними ячейками, будут характеризоваться большим временем хранения, чем ячейки, заряд которых сильнее отличается от заряда соседних ячеек.

Казалось бы, внутреннее время обновления — настолько важный параметр, что именно его значение необходимо знать с предельной точностью, чтобы гарантировать соответствие времени хранения данных техническим условиям. Это не совсем так. Для практической работы с микросхемами DRAM куда важнее знать времена обновления (хранения) данных, относящиеся ко второй категории. Например, это время хранения данных, которое характеризует ошибки в технологическом процессе и которое гораздо меньше внутреннего времени обновления. Более того, вследствие сложности технологического процесса производства микросхем DRAM считается нормальным, что различные ячейки характеризуются некоторым разбросом максимального времени хранения данных. Процент выхода годной продукции является функцией от величины этого разброса. Поскольку на практике при производстве микросхем памяти просто невозможно создавать полуфабрикаты, в которых совершенно отсутствуют дефектные элементы, важной задачей является оценка предельно допустимого процента дефектных элементов на исходной полупроводниковой пластине.

При температуре кристалла $+85^{\circ}\text{C}$ значение максимально возможного внутреннего времени обновления достигает нескольких секунд. Однако согласно спецификации микросхем DRAM время хранения данных составляет 64 мс. При анализе документации следует понимать, что микросхема, успешно прошедшая тест и показавшая время хранения данных 64 мс (или даже 128 мс), вовсе не обязательно имеет кристалл хорошего качества. Действительно, высококачественные ячейки памяти характеризуются временем обновления в несколько секунд, если же ячейка обеспечивает время обновления, едва соответствующее спецификации, она должна рассматриваться как неисправная и почти наверняка создаст проблемы в процессе эксплуатации. В такой ситуации разумно предположить, что ячейка содержит какой-то дефект, который в процессе эксплуатации микросхемы памяти приведёт к её преждевременному выходу из строя. При выработке решения о том, какие ячейки следует отнести к годным, а какие — к неисправным, определяющим является баланс между финансовыми

затратами и необходимостью выпуска качественной продукции. Реальные критерии такого выбора могут быть определены только экспериментально, с учетом физических механизмов, ограничивающих срок эксплуатации микросхемы. При этом необходимо различать неисправности, имеющие постоянный характер в течение всего срока службы, и те отказы, которые проявляются со временем.

Как правило, вероятность возникновения неисправностей повышается в тех случаях, когда электрический потенциал ячейки памяти отличается от потенциала окружающей среды. Последняя, помимо подложки, включает в себя коммутирующий транзистор и адресные линии (шины) строк и столбцов, проходящие поверх ячеек или в непосредственной близости от них. В случае, когда речь идёт об адресных линиях строк и столбцов, такое влияние может иметь периодический характер и зависеть от изменения их электрического потенциала во времени. Например, при использовании неудачного алгоритма адресации микросхемы DRAM потенциал некоторых адресных линий строки может в течение длительного времени поддерживаться на таком уровне, что это приведёт к потере данных в некоторых ячейках (чего не произошло бы в случае использования более продуманного алгоритма работы с памятью). Итак, поскольку невозможно предсказать, как именно будет происходить адресация ячеек памяти в процессе практического применения микросхем DRAM, их производителям необходимо обеспечивать работоспособность своей продукции даже при сочетании самых неблагоприятных условий эксплуатации.

В целом, существует множество потенциальных путей утечек заряда из ячейки памяти в окружающую среду, каждый из которых проявляется в тех или иных специфических условиях. Задача проектировщика микросхем DRAM состоит в исследовании механизмов, инициирующих эти утечки, и в разработке соответствующего набора тестов, использование которых позволит «запустить» эти механизмы на начальном этапе производства микросхемы и за короткое время выявить потенциально дефектные ячейки. При наличии на кристалле ИС ещё неизрасходованных резервных (избыточных) ячеек вовремя обнару-

женные потенциально дефектные ячейки могут быть заменены на исправные. Хотя возможность такого ремонта ограничена, её следует использовать в полной мере.

Частота случайных ошибок (сбоев)

Данные, хранящиеся в ячейке памяти, подвержены влиянию не только электрических и физических процессов, локализованных внутри самой микросхемы. Другим источником ошибок в работе ОЗУ являются случайные сбои (потери данных) в ячейках памяти под воздействием альфа-частиц. Альфа-частицы присутствуют в материале, из которого изготовлен корпус микросхемы памяти, вследствие его неизбежного радиоактивного загрязнения, например ураном 238. Они проникают через поверхность полупроводникового кристалла и создают в нём более или менее длинный след из ионизированных молекул. Длина таких следов, как правило, не превышает нескольких микрон, но этого достаточно для создания или нейтрализации зарядов в ближайших ячейках памяти, как и для того, чтобы исказить значение напряжения на входе усилителя считывания данных столбца. Эти ошибки называются случайными сбоями, поскольку они генерируются случайным образом и, как правило, не повторяются. Сбои, вызываемые пролётом альфа-частиц, не приводят к постоянным дефектам ячеек памяти. В следующий раз, при записи новых данных в эти же ячейки, они будут работать совершенно корректно. Однако даже такие, возникающие время от времени ошибки могут в некоторых условиях вызывать существенную потерю данных в компьютерной системе.

Поскольку абсолютно чистых материалов, пригодных для изготовления корпусов микросхем, попросту не существует, всегда следует принимать в расчёт определённую вероятность возникновения случайных сбоев (Soft Error Rate — SER). Единицей измерения частоты случайных сбоев является FIT (Failure In Time — количество ошибок в единицу времени). Один FIT соответствует одной ошибке на $1 \cdot 10^9$ часов работы изделия. Пользователь вправе ожидать, что для любой из купленных им микросхем частота случайных сбоев не превысит максимально допустимое для микросхем DRAM значение, которое, как правило, составляет 500 FIT.

Чувствительность микросхем DRAM к такого рода сбоям зависит, в основном, от топологии ячеек памяти и ёмкости конденсатора ячейки. То есть, физическая форма ячейки определяет большую или меньшую вероятность утечки заряда при пролёте альфа-частицы.

Так или иначе, значение параметра SER для каждой микросхемы должно быть измерено. Существуют два основных метода его определения. Более точный, но одновременно и более дорогой, — это метод полевых испытаний. Он заключается в том, что тысячи микросхем работают одновременно в течение многих часов, при этом фиксируется реальное значение SER. Для того чтобы получить как можно более точные данные, требуется большое количество микросхем и длительное время испытаний.

Второй метод — метод ускоренных испытаний с использованием радиоактивных материалов, или ASER (Accelerated Soft Error Rate). При выполнении данного теста непосредственно над массивом ячеек памяти устанавливается радиоактивный зонд. Используя калиброванный уровень излучения радиоактивного пробника и соответствующую методику пересчёта, можно оценить реальное значение SER. Однако такой пересчёт необходимо производить очень аккуратно. Существуют различные, часто весьма сложные методики расчётов реального значения SER. В любом случае, весьма полезно после проведения подобной оценки сравнить её результаты с реально измеренным значением.

Внешний интерфейс (входы и выходы)

Параметры интерфейса для связи микросхем DRAM с внешними устройствами, как правило, с максимальной степенью точности задаются в спецификациях ИС. Это делается не из абстрактной любви к научному прогрессу, а затем, чтобы обеспечить как можно более высокий уровень преэмптентности (различных поколений микросхем и модулей) и совместимости (изделий различных производителей).

Наличие «жёстких» технических стандартов накладывает определённые ограничения на производителей микросхем, но даже если только один из конкурирующих производителей способен выпускать продукцию, соответствующую требованиям этих стандартов, у остальных не остается

иного выбора, кроме как принять их. Кроме того, потребители желают иметь твёрдую гарантию того, что характеристики купленной ими продукции соответствуют приведённым в её спецификации, а некоторые потребители в своих требованиях идут ещё дальше.

6.2.8. Разработка и производство микросхем DRAM

Основными этапами разработки и производства микросхем DRAM являются:

- Фундаментальные исследования технологических процессов с целью определения минимально возможных размеров структурных элементов, определения типа ячейки и общей архитектуры микросхем памяти.
- Проектирование схемы на уровне функциональных блоков и её тестирование, в том числе с помощью компьютерного моделирования.
- Разводка внутренних соединений; сравнение (верификация) полученных результатов с функциональной схемой, полученной на предыдущем этапе.
- Расчёт индивидуальных масок (шаблонов) и их изготовление.
- Обработка кремниевых полупроводниковых пластин и получение полуфабрикатов кристаллов (чипов).
- Тестирование и замена дефектных ячеек на исправные из числа резервных ячеек на кристалле.
- Корпусирование (размещение кристалла в корпусе).
- Тестирование готовых микросхем.
- Термотренировка.
- Финальные испытания и классификация готовой продукции по скорости работы.
- Продажа.
- Анализ отказов микросхем на основе информации, полученной от пользователя.
- На всех этапах, следующих за созданием первых работоспособных полупроводниковых пластин, проводится аналитическая оценка качества продукции, по результатам которой вносятся оперативные изменения в технологический процесс, а также в разработку и разводку схемы (первые 3 этапа).
- Данный цикл неоднократно повторяется в течение производства одного поколения DRAM с тем, чтобы в итоге полу-

чить как можно более быстродействующую, надёжную и миниатюрную микросхему.

Разработка и компьютерное моделирование схемы

Проектирование электрической схемы, на основе которой планируется изготовление микросхем, проводится на рабочих станциях с помощью программных пакетов CAD. При этом сначала на экране компьютерного дисплея рисуется схема ИС в графическом виде с использованием стандартных символов электронных элементов. На её основе создаётся список соединений, который представляет собой точное описание схемы: все входящие в неё элементы и их связи между собой. Этот список может быть проанализирован на предмет наличия ошибок, после чего он используется как исходный при проведении компьютерного моделирования работы микросхемы. При проверке списка соединений могут быть обнаружены, естественно, лишь синтаксические ошибки, т.е. ошибки, связанные с нарушением общих правил построения электрических схем. Сюда относятся, например, такие ошибки, как подключение четырёх сигнальных линий к элементу, который имеет только три входа/выхода, или не соответствующее правилам наименование цепей и элементов. Напротив, семантические (концептуальные) ошибки при таком анализе обнаружены не будут. Так, концептуальной является ошибка, когда на выходе того или иного функционального узла схемы из-за отсутствия, например, инвертора будет установлен сигнал неправильного уровня. Подобную ошибку можно обнаружить лишь вручную, поскольку о том, какой сигнал (инвертированный или неинвертированный) должен присутствовать на выходе, знает, как правило, только разработчик схемы.

Для того чтобы выявить эти семантические ошибки, проводят моделирование системы как с помощью программы, которая анализирует логику работы схемы (логическое моделирование), так и с использованием программы, создающей временные диаграммы изменения сигналов для каждого отдельного транзистора и всей схемы в целом (аналоговое моделирование).

«TITAN» — одна из подобных программ, которая представляет собой разновидность

широко распространенного аналогового симулятора SPICE. С помощью данной программы может быть точно промоделировано поведение схемы во времени. Предварительным условием для этого является наличие параметрических моделей элементов, соответствующих используемой технологии. Если точность этих параметрических моделей соответствует требованиям, то предполагаемое поведение схемы также может быть описано с достаточной точностью. Хотя DRAM работает, в основном, в цифровом режиме, использование аналогового моделирования неизбежно, поскольку обычные логические симуляторы могут отображать лишь статические изменения логического состояния схемы, происходящие при изменениях логических уровней сигналов. Никакие динамические параметры (например, сколько времени требуется для изменения уровня сигнала из 1 в 0, которое не равно нулю вследствие того, что коммутирующий транзистор тем или иным образом взаимодействует с коммутируемой им нагрузкой) логический симулятор не определяет. Между тем, без точной оценки аналоговых характеристик переключения используемых в DRAM коммутирующих транзисторов нельзя добиться максимальной, насколько это возможно с точки зрения электроники, скорости работы микросхемы и при этом сделать размеры транзисторов как можно меньше, чтобы сократить пространство, занимаемое ими на кристалле. Кроме того, аналоговое моделирование — это единственный путь к получению корректной информации о влиянии внешних факторов, например изменения температуры, на характеристики разрабатываемой схемы.

Размещение/разводка соединений/верификация

Полученная в результате CAD-проектирования электрическая схема, все компоненты которой представлены в символическом виде, должна быть преобразована к виду, соответствующему реальным физическим характеристикам используемых компонентов. Первый шаг на пути к этому — создание для каждого отдельного компонента его графического изображения (примитива) в соответствии с определёнными правилами. Так, транзистор рисуется в точности со всеми его элементами: диффузионными зонами, областью затвора, электродами, служащими для подключения к

внешним цепям, и т.д. Поскольку размеры микросхем DRAM всегда крайне ограничены, использование любых дополнительных транзисторов при их разработке должно быть сведено к минимуму (в этом состоит одно из их отличий от схемотехники микросхем предыдущих поколений, когда наличие одного-другого «лишнего» транзистора не составляло особой проблемы).

Так же как на основе принципиальной схемы может быть сгенерирован список соединений, так и на основе схемы разводки и внутренних соединений генерируется список, предназначенный для последующего анализа на соответствие технологическим правилам. Оба этих списка сравниваются друг с другом; выявленные различия устраняются, чтобы разводка соединений в кристалле соответствовала принципиальной схеме, задуманной разработчиком.

Помимо этой проверки, схема разводки соединений должна быть протестирована на соответствие технологическим правилам. Например, необходимо определить минимальное расстояние до металлических проводников, а также размеры контактных отверстий или размеры диффузионных зон у транзисторов. Существует немало правил, которым должна соответствовать разводка кристалла, поскольку используемый при производстве микросхем технологический процесс всегда рассчитан на изготовление полупроводниковых структур не произвольного, а строго определённого вида.

Технологический процесс

Технологический процесс представляет собой конкретную последовательность действий при производстве кристалла микросхемы. При его реализации заготовка — пластина из чистого кремния — проходя через множество технологических этапов, таких как экспозиция, травление, шлифовка, нанесение покрытия, ионная имплантация, окисление и т.д., превращается в готовый чип.

Сборка

После того как кремниевая заготовка успешно прошла все стадии технологического процесса, и на ней были отобраны чипы, квалифицированные как годные, заготовка распиливается при помощи специальной пилы с алмазным напылением. Если предполагается использовать наиболее распро-

страненный в настоящее время корпус TSOP, то отсортированные годные кристаллы размещаются на выводной рамке и закрепляются на ней при помощи фольги по так называемой технологии LOC (Lead On Chip) (см. **Рис. 6.11**). Затем контактные площадки, расположенные на поверхности кристалла, и выводы рамки соединяются золотыми проволочками. После этого вся конструкция заливается пластиком. Выводная рамка отсоединяется от вспомогательных опор, на которых она размещалась в процессе монтажа чипа, корпус очищается от излишков пластика, и в нём формируются выводы. В отличие от «классической» технологии сборки, когда контактные площадки расположены на кромке чипа и соединительные проводники к выводам рамки имеют достаточно большую длину, технология LOC позволяет сделать эти соединения более короткими (см. **Рис. 6.11** и **Рис. 6.12**).

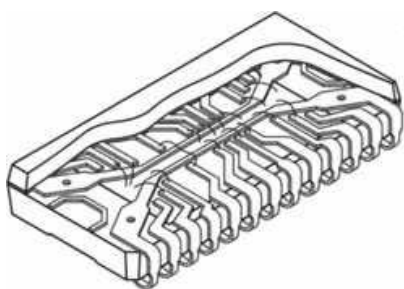


Рис. 6.11. Технология LOC (Lead on Chip) сборки микросхем DRAM.

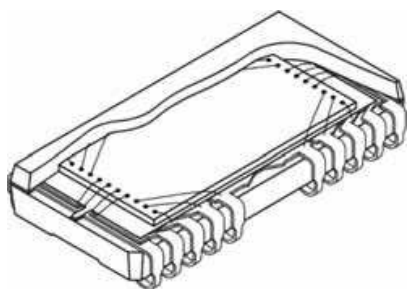


Рис. 6.12. Стандартная технология сборки микросхем DRAM.

6.2.9. Контроль качества

Служба контроля качества отвечает не только за работоспособность микросхем, поставленных потребителям, но и за то, чтобы их характеристики не ухудшались в процессе эксплуатации и, тем более, микросхемы не выходили из строя. Для реше-

ния этой задачи необходимо тщательно изучать условия эксплуатации выпускаемой продукции. Подвергая микросхему воздействию внешних факторов, превышающих допустимый уровень, можно определить, каким образом она может выйти из строя. Например, воздействие повышенных напряжения питания и температуры влечёт за собой ускорение деструктивных процессов, в итоге приводящих к неисправности микросхемы. Поскольку в нормальных условиях нельзя проверить, соответствует ли реальный срок службы микросхемы заявленному в спецификации на неё сроку в 10 лет, в процессе ускоренных испытаний для сокращения срока службы используются внешние воздействия, превышающие допустимый уровень. Это даёт возможность, проводя испытания микросхемы в течение всего лишь нескольких дней, с приемлемой достоверностью оценить, будет ли она в действительности сохранять работоспособность в течение десяти лет.

Проверка серийной продукции

Все выпускаемые микросхемы DRAM подвергаются различным видам испытаний. Первый из них проводится ещё на этапе, когда чипы не отделены от общей полупроводниковой пластины (заготовки), и имеет задачу определить, какие из изготовленных кристаллов исправны и могут быть использованы в дальнейшей работе, а какие требуют ремонта, и какого именно. После установки кристаллов в корпус уже смонтированные микросхемы тестируются вновь. Это делается для того, чтобы выявить неисправности, возникшие в процессе корпусирования, и убедиться, что проведённые восстановительные операции позволили вернуть работоспособность кристаллам, дефекты которых были выявлены на предыдущем этапе. Работоспособные микросхемы в течение нескольких часов подвергаются так называемому отжигу (термотренировке), т.е. находятся под воздействием повышенной температуры и повышенного напряжения питания. После этого пришедшие в негодность микросхемы выявляются путём повторного тестирования и исключаются из дальнейшего технологического процесса, а с микросхемами, прошедшими это испытание, проводится последняя серия тестов для того, чтобы классифицировать их по скорости работы.

Программа такого тестирования может меняться с появлением каждого нового поколения микросхем DRAM, чтобы соответствовать новым рабочим характеристикам (и/или рабочим режимам). Результаты анализа схемных решений и контроля качества также могут дать повод для изменения программы испытаний. Каждое схемное решение или технология создания полупроводниковых элементов имеют свои слабые места, которые должны быть обнаружены, изучены и устранены. В результате, несмотря на то, что различные поколения DRAM имеют близкие характеристики, программа испытаний для каждого из них достаточно индивидуальна.

Схемные решения и анализ неисправностей

В отличие от технологии испытаний серийной продукции, при которых тестирующие автоматы измеряют параметры тысяч микросхем, при анализе схемных ошибок или неисправностей каждая микросхема рассматривается как нечто индивидуальное. Анализ схемных решений подразумевает как исследование работы микросхемы в целом, так и изучение работы её составных частей. Такое исследование возможно благодаря использованию микрозондов (подобный зонд представляет собой очень острую иглу), с помощью которых сигналы могут быть измерены прямо на алюминиевых проводящих дорожках субмикронной ширины внутри кристалла микросхемы (Рис. 6.13). Микрозонды и микроманипуляторы, с помощью которых они управля-

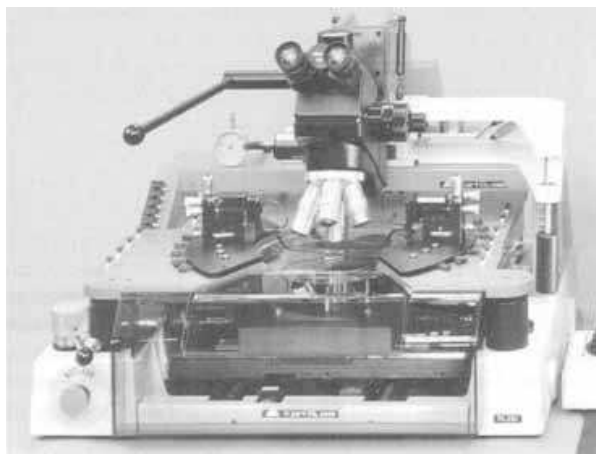


Рис. 6.13. Измерительная станция с микрозондами и микроманипуляторами.

ются, вместе составляют измерительную станцию. С помощью микроскопа зонд такой измерительной станции можно подключить к любой точке кристалла, что даёт возможность измерять временные характеристики внутренних сигналов. Кроме того, с помощью такой установки можно определить пределы, в которых микросхема сохраняет работоспособность, и, в том случае, когда обнаруживается сбой, выяснить, в каком именно месте сигнал обрабатывается некорректно.

Для того чтобы использовать микрозонды для измерений внутри кристалла, следует обеспечить возможность подключения к требуемой дорожке. Обычно внутренняя схема кристалла защищена слоями полиамида, оксида и нитрида кремния, поэтому необходимо либо не создавать эти слои в процессе изготовления микросхемы, либо удалить их впоследствии химическим методом.

Процесс поиска и анализа неисправностей, как правило, начинается с тестирования серийной продукции на отказ и с попыток найти причины обнаруженных отказов. На этом этапе анализ неисправностей и анализ схемотехнических решений производятся одновременно, потому что одной из причин возникновения того или иного дефекта может быть схемотехническая ошибка. Во всех остальных случаях основное внимание при анализе неисправностей обращается на возможные погрешности в технологии производства.

Анализ схемотехнических решений производится довольно просто. Искусственно создаются условия для возникновения ошибок, и исследуется прохождение сигналов внутри микросхемы в данных условиях. При этом, по большому счёту, неважно, работоспособна ли микросхема в целом или нет. Вполне достаточно функционирования отдельных её блоков. Если же речь идёт об анализе неисправностей микросхемы в целом, обычно нет возможности проконтролировать качество её внутренних сигналов. В этом случае необходимо поместить микросхему в такие условия, когда её внутренние неисправности проявятся в виде ошибочных данных на её выходах. Если микросхема уже смонтирована в корпусе, единственное, что можно сделать для обнаружения внутренних неисправностей, — это проконтролировать соответствие информа-

ции, считываемой из ячейки памяти, той информации, которая была в неё записана ранее. Дефекты микросхемы памяти, которые не приводят к искажению хранимой информации, обнаружить при помощи указанных методов тестирования очень трудно, однако если имеется возможность проводить измерения внутри кристалла микросхемы и наблюдать взаимодействие отдельных её внутренних сигналов, то можно легко определить причину неисправностей.

6.3. Совершенствование микросхем DRAM с точки зрения их быстродействия

EDO DRAM и работающая в синхронном режиме SDRAM являются примером того, как путём использования улучшенных схемотехнических и технологических решений можно достигнуть высокой скорости передачи данных при доступе к памяти. Однако практический опыт применения микросхем памяти говорит о том, что всегда проходит некоторое время, прежде чем контроллеры памяти оказываются способны в полной мере использовать новые возможности.

Приблизительно до 1998 года режим быстрого постраничного доступа (Fast Page Mode — FPM) DRAM был единственным стандартным режимом работы для динамической памяти. На **Рис. 6.14** приведены временные диаграммы основных управляющих сигналов (RAS, CAS) и состояния адресных линий для этого режима. Первым по спадающему фронту сигнала RAS активируется адрес строки, а затем по спадающему фронту сигнала CAS активируется адрес столбца. По истечении времени t_{RAC} (или t_{CAC}) на выходе модуля памяти появляется первый бит данных. Обозначения t_{RAC} и t_{CAC} соответствуют временам выборки для сигналов RAS и CAS, измеряющимся от спадающего фронта сигнала RAS или CAS соответственно, до появления на выходе первого бита данных. Когда сигнал CAS становится неактивным и начинается новый цикл доступа к открытой странице памяти, выход данных в модуле FPM переводится в так называемое третье (высокоимпедансное) состояние.

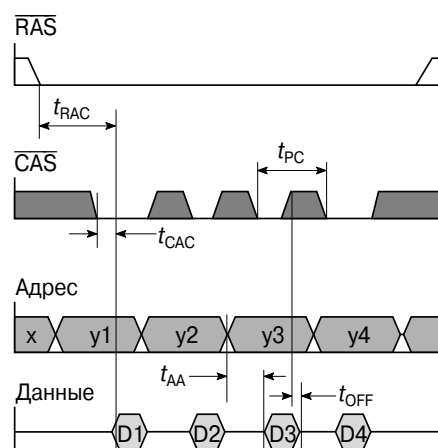


Рис. 6.14. При использовании режима быстрого постраничного доступа в период неактивности сигнала CAS выходы данных переходят в высокоимпедансное состояние.

6.3.1. EDO DRAM с повышенной скоростью доступа к памяти

В 1995 году на рынке появились микросхемы EDO DRAM (Extended Data Out DRAM), реализующие расширенный (во времени) вывод данных. При сохранении совместимости с архитектурой FPM как по организации доступа к памяти, так и по используемым корпусам, они обеспечивают повышенную скорость передачи данных.

С технической точки зрения, достоинством EDO DRAM является меньшая, по сравнению с предыдущими поколениями DRAM, длительность цикла t_{PC} в режиме постраничной выборки. Основное отличие от FPM DRAM заключается в том, что данные присутствуют на выходах, даже когда сигнал CAS не активен (**Рис. 6.15**). Благодаря этому время выбора страницы сокращается на один цикл тактового сигнала, что позволяет достичь большей скорости работы всей системы.

Таким образом, за счёт совершенствования схемотехники время цикла CAS с 35 нс для микросхемы с архитектурой FPM (с полным временем доступа 50 нс) сократилось до 20 нс для микросхемы с архитектурой EDO, что увеличило скорость передачи данных на 75%. Однако при этом не уменьшились времена выборки t_{RAC} (t_{CAC}), соответствующие первому обращению к модулю памяти. Значения этих временных параметров остались такими же, как и у памяти с архитектурой FPM.

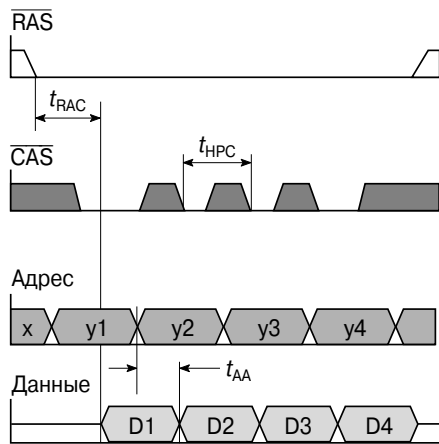


Рис. 6.15. В микросхемах EDO DRAM данные остаются на выходах даже тогда, когда сигнал CAS становится неактивным.

Большинство процессоров считывают данные из памяти в 4-битном пакетном режиме. Оптимальный режим передачи данных между процессором и модулем памяти достигается в том случае, когда процесс записи или чтения данных занимает не более одного цикла тактового сигнала. Но ни для микросхем, построенных по архитектуре FPM, ни для микросхем архитектуры EDO это невозможно, поскольку в обоих случаях увеличение разрядности шины данных на один бит требует добавления новой адресной линии. А это означает добавление одного или более циклов ожидания между тактовыми импульсами.

Предположим, что данные, которые необходимо считать из модуля памяти, находятся на странице, которая уже была открыта. Тогда для чтения 4-битного пакета при условии, что память работает с тактовым сигналом частотой 66 МГц, потребуются 5/3/3/3 циклов (для памяти с архитектурой FPM) или 5/2/2/2 циклов (для памяти EDO). В обоих случаях первая цифра относится к количеству тактов ожидания до доступности первого бита, остальные цифры — количество тактов ожидания для последующих битов.

6.3.2. Синхронная DRAM

Синхронная DRAM (SDRAM) представляет собой усовершенствованную архитектуру, в соответствии с которой работа модуля памяти осуществляется в синхронном режиме с управлением по шине процессора. Это повышает скорость работы и снижает стоимость разработки всей системы в целом.

В модуле SDRAM все входные и выходные сигналы синхронизируются тактовыми импульсами, поступающими по внешней системной шине; считывание сигналов управления осуществляется по нарастающему фронту тактовых импульсов. При использовании такого подхода стало возможным записывать и считывать данные по каждому тактовому импульсу. При этом данные появляются на соответствующих выходах с 10-нс интервалом (при частоте системной шины 100 МГц). Необходимо лишь задать стартовый адрес для считываемого пакета данных; адреса последующих битов в пакете указывать не надо. К сожалению, для модулей SDRAM время считывания первого бита остаётся таким же, как и для модулей FPM и EDO (Рис. 6.16). Это означает, что даже в самом благоприятном случае для 4-битного пакета данных мы будем иметь последовательность циклов считывания 5/1/1/1. Впрочем, уже это позволяет заполнять «быструю» (SRAM) кэш-память микросхемы SDRAM без использования дополнительных тактов ожидания.

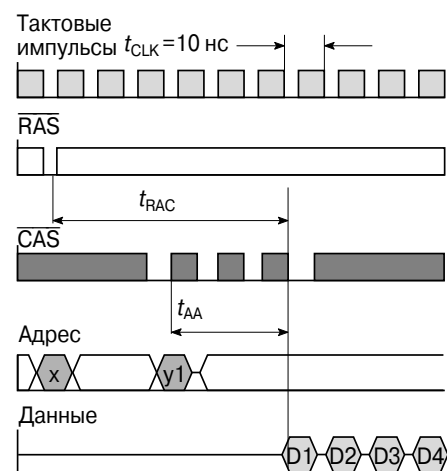


Рис. 6.16. При работе SDRAM данные появляются на соответствующих выходах с интервалом в 10 нс.

Одна из особенностей применения SDRAM состоит в том, что длина считываемого пакета данных, как и время задержки до появления на выходе микросхемы первого бита данных (так называемая латентность ОЗУ) могут быть запрограммированы с использованием специально предназначенной для этого команды; таким образом, модуль памяти всегда может быть задействован наиболее оптимальным обра-

зом. Кроме того, SDRAM содержит два или более независимых банка данных, обращение к которым может производиться одновременно. Биты данных, поступающие с выходов различных банков, могут накладываться (по времени) друг на друга, что практически сводит к нулю эффективное время предзаряда при обновлении DRAM и длительность цикла ожидания при первом обращении к памяти. Таким образом, обеспечивается возможность работы с непрерывным потоком данных при осуществлении операций чтения и записи на частоте 133 МГц.

6.3.3. Микросхемы памяти с удвоенной скоростью передачи данных

При работе микросхем памяти с внешним интерфейсом, соответствующим стандарту низковольтной TTL-логики (LVTTL), на частотах выше 150 МГц уровень их энергопотребления, связанный с выполнением операций ввода/вывода данных, возрастает настолько, что оказывается сопоставимым с уровнем энергопотребления устройств стандарта SSTL (сверхбыстродействующей TTL-логики). Для более высоких частот использование интерфейсов LVTTL становится ещё более невыгодным не только с точки зрения повышенного энергопотребления, но и вследствие искажения формы сигнала. Поэтому модули памяти с интерфейсом SSTL всегда пользовались спросом и предлагались к продаже как для SDRAM первых поколений, так и в настоящее время. Однако необходимо заметить, что современные материнские платы рассчитаны на поддержку только SDRAM-памяти с интерфейсом LVTTL.

Необходимость реализации систем со скоростью передачи 200 Мбит/с и более на один вывод шины данных потребовала новых оптимизированных решений, в том числе связанных с изменением интерфейсных протоколов ввода/вывода. Для того чтобы достичь указанной высокой скорости обмена, было решено, что поддерживать её необходимо только при передаче данных, но не при передаче команд и адресов. Так появились микросхемы SDRAM с удвоенной скоростью передачи данных (Double Data Rate — DDR). Их архитектура такова, что чтение и запись слов данных осуществляется как по нарастающему, так и по спа-

дающему фронту тактового сигнала. Тактовая частота может быть снижена до комфортных 100 МГц; при этом скорость передачи данных будет эквивалентна SDRAM, работающей на частоте 166 МГц.

К тому моменту, когда в 2004 году на рынке появились микросхемы SDRAM нового стандарта DDR2 (соответственно, микросхемы первого поколения начали называть DDR1), в системах с тактовой частотой 200 МГц были достигнуты предельные значения скорости передачи данных, соответствующие 400 Мбит/с на один вывод. Таким образом, по сравнению с обычными SDRAM, микросхемы DDR SDRAM обеспечивают значительное повышение производительности системы при сохранении многих положительных характеристик SDRAM. Такой эволюционный подход к улучшению параметров продукции особенно хорош с точки зрения её массового производства.

6.3.4. Стандартизированные модули памяти для ПК

В настоящее время при использовании микросхем памяти принято не запаивать их непосредственно в системную плату компьютера, а вставлять в специальные разъёмы на системной плате, предназначенные для установки так называемых модулей памяти. Таким образом, пользователь имеет возможность без проблем наращивать объём памяти ПК при его модернизации. Классификация модулей памяти для ПК (Рис. 6.17) включает в себя несколько стандартизированных семейств этих устройств, которые, кроме того, различаются по объёму памяти.

Первыми появились модули памяти SIMM (Single In-line Memory Module), которые были разработаны под 72-контактный плоский разъём с однорядным расположением выводов и поддерживали как 32-битную шину данных без контроля чётности, так и 36-битную шину с контролем чётности. Напряжение питания этих модулей составляло 5 В. Данный стандарт был ориентирован на использование микросхем асинхронной динамической памяти, отвечающих спецификациям FPM или EDO.

Модули DIMM (Dual In-line Memory Module) с двухрядным расположением выводов являются развитием семейства

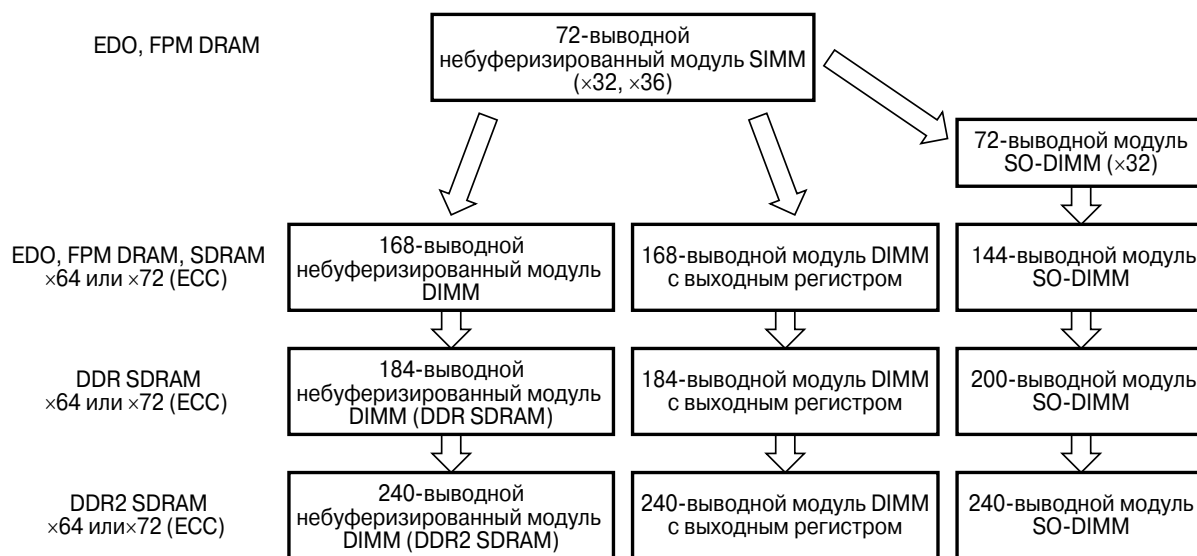


Рис. 6.17. Стандартизированные модули памяти, предназначенные для использования в ПК.

SIMM. Их можно рассматривать как два модуля SIMM, размещённых на одной печатной плате. Первые модули этого типа имели 168 выводов, по 84 вывода с каждой стороны печатной платы, и шину данных двойной, по сравнению с SIMM, ширины. При этом назначение выводов, расположенных с одной стороны печатной платы модуля, отличается от назначения выводов, расположенных с другой стороны, и выводы не являются взаимозаменяемыми. В составе этих модулей с напряжением питания 3.3 В использовались и асинхронные микросхемы DRAM, и синхронные SDRAM.

Существуют две разновидности модулей DIMM: буферизированные и небуферизированные. В состав буферизированных DIMM включён специальный буфер, через который поступает большинство входных сигналов. Наличие буфера позволяет снизить входную ёмкость модуля почти до 10 пФ, что имеет существенное значение в системах с большим количеством разъёмов DIMM (обычно подобные системы использовались в качестве серверов). Небуферизированные модули DIMM, как не трудно догадаться, буфера не имеют. Взамен этого, они предоставляют возможность использования в них микросхем FPM DRAM и EDO DRAM, а также микросхем синхронной памяти SDRAM.

Все перечисленные выше модули были разработаны под один и тот же тип разъёма, что означало их взаимозаменяемость (если это поддерживалось материнской платой); в ряде случаев они даже могли использовать-

ся совместно в смешанных наборах. Таким образом, производители ПК имели возможность обеспечить необходимую гибкость в комплектации своей продукции, даже на этапе её поставки потребителям. В небуферизированных модулях DIMM впервые была реализована функция SPD (Serial Presence Detect — обнаружение присутствия последовательности). В состав модуля памяти включается дополнительная энергонезависимая память EEPROM с интерфейсом последовательного доступа к данным, содержащая все сведения о модуле (объём памяти, её организация, электрические характеристики микросхем и т.п.). Эти данные могут быть считаны и обработаны процессором, что даёт возможность контроллеру памяти выбрать оптимальный режим работы с установленными на процессорную плату модулями DIMM. С появлением модулей, поддерживающих функцию SPD, стала возможной и практическая реализация оптимизированного режима plug&play.

Для КПК и ноутбуков выпускаются специальные малогабаритные модули SO-DIMM (Small Outline DIMM). В переносных компьютерах с 64-битной шиной данных используется семейство SO-DIMM с 144-контактным разъёмом. Модули этого семейства могут комплектоваться как микросхемами EDO DRAM, так и микросхемами SDRAM. Благодаря своим небольшим размерам (67.5 мм в длину и 25.4 мм в высоту), эти модули очень быстро нашли применение практически во всех моделях портативных компьютеров.

В составе модулей DIMM также могут использоваться и микросхемы DDR SDRAM. В этом случае количество выводов буферизированных и небуферизированных модулей равно 184, а модули SO-DIMM имеют 200 выводов. На **Рис. 6.18** показан модуль SO-DIMM с установленными в него микросхемами DDR-SDRAM, которые обеспечивают скорость передачи данных 266 Мбит/с и имеют общий объём памяти 512 Мбайт.

В модулях, предназначенных для размещения микросхем памяти следующего поколения (DDR2), количество выводов возросло до 200 для обычных модулей и до 240 для SO-DIMM. Это связано с увеличением количества сигналов (в первую очередь, сигналов стробирования данных), необходимых для обслуживания протоколов безопасной передачи данных.



Рис. 6.18. Модули SO-DIMM, применяющиеся в переносных компьютерах. На рисунке показан модуль, объём памяти которого составляет 512 Мбайт.

Более подробные сведения о рассмотренных выше приборах и модулях можно найти в доступных широкому кругу пользователей спецификациях микросхем производства компании Infineon.

7. МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ

7.1. Введение

Давным-давно, в семидесятые годы прошлого века, первые микропроцессоры, едва только появившись на рынке, сразу же нашли применение в системах автоматического управления. Конечно, они использовались совместно с дополнительными модулями, такими как микросхемы ОЗУ (RAM), микросхемы ПЗУ (ROM) и различные устройства ввода/вывода, включая интерфейсы UART или USART. Первоначально все эти компоненты размещались на общей печатной плате с микропроцессором, образуя в совокупности некий блок управления.

Дальнейшие попытки разработчиков разместить как можно большее количество этих периферийных компонентов на одном кристалле с процессором привели в итоге к созданию полнофункционального однокристалльного микроконтроллера. К концу 1970-х годов в массовом производстве находилось уже несколько типов таких восьмибитных устройств, снабжённых встроенным ОЗУ, контроллером последовательного интерфейса, таймерами и (опционально) ПЗУ. В 1980 году на рынок вышел микроконтроллер Intel 8051, который практически сразу же стал стандартом де-факто для 8-битных устройств. Он и в настоящее время продолжает выпускаться в самых различных модификациях (подробнее о них см. ниже в разделе 7.2).

Главной движущей силой в дальнейших разработках микроконтроллеров стало стремление обеспечить более высокую сложность и быстродействие при улучшенном соотношении цена/эффективность. В настоящее время для большинства высокопроизводительных систем стандартом является использование 16-битных микроконтроллеров, которые выпускаются во всём мире в огромных количествах (они подробно описаны в разделе 7.3). Ну, а в самых сложных областях применения существует всё более явная тенденция к использованию контроллеров с 32-битной шиной данных (подробнее о них см. в разделе 7.4).

7.2. Восьмибитные микроконтроллеры

7.2.1. Введение

Семейство 8-битных микроконтроллеров C500 производства компании Infineon с точки зрения архитектуры и программного обеспечения полностью совместимо со всеми стандартными микроконтроллерами семейства 8051. Наиболее полная совместимость «вверх» осуществляется с микроконтроллерами SAB 80C52/80C32. Будучи построенными на основе той же процессорной архитектуры, что и SAB 80C52/80C32, микроконтроллеры семейства C500 имеют более развитый набор встроенных периферийных устройств, наилучшим образом адаптированных к сфере их применения и отличающихся повышенной надёжностью функционирования.

В данной главе архитектура и особенности применения микроконтроллеров семейства C500 рассмотрены лишь в общих чертах. Более подробные сведения можно найти в руководстве пользователя и техническом описании конкретной модификации микроконтроллера.

7.2.2. Организация памяти

Ресурсы памяти микроконтроллеров семейства C500 разделяются на память данных и память программ, которые, в свою очередь, могут быть как внутренними (размещёнными в том же полупроводниковом кристалле, что и ядро микроконтроллера), так и внешними. Принцип разделения памяти микроконтроллеров этого семейства типичен для процессоров гарвардской архитектуры, в соответствии с которой, как известно, данные и программы хранятся в различных областях памяти. Обращение к периферийным устройствам, размещённым на кристалле, реализовано через регистры специальных функций (Special Function Register — SFR).

Доступные области памяти имеют различные размеры. Как указано в Табл. 7.1, существуют три различных типа памяти и шесть возможных областей физического размещения памяти различных типов.

Таблица 7.1. Распределение памяти микроконтроллера C500

Тип памяти	Размещение	Объём памяти
Память программ	Внешняя	Максимум 64 Кбайт
	Внутренняя: ПЗУ, EPROM (СППЗУ)	Зависит от версии: от 2 до 64 Кбайт
Оперативная память	Внешняя	Максимум 64 Кбайт
	Внутренняя расширенная (XRAM)	Зависит от версии: от 256 байт до 3 Кбайт
	Внутренняя	128 или 256 байт
Регистры специальных функций	Внутренняя	128 или 256 байт

Память программ

Память программ микроконтроллеров семейства C500 может размещаться: в модуле внешней памяти, во внутренней памяти (встроенное ПЗУ) или частично во внутренней памяти, а частично во внешней. Если на выводе $\overline{EA}$ (управления внешним доступом) микроконтроллера присутствует сигнал НИЗКОГО уровня, то C500 будет всегда исполнять программу, находящуюся во внешней памяти.

Если та или иная модификация микроконтроллера C500 не имеет встроенного ПЗУ, то единственным местом, где может физически размещаться исполняемая программа, является внешняя память. В случае, когда микроконтроллер имеет внутреннее ПЗУ, обычно именно оно и используется для хранения программы. Для того чтобы задействовать внутреннее ПЗУ, необходимо подать на вход $\overline{EA}$ процессора сигнал ВЫСОКОГО уровня. При соблюдении этого условия микроконтроллер исполняет команды из внутреннего ПЗУ до тех пор, пока адреса этих команд не выйдут за верхнюю границу адресного пространства указанного ПЗУ. Если адрес, находящийся в счётчике команд (PC), превышает верхнюю границу адресов внутреннего ПЗУ (например, при выполнении команды JUMP), то будет выполнена команда, расположенная во внешней памяти. Когда же адрес исполняемой команды вновь окажется в диапазоне адресов внутреннего ПЗУ, команда снова будет считана из этой области памяти.

На Рис. 7.1 приведены типичные конфигурации памяти программ для процессоров семейства C500, как при $\overline{EA} = 0$, так и при $\overline{EA} = 1$. Верхняя граница адресного пространства ПЗУ, показанная на Рис. 7.1, со-

ответствует модификациям микроконтроллера C500 с 8 Кбайт внутренней памяти программ. У других контроллеров этого семейства, с иным объёмом внутреннего ПЗУ, граница соответствующим образом смещена.



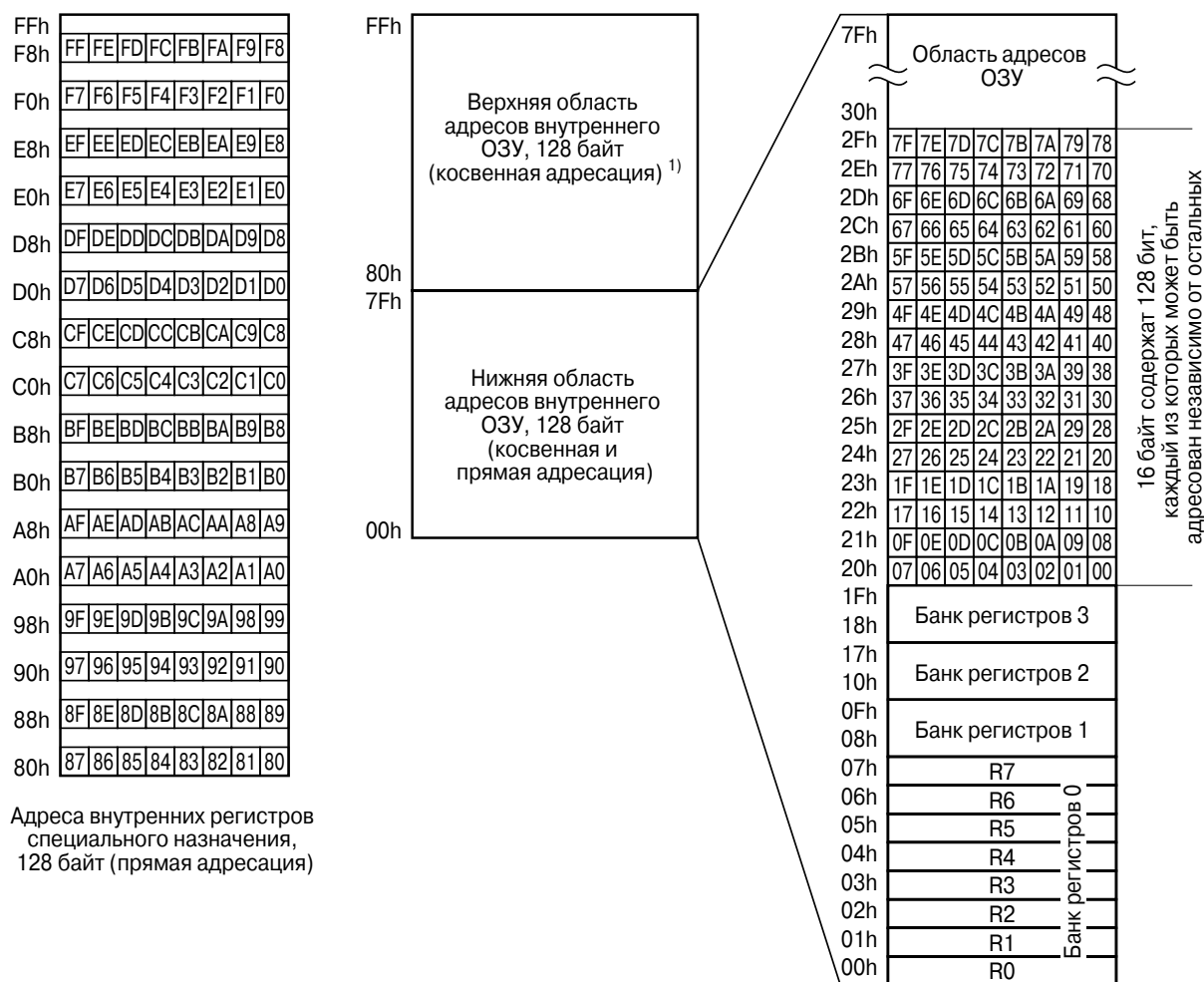
Положение границы области адресов ПЗУ зависит от версии микроконтроллера семейства C500.

Рис. 7.1. Конфигурация ПЗУ (на примере микроконтроллера C501).

Память данных

Память данных микроконтроллеров семейства C500 подразделяется на внешнюю и внутреннюю области. Для внутренней памяти данных используется 8-битный адрес, при обращении к внешней памяти данных и внутренней расширенной памяти XRAM используются как 8-битные, так и 16-битные адреса.

Сброс микроконтроллера не оказывает никакого влияния на содержимое внутренней памяти данных. Сразу после включения питания содержимое этой области памяти может быть произвольным, но следует подчеркнуть, что если питание не отключалось,



¹⁾ Опционально. Наиболее простые модели микроконтроллеров семейства C500 работу с этой областью адресов внутреннего ОЗУ не поддерживают.

Рис. 7.2. Структура внутреннего ОЗУ микроконтроллера C500.

то текущее содержимое внутренней памяти данных остаётся неизменным как в процессе, так и после подачи сигнала RESET. Кроме того, содержимое внутренней памяти XRAM сохраняется неизменным и в режиме пониженного энергопотребления.

Внутренняя память данных

Адресное пространство внутренней памяти данных состоит из трёх блоков, обращение к которым осуществляется независимо: нижние 128 байт внутреннего ОЗУ данных, верхние 128 байт внутреннего ОЗУ данных и 128 байт области регистров специальных функций (SFR).

Кроме того, нижняя область ОЗУ данных и область регистров специального назначения содержат по 128 бит памяти данных каждая, содержимое которой может быть изменено с помощью специальных команд

побитно и независимо от содержимого остальных ячеек ОЗУ.

Положение границы адресного пространства, разделяющей внутреннюю память данных и память программ, зависит от конкретной версии микроконтроллера семейства C500.

На **Рис. 7.2** представлена структура трёх основных областей внутреннего ОЗУ. Нижняя область адресов ОЗУ данных (00h...7Fh) может быть адресована непосредственно (например, MOV A, адрес) или косвенно (например, MOV A, @R0, где адрес содержится в регистре R0). Адреса 20h...2Fh выделены под специальную область ячеек памяти, которая имеет объём 128 бит (16 байт). В этой области ОЗУ данных поддерживается прямая адресация к каждому из битов, значения которых могут устанавливаться независимо от других. Соответственно, нулевой бит байта этой области

ОЗУ, расположенного по адресу 20h, имеет адрес 00h, а седьмой бит байта внутреннего ОЗУ данных, расположенного по адресу 2Fh, имеет адрес 7Fh. Нижние 32 адреса нижней области внутреннего ОЗУ данных отведены под четыре группы по восемь регистров общего назначения (General Purpose Register — GPR). В каждый момент времени может быть задействована только одна группа регистров.

Поскольку область SFR и верхняя область внутреннего ОЗУ имеют один и тот же диапазон адресов (80h...FFh), для обращения к ним необходимо использовать различные механизмы доступа. В этих целях обращение к верхней части области адресов внутреннего ОЗУ может осуществляться только через механизм косвенной адресации, а обращение к регистрам специальных функций (SFR) — только с использованием команд прямой адресации. Регистры общего назначения, в адресе которых значение битов 0...2 равно нулю (т.е. регистры, расположенные по адресам 80h, 88h, 90h, ...F8h), могут быть адресованы побитно.

Внутренняя память XRAM

В некоторых микроконтроллерах семейства C500 имеется дополнительная область внутренней памяти данных, которая называется расширенной памятью (XRAM). Её адресное пространство расположено в верхней части области адресов внешней памяти данных, но физически память XRAM размещена на том же самом кристалле, что и процессор. Поскольку XRAM используется аналогично внешней памяти данных, обращение к ней осуществляется при помощи тех же команд.

На **Рис. 7.3** приведена схема размещения в адресном пространстве стандартного для семейства микроконтроллеров C500 модуля XRAM с объёмом памяти 256 байт.

В зависимости от конкретной модификации микроконтроллера семейства C500, размер области XRAM, расположенной на его кристалле, может варьироваться в диапазоне 128 байт...3 Кбайт. У памяти XRAM есть ещё одно интересное свойство — она может быть активирована или отключена. В последнем случае область адресов XRAM можно использовать для адресации внешнего ОЗУ.

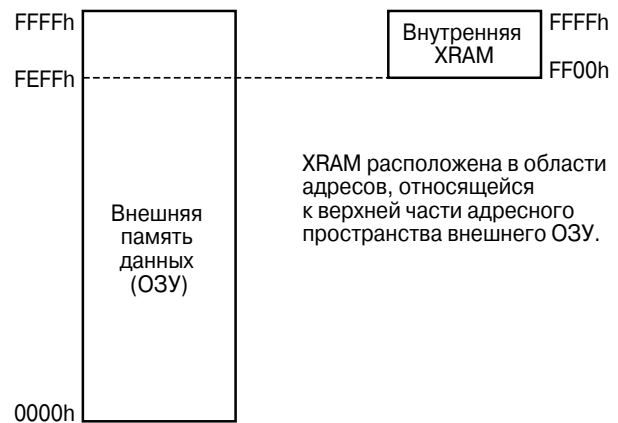


Рис. 7.3. Схема размещения XRAM в адресном пространстве микроконтроллера (в данном примере объём памяти XRAM составляет 256 байт).

Внешняя память данных

В микроконтроллерах семейства C500 предусмотрена возможность обращения к 64-Кбайт внешней памяти данных с помощью команд, использующих 8- и 16-битную косвенную адресацию. 16-битная адресация внешней памяти осуществляется командой MOVX с использованием регистра-указателя данных (DPTR) в качестве адресного 16-битного регистра. При 8-битной адресации команда MOVX используется в сочетании с регистрами общего назначения R0/R1.

7.2.3. Область регистров специальных функций

За исключением счётчика команд и четырёх банков регистров общего назначения, все регистры микроконтроллера семейства C500 расположены в отдельной области памяти, называемой областью регистров специального назначения (см. **Рис. 7.2**). Как правило, область регистров специальных функций имеет размер 128 байт, обращение к которым осуществляется путём прямой адресации. Те регистры, для которых значения битов 0...2 в байте адреса равны нулю (это адреса 80h, 88h, 90h, ...F8h), могут быть адресованы побитно (см. **Рис. 7.2**). Так, например, регистр SFR с байтовым адресом 80h содержит независимо программируемые биты с адресами 80h...87h. Диапазон адресов этих независимо программируемых битов SFR (всего их 128) составляет 80h...FFh.

7.2.4. Архитектура ЦПУ

На **Рис. 7.4** изображена типичная архитектура микроконтроллера семейства C500, включающая в себя его основные функциональные модули. Те из них, которые на рисунке выделены серой «заливкой», являются базовыми и обязательно входят в состав любого из микроконтроллеров семейства C500. Наличие остальных модулей, например XRAM или периферийных устройств, а также объём памяти ПЗУ/ОЗУ зависит от конкретной модификации микроконтроллера.

Основой функциональной схемы является центральное процессорное устройство (ЦПУ) — ядро микроконтроллера семейства C500. ЦПУ состоит из декодера команд, арифметического блока, блока регистров и блока контроля исполнения программы. Модуль управления генерирует сигналы управления всеми внутренними функциональными блоками микроконтроллера. Выводы порта 0 и порта 2 необходимы для обеспечения доступа к внешней памяти программ (ПЗУ) и внешнему ОЗУ, используются они и в режиме эмуляции. Модуль внешнего управления отвечает за обработку внешних сигналов управления и за генерацию тактового сигнала.

Блок управления доступом к памяти осуществляет управление встроенными ресурсами памяти микроконтроллера. Внутреннее ОЗУ также включает в себя регистры общего назначения. Запросы на прерывания от периферийных устройств обрабатываются модулем обработки прерываний. «Ассортимент» интегрированных в состав

микроконтроллера периферийных модулей зависит от его назначения. Стандартный набор включает в себя последовательный интерфейс, блок таймеров, модуль захвата и сравнения, АЦП, сторожевой таймер и блок умножения/деления. Внешние сигналы для этих встроенных периферийных устройств могут поступать по многофункциональной шине параллельного ввода/вывода либо через специально зарезервированные для этого выводы микроконтроллера.

Арифметический блок, в состав которого входят АЛУ (арифметико-логическое устройство), регистр А, регистр В и регистр PSW, предназначен для реализации различных алгоритмов обработки входных данных. Он сочетает в себе широкие возможности обработки команд двоичной и двоично-десятичной арифметики и мощные средства проведения операций с битовыми переменными. Эффективность использования памяти программ обеспечивается тем, что 44% команд микроконтроллера являются однобайтными, 41% команд — двухбайтными и только 15% команд имеют длину в три байта. АЛУ под управлением декодера команд может обрабатывать 8-битные слова, поступающие из одного или двух источников, обеспечивая 8-битный результат. АЛУ может осуществлять следующие арифметические операции: сложение, вычитание, умножение, деление, инкрементирование, декрементирование, выравнивание и сравнение результата сложения двоично-десятичных величин.

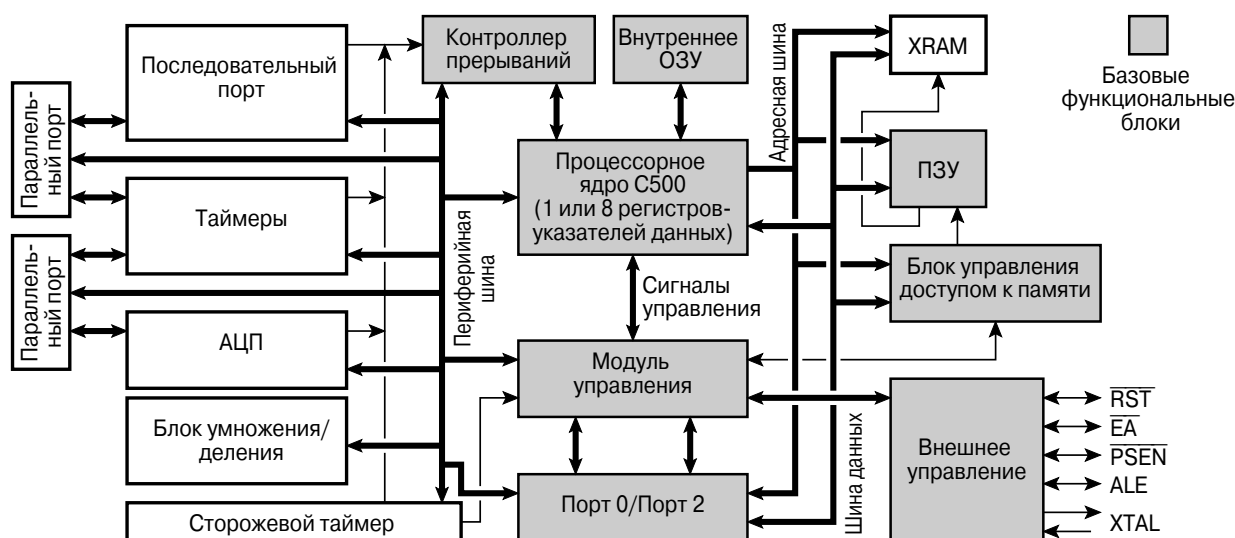


Рис. 7.4. Блок-схема микроконтроллера семейства C500.

Кроме того, поддерживаются следующие логические операции: И, ИЛИ, Исключающее ИЛИ, дополнение до двух, циклический сдвиг (вправо, влево), а также операции перестановки полубайтов (тетрад) в байте. Он также содержит двоичный процессор, который реализует следующие битовые операции: установка бита в логическую 1, установка бита в логический 0, формирование дополнения до двух (что для битовой переменной эквивалентно инверсии), переход, если значение битовой переменной не равно логической 1, переход, если значение битовой переменной равно логической 1 с очисткой (значение переменной устанавливается равным 0), а также сдвиг с переносом или без переноса.

Битовые операции Логическое И и Логическое ИЛИ могут проводиться с любыми индивидуально адресуемыми битами (или их дополнениями, если это применимо) и флагом переноса; результат операции сохраняется во флаге переноса.

Модуль управления определяет, в какой последовательности будут выполняться команды, хранящиеся в памяти программ микроконтроллера. Шестнадцатитбитный счетчик команд (PC) содержит адрес следующей исполняемой команды. Используя логику условных переходов, процессор может изменять порядок исполнения команд в зависимости от внутренних или внешних условий.

Аккумулятор

На функциональных схемах регистр-аккумулятор полагается обозначать как АСС. Однако в ассемблерных командах он обозначается просто А.

Регистр В

Регистр В используется при умножении или делении как в качестве источника одного из операндов, так и в качестве места, куда помещается результат умножения или деления. При выполнении других команд он используется для хранения промежуточных результатов.

Слово состояния программы (PSW)

Слово состояния программы содержит несколько информационных битов, характеризующих текущее состояние ЦПУ. Каждый из битов PSW имеет своё назначение:

два бита отображают текущий выбор банка регистров, два других — состояние флагов переноса, пятый бит используется как флаг переполнения при проведении арифметических операций, шестой бит — это флаг чётности содержимого аккумулятора и, наконец, два последних используются как флаги общего назначения.

Указатель стека (SP)

Размерность указателя стека — 8 бит. Он инкрементируется перед тем, как данные из рабочих регистров будут сохранены с помощью команд PUSH или CALL, и декрементируется после исполнения команд POP или RET (RETI), восстанавливающих исходное состояние регистров. Таким образом, значение указателя стека всегда соответствует адресу последнего значащего байта в стеке. Сам стек может находиться в любом удобном месте в границах внутренней памяти микропроцессора. Необходимо, однако, помнить, что после перезагрузки микроконтроллера указатель стека всегда содержит адрес 07h. Поэтому стек начинается не со «дна» (с нулевого адреса) нулевого банка регистров, а на 08h выше него. Значение указателя стека (SP) может быть прочитано или записано программным способом.

Регистр-указатель данных

Восьмибитный доступ к внутренней оперативной памяти XRAM или к внешнему ОЗУ микроконтроллера C500 реализован с использованием регистра-указателя данных (DPTR) в качестве 16-битного адресного регистра. Как правило, микроконтроллеры семейства C500 имеют один указатель данных, но некоторые микроконтроллеры этого семейства предоставляют программисту возможность использования до восьми регистров-указателей данных. Это значительно облегчает поддержку языков высокого уровня, которые хранят большие массивы данных во внешней памяти микроконтроллера.

Эмулирование работы микроконтроллера с использованием технологии Enhanced Hooks

Концепция эмуляции Enhanced Hooks — это шаг вперёд с точки зрения отладки процесса исполнения машинных команд и по-

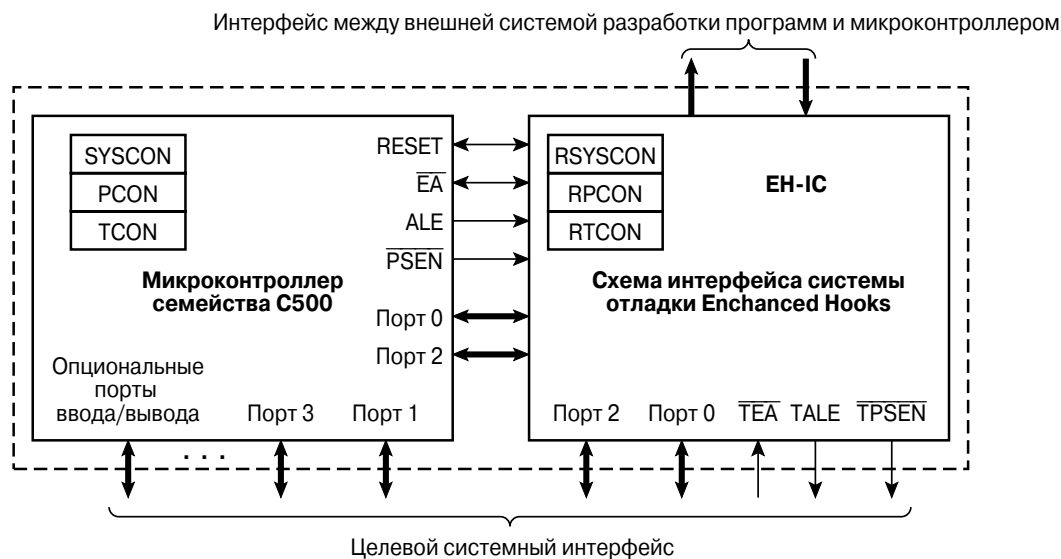


Рис. 7.5. Стандартная конфигурация системы на основе микроконтроллера C500 при реализации концепции Enhanced Hooks.

лучения сведений о внутренних операциях в микроконтроллерах семейства C500 (Рис. 7.5). Она также позволяет эмулировать программы, записанные во внутреннем ПЗУ микроконтроллера.

В рамках данной концепции в каждом производимом кристалле размещены дополнительные элементы, позволяющие реализовать вышеуказанные функции и отказаться от использования дорогих внешних эмуляционных кристаллов при отладке микросхем. Кроме этого, такой подход обеспечивает идентичность исполнения программ в рабочем режиме и в режиме отладки.

Реализация Enhanced Hooks Technology™ требует введения в схему микроконтроллера C500 ряда дополнительных элементов. Производитель гарантирует, что такой C500, совместно с дополнительной интерфейсной микросхемой, будет работать так же, как внешний эмуляционный кристалл. За счёт этого облегчается процесс проектирования и сокращается стоимость среды разработки программ (ICE). Наличие подобной среды разработки в сочетании с использованием интерфейсной микросхемы и соответствующего микроконтроллера семейства C500 даёт возможность эмулировать любые режимы работы всех микроконтроллеров этой серии: из внутреннего ПЗУ, из внутреннего ПЗУ с перекрытием кодов и без ПЗУ. Также могут быть реализованы пошаговый режим работы

и режим чтения специальных регистров после прерывания.

В ходе отладки для управления микроконтроллером и для передачи информации о ходе исполнения программы от эмулируемого микроконтроллера к внешнему эмулятору (среде разработки программ) используются порт 0, порт 2 и несколько линий шины управления.

7.2.5. Основные принципы обработки прерываний

Все микроконтроллеры семейства C500 поддерживают работу от нескольких источников прерываний. Прерывания запускаются либо внешними событиями, либо сигналами от внутренних периферийных устройств. Когда процессор получает сигнал прерывания, он останавливает исполнение любой из запущенных на этот момент программ и осуществляет переход по вектору прерывания (адресу, «привязанному» к соответствующему источнику прерывания), начиная с которого расположена программа-обработчик прерывания. После исполнения команды возвращения из прерывания (RET — последняя команда в программе обработки прерывания) исполнение прерванной основной программы продолжается с той точки, в которой она была прервана. На Рис. 7.6 представлена диаграмма

распределения адресов векторов прерываний для микроконтроллера C501. Обычно векторы прерываний расположены в области ПЗУ, начинающейся с адреса 0003h. Минимальный интервал между двумя последовательными векторами прерывания составляет 8 байт, следовательно, вектора прерываний могут располагаться по адресам 0003h, 000Bh, 0013h, 001Bh, 0023h, 002Bh, 0033h, ...00FBh.

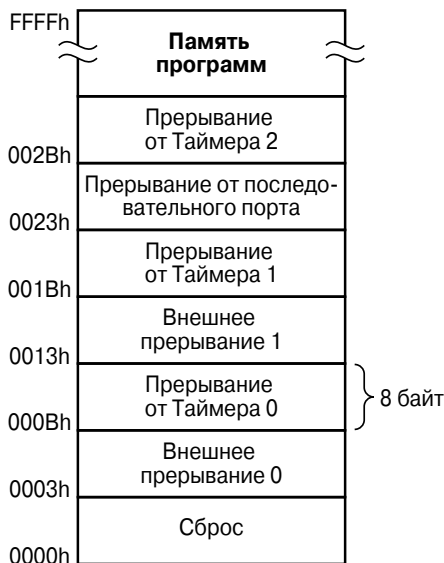


Рис. 7.6. Источники прерываний и адреса соответствующих векторов (на примере микроконтроллера C501).

Источник прерывания, устанавливая соответствующий флаг, информирует контроллер прерываний о возникновении условий, требующих запроса на прерывание. Состояние флага запроса на прерывание фиксируется в каждом машинном цикле. В следующем машинном цикле производится опрос его состояния. Если флаг был установлен, то контроллер прерываний сгенерирует команду LCALL, которая вызовет переход ЦПУ к программе обработки, расположенной по адресу, указанному в соответствующем векторе прерывания. Эта аппаратная команда LCALL может быть заблокирована любым из ниже перечисленных условий:

1. Уже обрабатывается прерывание с равным или более высоким приоритетом.
2. Текущий машинный цикл (опроса) не является последним циклом для команды, которая исполнялась в момент поступления запроса на прерывание.

3. В текущий момент выполняется команда RETI или другая команда, осуществляющая запись в регистры приоритета или в иные активизируемые по прерыванию регистры.

Если как минимум одно из этих условий имеет место, то команда LCALL, вызывающая процедуру обработки прерывания, не будет запущена. Условие 2 гарантирует, что выполнение текущей команды будет полностью завершено до того, как микроконтроллер переключится на процедуру обработки прерывания. Условие 3 обеспечивает исполнение как минимум одной команды (из основного тела программы) до переключения на следующую программу обработки прерывания. Эта задержка даёт возможность контроллеру прерываний обнаруживать изменения в текущем приоритете прерывания.

Опрос флага прерывания повторяется в каждом машинном цикле. При этом обрабатывается значение флага, зафиксированное в предыдущем машинном цикле. Надо отметить, что если флаг запроса на прерывание был установлен, но соответствующая реакция микроконтроллера была заблокирована одним из указанных выше условий и при этом на момент окончания действия блокирующего условия флаг запроса на прерывание перестал быть активным, то прерывание, обработка которого ещё не началась, так и не будет обработано.

Иными словами, система «не помнит», что флаг запроса на прерывание был установлен, но это прерывание не было обработано; в каждом цикле опроса во внимание принимаются только активные запросы на прерывание.

Последовательность действий в цикле опроса/вызова команды LCALL показана на **Рис. 7.7**.

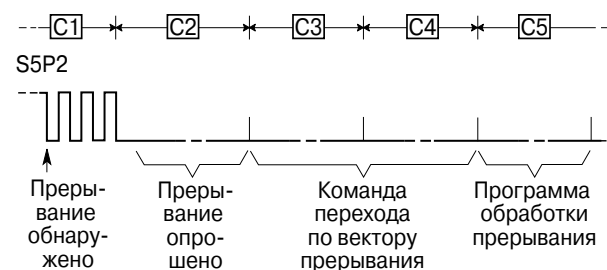


Рис. 7.7. Временная диаграмма процесса обнаружения прерывания и входа в программу его обработки.

Надо отметить, что в соответствии с приведёнными выше правилами прерывание, поступившее во время фаз C5 и C6, если оно обладает высоким приоритетом и становится активным перед S5P2 (в машинном цикле C3 на **Рис. 7.7**), будет обработано даже без исполнения хотя бы одной команды из программы с приоритетом более низкого уровня.

Таким образом, процессор реагирует на прерывание выполнением аппаратной команды LCALL для вызова соответствующей программы обработки прерывания. В некоторых случаях после этого аппаратно сбрасывается флаг запроса прерывания. В остальных случаях флаг сброшен не будет, и пользовательская программа должна будет сделать это сама.

Выполнение программы обработки прерывания продолжается последовательно вплоть до команды RETI. Команда RETI информирует процессор о том, что программа обработки прерывания закончила свою работу, и перегружает два верхних байта из стека в счётчик команд. Выполнение ранее прерванной основной программы возобновляется с того места, в котором она была приостановлена. Необходимо отметить, что команда RETI играет очень важную роль, поскольку она информирует процессор о том, что после возобновления основной программы разрешён приём прерываний с текущим уровнем приоритета (т.е. с тем же уровнем приоритета, как и только что обработанное прерывание).

Простая команда RET тоже приводит к возобновлению прерванной основной программы, но контроллер прерываний будет считать, что текущее прерывание всё ещё активно. В этом случае никакие новые прерывания с тем же или более низким уровнем приоритета не будут восприняты процессором.

Время реакции на прерывание

После обнаружения внешнего прерывания соответствующий ему флаг запроса прерывания устанавливается в фазе S5P3 каждого машинного цикла. Значение этого флага не будет обработано схемой опроса до следующего машинного цикла. Если запрос на прерывание активен и нет препятствий к его обработке, то следующей исполняемой командой будет аппаратная команда перехода к программе обработки прерывания.

Вызов этой команды сам по себе занимает два машинных цикла. Следовательно, между моментом обнаружения внешнего прерывания и исполнением первой команды программы обработки прерывания пройдёт как минимум три полных машинных цикла.

Более длительное время реакции на внешнее прерывание может быть результатом блокирования запроса любым из трёх упомянутых выше условий. Если уже обрабатывается прерывание с таким же или более высоким уровнем приоритета, то длительность дополнительной задержки будет определяться параметрами текущей (уже исполняемой) программы обработки прерывания. Даже если для завершения команды, исполняемой на момент обнаружения прерывания, требуется какое-то время, то задержка не может превысить три машинных цикла, поскольку процесс исполнения даже самых длинных команд (MUL и DIV) занимает только четыре машинных цикла. Однако если исполняемая в момент обнаружения прерывания команда является командой возврата из обработки прерывания (RETI), командой записи в регистр разрешения прерывания или командой записи в регистр приоритетов прерываний, то дополнительная задержка не превысит пяти машинных циклов (не более чем один машинный цикл, который нужен для завершения текущей исполняемой команды, и максимум четыре машинных цикла, необходимых для исполнения следующей длинной команды, например команды умножения или деления (MUL или DIV)).

Следовательно, если имеет место однократное прерывание, то время реакции на него (с момента обнаружения прерывания до начала выполнения первой команды программы-обработчика) всегда превышает три машинных цикла и всегда меньше, чем девять машинных циклов.

7.2.6. Структура портов ввода/вывода

Цифровые порты ввода/вывода

Микроконтроллеры семейства C500 позволяют производить операции ввода/вывода для входных и выходных цифровых сигналов. Такие операции осуществляются через специально предназначенные для этой цели выводы микроконтроллера, которые сгруппированы по 8 выводов и образуют 8-битные порты. Каждый порт включает в

себя входное устройство (буфер), триггерную защёлку и выходной драйвер.

Управление доступом к порту для записи или считывания данных осуществляется через соответствующий регистр специальных функций.

На **Рис. 7.8** в упрощённом виде показано, как работают однобитная триггерная защёлка и буфер ввода/вывода («сердце» каждого порта ввода/вывода). Защёлка порта (один бит в регистре SFR этого порта) показана как D-триггер, который по сигналу от ЦПУ «запись в защёлку» считывает значение бита данных с внутренней шины микроконтроллера по фронту сигнала тактовой частоты. Выход $\bar{Q}$ триггера подключается к внутренней шине по сигналу процессора «чтение вывода порта». Некоторые из команд чтения порта (например, при чтении содержимого SFR-регистров портов P0, P2, P3) активируют сигнал «чтение защёлки» (Read Latch), тогда как другие активируют сигнал «чтение вывода порта» (Read Pin).

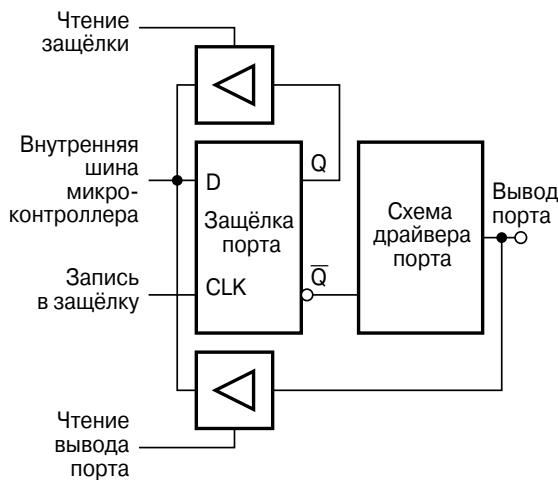


Рис. 7.8. Типичная структура порта микроконтроллера семейства C500.

Выходные драйверы портов 0 и 2 и входные буферы порта 0 используются также для доступа к внешней памяти. В этом случае (при обращении к внешней памяти через порт 0) младший байт адреса мультиплексируется по времени со считываемым/записываемым байтом данных. Если адрес шестнадцатибитный, то его старший байт передаётся через порт 2.

Выходное напряжение драйверов портов (за исключением драйвера порта 0) «подтянуто» к уровню напряжения питания с по-

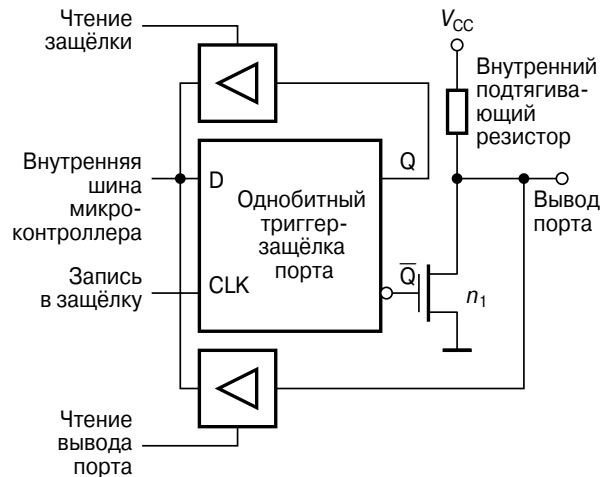


Рис. 7.9. Схема порта (применима ко всем портам, кроме порта 0).

мощью внутренних схем на полевых транзисторах (см. **Рис. 7.9**). Каждая из линий ввода/вывода может независимо программироваться для использования в качестве ввода или вывода данных. В первом случае значение бита, записанного в защёлке порта, должно соответствовать логической 1 (т.е. на **Рис. 7.9** выходы триггера-защёлки должны находиться в следующих состояниях: $Q = 1$, а $\bar{Q} = 0$). При этом полевой транзистор n_1 выходного драйвера порта будет закрыт. Соответственно, на выводе порта может присутствовать **ВЫСОКИЙ** уровень (его по умолчанию обеспечивает наличие внутреннего подтягивающего резистора) либо **НИЗКИЙ** уровень, задаваемый внешним источником сигнала. В отличие от состояния **ВЫСОКОГО** уровня на выходе порта, перевод его в **НИЗКИЙ** уровень связан с протеканием определённого тока от источника сигнала. Поэтому порты такого типа иногда называют квазидвунаправленными.

Архитектура портов некоторых из микроконтроллеров семейства C500 обеспечивает возможность работы как в квазидвунаправленном режиме (совместимом со стандартным режимом работы порта процессора семейства 8051), так и в полностью двунаправленном режиме с входными и выходными уровнями напряжений, стандартными для КМОП.

Аналоговые входные порты

Некоторые модификации микроконтроллеров семейства C500 имеют встроенный АЦП с несколькими входными линиями. Соответствующие выводы микроконт-

роллера, в зависимости от его модификации, либо предназначаются исключительно для приёма аналоговых сигналов, либо могут использоваться как в качестве аналоговых входов, так и в качестве цифровых портов ввода/вывода (такой вариант является стандартным для микроконтроллеров с небольшим количеством выводов).

Выводы, предназначенные для работы с аналоговыми сигналами, могут функционировать в одном из двух режимов. Когда они используются в качестве аналоговых входов, номер требуемого аналогового канала задаётся значением соответствующего битового поля в управляющем регистре АЦП. Когда же они используются в качестве цифровых входов, связанный с данным портом регистр специальных функций будет содержать цифровое значение, присутствующее на линиях порта. Для того чтобы это цифровое значение линий порта было считано в регистр, уровни входных напряжений на них должны находиться в заранее заданных для логического 0 и логической 1 границах (V_{IL}/V_{IH}). Таким образом, можно одновременно использовать аналоговые входные порты для приёма аналоговых и цифровых сигналов.

После сброса микроконтроллера все аналоговые функции выводов блокируются, и они конфигурируются как линии цифровых портов ввода/вывода. Аналоговые функции могут быть назначены линиям порта только после установки соответствующих битов в регистре специальных функций (SFR) этого порта. Запись логического нуля в соответствующий бит регистра SFR конфигурирует данный вход как аналоговый. Неиспользуемые аналоговые входы могут по-прежнему использоваться как линии цифрового порта ввода/вывода.

7.2.7. Тактовые сигналы ЦПУ

Основной тактовый сигнал

Машинный цикл состоит из шести тактов. Каждый из этих тактов разделён на две фазы: фаза 1 и фаза 2. Соответственно, один машинный цикл содержит фазы, начиная с S1P1 (первый такт, первая фаза) и заканчивая S6P2 (шестой такт, вторая фаза).

В зависимости от версии микроконтроллера семейства C500, каждый такт длится один или два периода сигнала тактового ге-

нератора. Как правило, арифметические и логические операции реализуются в фазе 1, а пересылка данных между регистрами — в фазе 2.

Временные диаграммы, приведённые на **Рис. 7.10**, демонстрируют процесс выборки и исполнения команд микроконтроллера в «привязке» к тактам и фазам машинного цикла.

Поскольку у пользователя отсутствует возможность непосредственного доступа к внутренним тактовым сигналам микроконтроллера, для получения косвенной информации о них может быть использован сигнал ALE (разрешение фиксации адреса в триггерной защёлке). Сигнал ALE обычно переводится в активное состояние дважды в течение каждого машинного цикла: это происходит сначала в фазах S1P2 и S2P2 и повторно в фазах S4P2 и S5P1.

Исполнение команды длительностью в один машинный цикл начинается в фазе S1P2 с записи кода команды в регистр команд.

Если исполняемая команда является двухбайтной, то считывание второго байта кода операции (КОП) производится в фазе S4 того же самого машинного цикла. Если команда однобайтная, то прочитанный в фазе S4 байт (который представляет собой КОП следующей команды) игнорируется (отбрасывается), и инкрементирования счётчика команд не происходит. Исполнение команды будет закончено в конце фазы S6P2.

На **Рис. 7.10, а, б** приведены временные диаграммы исполнения однобайтной и двухбайтной команд длительностью в один машинный цикл.

Большинство команд микроконтроллеров семейства C500 исполняются за один машинный цикл. Только команды MUL (умножение) и DIV (деление) требуют более двух машинных циклов (а точнее, требуется четыре цикла). Обычно в каждом машинном цикле из памяти считываются два байта кода операции (КОП). Единственным исключением из данного правила является исполнение команды MOVX. Эта команда доступа к внешней памяти данных является однобайтной и выполняется за 2 машинных цикла. Во втором машинного цикла вместо двух операций чтения КОП осуществляется адресация внешней памяти данных и считывание данных из неё. На **Рис. 7.10, в, г** показаны временные диаграммы исполнения обычной однобайтной команды, зани-

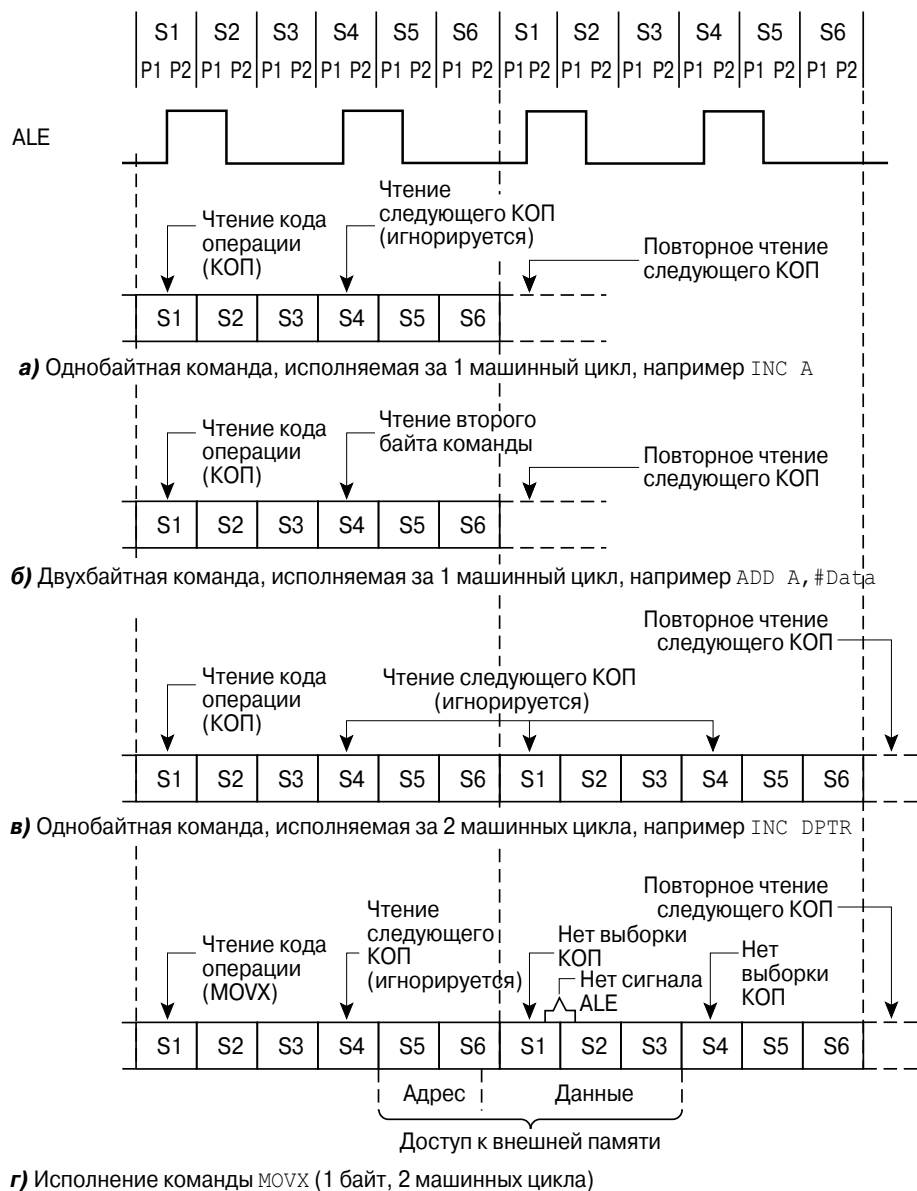


Рис. 7.10. Последовательность операций при выборке/исполнении команды микроконтроллера.

мающей два машинных цикла, и команды MOVX.

7.2.8. Обращение к внешней памяти

Существует два типа обращений к внешней памяти микроконтроллера: обращение к внешней памяти программ и обращение к внешней памяти данных. В первом случае в качестве сигнала разрешения считывания данных из внешней памяти программ используется сигнал $\overline{\text{PSEN}}$ (Program Store Enable), в то время как во втором случае используются стандартные сигналы $\overline{\text{RD}}$ и $\overline{\text{WR}}$ (они передаются по назначенным на выполнение соответствующих альтернативных функций линиям P3.7 и P3.6 порта 3).

При чтении кода команд из внешней памяти программ всегда используется 16-битная адресация. При обращении к внешней памяти данных может применяться как 16-битная (MOVX @DPTR), так и 8-битная адресация (MOVX @Ri).

Если используется 16-битный адрес, то его старший байт выводится через линии порта 2 и удерживается на них в течение цикла записи или чтения данных.

При 8-битной адресации (MOVX @Ri) содержимому SFR-регистра порта 2 (т.е. байту адреса) соответствуют значения, которые удерживаются на выводах порта 2 в течение всего цикла обращения к внешней памяти. Таким образом, выводы порта 2 ис-

пользуются для обращения к внешней памяти данных.

В обоих рассмотренных случаях младший байт адреса, мультиплексированный по времени с байтом данных, передаётся по линиям порта 0. Сигнал ADDRESS/DATA управляет обоими полевыми транзисторами каждого из выходных буферов указанного порта. Вследствие этого в режиме работы с внешней шиной выводы порта 0 не являются выходами с открытым стоком и к ним не требуется подключать внешние подтягивающие резисторы. Сигнал ALE должен использоваться как стробирующий сигнал фиксации байта адреса во внешней триггерной защёлке. Выборка адреса производится по спадающему фронту сигнала ALE (т.е. при переходе из ВЫСОКОГО уровня в НИЗКИЙ). Если осуществляется цикл записи, то записываемый байт данных появляется на выводах порта 0 незадолго до перехода сигнала $\overline{WR}$ в активное состояние (логического 0) и удерживается на этих выводах вплоть до снятия сигнала $\overline{WR}$. В цикле чтения входящий байт данных будет считан с выводов порта 0 незадолго до снятия сигнала чтения $\overline{RD}$.

При любом обращении к внешней памяти ЦПУ записывает в защёлку порта 0 (т.е. в связанный с ним регистр специальных функций) значение FFh, тем самым стирая ранее записанную в данном регистре SFR информацию. Следует также отметить, что команда MOV P0 не может использоваться во время обращения к внешней памяти. Если пользовательская программа попытается осуществить запись в порт 0 в процессе считывания данных из внешней памяти, то это может вызвать ошибку считывания данных. Поэтому во время цикла обращения к внешней памяти любые операции записи в порт 0 должны быть запрещены.

Работа с внешним ПЗУ

Обращение к внешней памяти программ микроконтроллера осуществляется в одном из двух случаев:

1. Если сигнал $\overline{EA}$ активен (имеет НИЗКИЙ логический уровень) или
2. Если сигнал $\overline{EA}$ не активен (имеет ВЫСОКИЙ логический уровень), но текущее значение адреса, содержащегося в счётчике команд (PC), выходит за верхнюю границу адресного пространства внутреннего ПЗУ, (т.е. больше чем 1FFFh

для внутреннего ПЗУ объёмом 8 Кбайт или 3FFFh для внутреннего ПЗУ объёмом 16 Кбайт).

Поэтому для тех модификаций микроконтроллеров семейства C500, у которых внутреннее ПЗУ отсутствует, необходимо всегда подключать вывод $\overline{EA}$ к отрицательной шине питания (V_{SS}), чтобы выборка первых 8, 16 или 32 Кбайт программного кода производилась из внешней памяти.

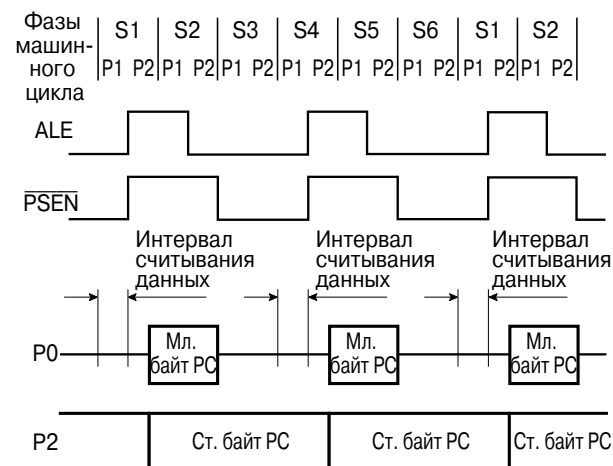


Рис. 7.11. Временная диаграмма цикла обращения к внешней памяти программ.

Когда микроконтроллер исполняет программу, расположенную во внешней памяти программ (см. временную диаграмму, приведённую на Рис. 7.11), все восемь битов порта 2 резервируются под шину адреса и не могут быть использованы для функций ввода/вывода общего назначения. При вызовах внешней программы линии порта 2 используются для вывода старшего байта счетчика команд (PC); при этом биты, значение которых должно соответствовать логической 1, устанавливаются в ВЫСОКИЙ уровень с помощью выходных драйверов порта и подтягивающих резисторов.

Обращение к внешней памяти данных

В случае, когда при обращении к внешней памяти данных те или иные биты адреса должны принимать значение логической 1, уровни напряжения на соответствующих выводах порта 2 задаются с помощью подтягивающих резисторов. Такое, например, происходит при вызове внешней программы в процессе выполнения команды MOVX@DPTR. В это время защёлки линий порта 2 (т.е. соответствующие биты регист-

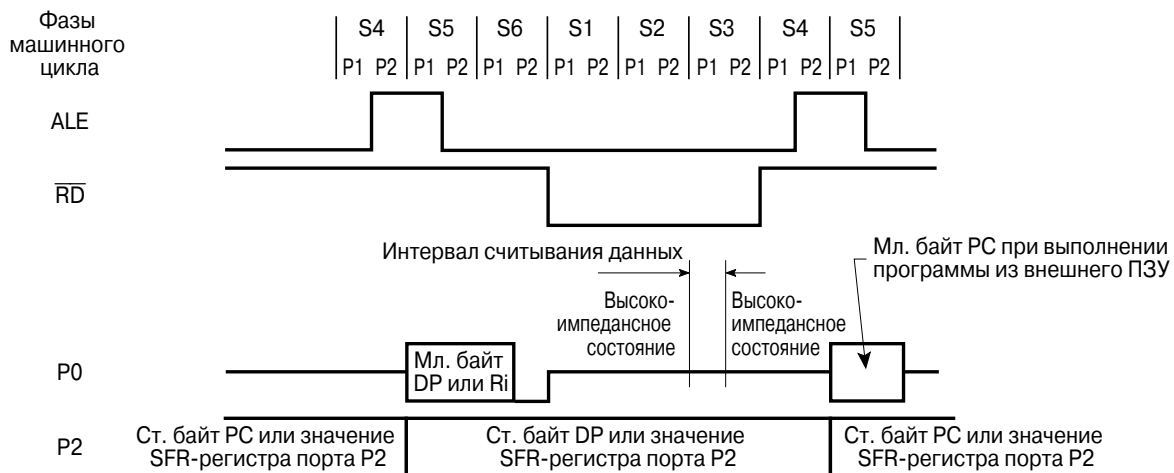


Рис. 7.12. Временная диаграмма цикла чтения из внешней памяти данных.

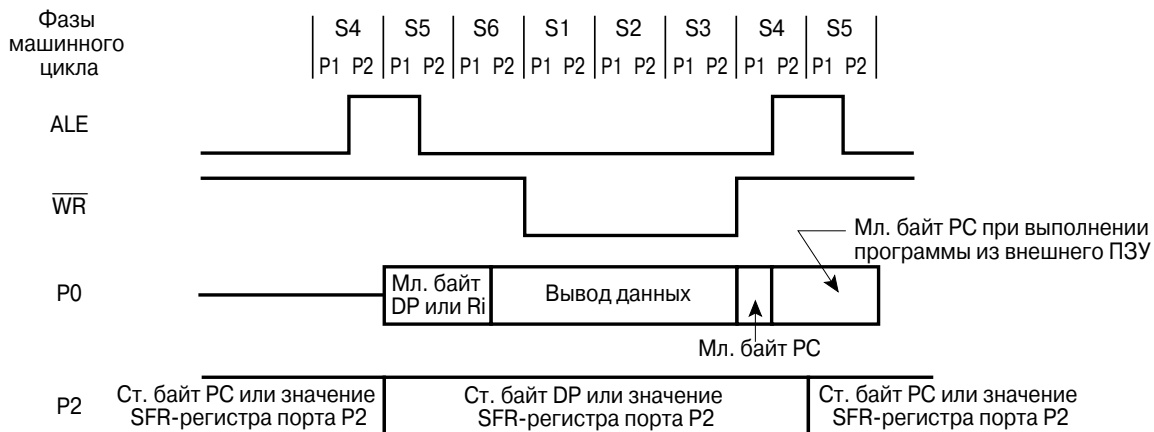


Рис. 7.13. Временная диаграмма цикла записи во внешнюю память данных.

ра специальных функций порта 2) не должны содержать логических 1; при этом содержимое SFR порта 2 не меняется. Таким образом, даже если за текущим циклом обращения к внешней памяти данных непосредственно не следует другой такой цикл, содержимое регистра SFR порта 2 сохраняется и вновь появляется на выводах порта с началом нового цикла обращения к внешней памяти.

На Рис. 7.12 и Рис. 7.13 представлены подробные временные диаграммы для циклов чтения и записи данных во внешнюю память данных.

7.2.9. Обзор команд микроконтроллера C500

Система команд 8-битных микроконтроллеров семейства C500 содержит 111 команд, из которых 49 — однобайтные, 45 —

двухбайтные и 17 — трёхбайтные. Формат мнемонической записи команды включает в себя псевдокод операции, за которым следует поле операндов «операнд назначения, операнд-источник». Это поле используется для определения типа данных и метода адресации.

Набор команд микроконтроллеров семейства C500 совпадает с набором команд всех остальных представителей семейства 8051 и, соответственно, с набором команд микроконтроллера SAB8051 — устройства, на основе которого и было разработано семейство C500.

Отсюда следует, что микроконтроллеры семейства C500 на 100% программно-совместимы с SAB8051, и для их программирования могут использоваться как язык ассемблера микроконтроллера 8051, так и языки высокого уровня.

Таблица 7.2. Способы адресации и соответствующие им области памяти

Способ адресации	Соответствующая область памяти
Регистровая адресация	R0...R7 в активном банке регистров, ACC, В, СУ (бит), DPTR
Прямая адресация	Младшие 128 байт внутреннего ОЗУ, регистры специальных функций
Непосредственная адресация	Память программ
Косвенная адресация через регистр	Внутреннее ОЗУ (@R1, @R0, SP), внешняя память данных (@R1, @R0, @DPTR)
Косвенная адресация с использованием базового и индексного регистров	Память программ (@A + DPTR, @A + PC)

Способы адресации микроконтроллера C500

В процессе работы с микроконтроллером C500 могут использоваться пять способов адресации:

1. Регистровая.
2. Прямая.
3. Непосредственная.
4. Косвенная через регистр.
5. Косвенная с использованием базового и индексного регистров.

В **Табл. 7.2** приведены области памяти, к которым может быть выполнено обращение с помощью того или иного способа адресации.

Регистровая адресация

Регистровая адресация обеспечивает доступ к восьми рабочим регистрам (R0...R7) активного в настоящий момент банка регистров.

Младшие значащие биты операционного кода команды определяют, какой из регистров будет адресован. Данный способ адресации применим также к регистрам ACC (аккумулятор), В, DPTR и СУ (аккумулятор логического процессора).

Прямая адресация

Прямая адресация — это единственный возможный способ адресации регистров специальных функций (SFR). Может быть также использована для адресации младших 128 байт внутреннего ОЗУ.

Непосредственная адресация

Непосредственная адресация позволяет размещать константы в памяти программ.

Косвенная адресация через регистр

При косвенной адресации через регистр

число, записанное в регистр R0 или R1 (принадлежащий к выбранному банку регистров), рассматривается как адрес ячейки памяти, которая входит в состав 256-байтного блока. Это может быть либо 256-байтный блок внутреннего ОЗУ, либо младшие 256 байт внешней памяти данных. Следует отметить, что адресация регистров специальных функций не может осуществляться данным способом.

Обращение к верхней половине внутреннего ОЗУ может быть выполнено лишь путём косвенной адресации. Доступ ко всем 64 Кбайт адресного пространства внешней памяти данных обеспечивается с помощью 16-битного указателя данных (DPTR).

В процессе выполнения команд PUSH и POP также используется косвенная адресация через регистр. Это позволяет располагать стек в любом удобном месте внутреннего ОЗУ.

Индексная адресация

Адресация с использованием базового и индексного регистров, делает возможным косвенное обращение к ячейке ПЗУ, адрес которой является суммой значений базового регистра (DPTR или PC) и индексного регистра (ACC). Такой способ адресации облегчает работу с переменными, хранящимися в памяти в табличной форме.

Битовый процессор

Битовый (логический) процессор — это процессор, встроенный в микроконтроллеры семейства C500, предназначенный для обработки битовых переменных. Он имеет свой набор команд, аккумулятор (с флагом переноса), побитно адресуемое ОЗУ и устройство ввода/вывода данных.

Команды для работы с битовыми переменными позволяют:

- установить бит в 1;
- сбросить бит в 0;
- сформировать побитовое дополнение до двух;
- выполнить команду перехода, если бит был установлен в 1;
- выполнить команду перехода, если бит был сброшен в 0;
- выполнить команду перехода, если бит был установлен в 1, с последующей записью 0 в этот бит;
- переписать значение бита в/из флага переноса.

Адресуемые биты или их дополнения могут быть объединены по И или по ИЛИ с флагом переноса. Результат операции будет записан во флаг переноса.

Типы команд

Команды микроконтроллера можно разделить на четыре подгруппы:

- команды обмена данными;
- арифметические;
- логические;
- команды передачи управления.

Команды обмена данными

Команды обмена данными, в свою очередь, делятся на три подгруппы:

- общего назначения;
- обмена с аккумулятором;
- пересылки объектного адреса.

За исключением команд извлечения данных из стека (POP) или пересылки данных непосредственно в регистр PSW (MOV PSW), ни одна из этих команд не влияет на текущее состояние флагов в регистре слова состояния (PSW).

Команды обмена данными общего назначения:

- Команда MOV пересылает бит или байт из операнда-источника в операнд назначения.
- Команда PUSH инкрементирует указатель стека и после этого передаёт байт из операнда-источника по адресу, заданному указателем стека.
- Команда POP пересылает байт операнда из ячейки памяти, адрес которой задан указателем стека, в операнд назначения, после чего декрементирует указатель стека.

Команды обмена с аккумулятором:

- Команда XCH осуществляет обмен байтами между операндом-источником и регистром A (аккумулятором).
- Команда XCHD осуществляет обмен между младшим полубайтом байта, содержащегося в операнде-источнике, и младшим полубайтом регистра-аккумулятора A.
- Команда MOVX пересылает байт из внешней памяти данных в аккумулятор. Адрес ячейки внешней памяти может быть задан как через регистр DPTR (16-битный), так и с использованием регистров R0 или R1 (8-битных).
- Команда MOVC пересылает байт из памяти программ в аккумулятор. Значение операнда, находящегося в аккумуляторе, используется в качестве индекса для 256-байтной таблицы, выбор которой осуществляется через значение базового регистра (DPTR или PC). Содержимое указанной таким образом ячейки памяти программ (байт) пересылается в аккумулятор.

Команды пересылки объектного адреса:

- Команда MOV DPTR, #data16 загружает 16-битное слово данных (адрес объекта), указанное непосредственно в качестве операнда, в регистровую пару DPH/DPL.

Арифметические команды

Микроконтроллеры семейства C500 используют четыре базовые арифметические операции. Непосредственно поддерживаются только 8-битные операции с беззнаковыми переменными. Однако благодаря наличию флага переполнения можно производить сложение и вычитание как для целых чисел со знаком, так и для целых чисел без знака. Арифметические операции также могут производиться непосредственно с числами в двоично-десятичном формате.

Сложение:

- Команда INC (инкрементирование) добавляет единицу к операнду-источнику и помещает результат в операнд-источник (при этом состояние флагов в регистре PSW не изменяется).
- Команда ADD суммирует значение регистра A (аккумулятора) с операндом-источником и помещает результат в A (аккумулятор).

- Команда ADDC (суммирование с переносом) суммирует содержимое регистра А (аккумулятора) с операндом-источником, прибавляет к результату единицу, если флаг переноса CY был установлен, а затем помещает результат в А.
- Команда DA (десятичная коррекция) корректирует результат сложения двухзначных операндов в двоично-десятичном формате, приводя его к упакованному двоично-десятичному формату. Результат исполнения команды помещается в аккумулятор. Флаг CY устанавливается в 1, если результат больше чем 99, в противном случае этот флаг сбрасывается в 0.

Вычитание:

- Команда SUBB (вычитание с заёмом) вычитает второй операнд-источник из первого (аккумулятора), затем вычитает единицу, если CY был установлен в 1, и вновь помещает результат в аккумулятор.
- Команда DEC (декрементирование) вычитает 1 из операнда-источника и помещает результат в операнд-источник (при этом состояние флагов в регистре PSW не изменяется).

Умножение:

- Команда MUL реализует операцию беззнакового умножения содержимого аккумулятора на содержимое регистра В и возвращает двухбайтный результат. Младший байт записывается в аккумулятор, а старший — в регистр В. Флаг переполнения OV устанавливается в 0, если старший байт результата (записываемый в регистр В) равен 0, и устанавливается в 1, если старший байт результата не равен 0. Флаг переноса CY всегда сбрасывается в 0, значение флага дополнительного переноса AC не изменяется.

Деление:

- Команда DIV реализует операцию беззнакового деления содержимого аккумулятора на содержимое регистра В и сохраняет целую часть результата в аккумуляторе, а остаток в регистре В. В случае деления на ноль в регистрах А и В будут содержаться непредсказуемые значения, флаг OV при этом устанавливается в 1 (во всех остальных случаях флаг OV сбрасывается в 0). Флаг CY сбрасывается в ноль, значение флага AC не изменяется.

Флаги

Помимо вышеуказанных причин, состояние флагов может быть изменено в результате следующих операций:

- Флаг переноса CY устанавливается в 1, если вследствие той или иной операции возникает перенос в старший бит результата или заимствование из него. Во всех остальных случаях флаг CY сбрасывается в ноль.
- Флаг дополнительного переноса AC устанавливается, если операция вызывает перенос из младшего полубайта результата (при сложении) или заимствование из старшего бита в младший бит (при вычитании). Во всех остальных случаях флаг AC сбрасывается в ноль.
- Флаг переполнения OV устанавливается в 1, если в результате операции происходит перенос в старший бит при отсутствии заимствования из него, и наоборот. Во всех остальных случаях флаг OV сбрасывается в ноль. Флаг OV используется при арифметических операциях в дополнительном коде, поскольку он устанавливается в 1, когда результат не может быть представлен в виде 8 бит.
- Флаг чётности P устанавливается в 1, если сумма по модулю 2 восьми отдельных битов числа, содержащегося в аккумуляторе, равна 1 (нечётное количество единиц). Во всех остальных случаях (чётное количество) флаг P сбрасывается в 0. Если происходит запись в регистр PSW, то значение бита P остается неизменным, поскольку оно всегда показывает результат проверки чётности содержимого аккумулятора.

Логические команды

В систему команд микроконтроллеров семейства C500 также входят логические операции как с битовыми, так и байтовыми операндами.

Команды, использующие один операнд:

- Команда CLR сбрасывает аккумулятор целиком или любой непосредственно адресуемый бит в ноль.
- Команда SETB устанавливает любой непосредственно адресуемый бит в 1.
- Команда CPL возвращает двоичный дополнительный код содержимого аккумулятора; при этом состояние флагов (в регистре PSW) или других непосредствен-

но адресуемых битов памяти не изменяется.

- Команды RL, RLC, RR, RRC, SWAP предназначены для работы с аккумулятором. RL осуществляет циклический сдвиг содержимого аккумулятора влево, RR — циклический сдвиг вправо, RLC — циклический сдвиг влево через перенос, RR — циклический сдвиг вправо через перенос, а SWAP — циклический сдвиг аккумулятора влево на четыре бита (т.е. старший и младший полубайты меняются местами). В результате выполнения команд RLC и RRC значение флага переноса CY устанавливается равным значению бита, который в процессе циклического сдвига был последним «вытолкнут» из аккумулятора. Команда SWAP сдвигает содержимое аккумулятора на четыре позиции влево, т.е. биты 3...0 (младший полубайт) меняются местами с битами 7...4 (старший полубайт).

Команды, использующие два операнда:

- Команда ANL осуществляет логическую операцию «Побитовое И» с двумя операндами (операнды могут быть как битовыми, так и байтовыми) и помещает результат обратно в первый из этих операндов.
- Команда ORL выполняет логическую операцию «Побитовое ИЛИ» с двумя операндами (операнды могут быть как битовыми, так и байтовыми) и помещает результат обратно в первый из этих операндов.
- Команда XRL реализует логическую операцию «Побитовое исключающее ИЛИ» с двумя операндами (операнды могут быть как битовыми, так и байтовыми) и помещает результат в первый из этих операндов.

Команды передачи управления

Существует три основных класса таких команд:

- безусловный переход, команды вызова и возврата из подпрограммы;
- условные переходы;
- прерывания.

В результате выполнения команд передачи управления микроконтроллер продолжает свою работу под управлением команд, расположенных в другом месте памяти программ (иногда для этого требуется выполнение определённых условий).

Безусловный переход, команды вызова подпрограммы и возврата из подпрограммы

Эти три команды передают управление с текущего значения счётчика команд по заданному адресу. Поддерживаются как прямой, так и косвенный способы передачи управления.

- Команда ACALL (LCALL) помещает адрес следующей за ней команды в стек, а затем передаёт управление по адресу, непосредственно заданному в теле команды. ACALL — это двухбайтная команда, используемая для адресации внутри текущей 2-Кбайт страницы памяти программ. LCALL — это трёхбайтная команда, которая может адресовать все 64 Кбайт доступного пространства памяти программ. При использовании команды ACALL адрес, задаваемый в теле команды (т.е. в 11-битном поле адреса команды), дополняется пятью старшими битами счётчика команд (который содержит адрес следующей команды). Если команда ACALL физически расположена в последних двух байтах текущей 2-Кбайт страницы памяти программ, то вызов произойдет из пространства следующей страницы, поскольку счётчик команд (PC) инкрементируется перед выполнением следующей команды.
- Команда RET передаёт управление по адресу возвращения, сохранённому в стеке предыдущей командой вызова подпрограммы (ACALL или LCALL), и дважды декрементирует содержимое регистра указателя стека, чтобы он указывал на адрес следующей команды.
- Команды AJMP, LJMP и SJMP передают управление по непосредственно заданному в них адресу. AJMP и LJMP работают аналогично ACALL и LCALL. Команда SJMP (короткий переход) передаёт управление в пределах 256-байтной (от -128 до +127 байт) окрестности адреса команды, следующей за SJMP.
- Команда JMP@A+DPTR выполняет переход относительно адреса, содержащегося в регистре DPTR. Операнд A используется для определения смещения (0...255 байт) относительно адреса в данном регистре. Это означает, что действительный адрес перехода может находиться в любом месте адресного пространства памяти программ.

Условные переходы

Команды условного перехода реализуют передачу управления в зависимости от выполнения некоторых условий. Адрес перехода лежит в 256-байтной (от -128 до $+127$ байт) окрестности адреса команды, следующей за командой условного перехода.

- Команда JZ осуществляет переход, если значение аккумулятора равно нулю.
- Команда JNZ осуществляет переход, если в аккумуляторе содержится ненулевое значение.
- Команда JC осуществляет переход, если флаг переноса установлен в 1.
- Команда JNC осуществляет переход, если флаг переноса сброшен в 0.
- Команда JB осуществляет переход, если установлен в 1 один из битов с непосредственной адресацией.
- Команда JNB осуществляет переход, если сброшен в 0 один из битов с непосредственной адресацией.
- Команда JBC осуществляет переход, если один из битов с непосредственной адресацией установлен в 1; после выполнения команды условного перехода значение этого бита сбрасывается в 0.
- Команда CJNE сравнивает значения двух своих операндов и осуществляет переход, если эти значения различаются. Флаг переноса CY устанавливается в 1, если первый операнд меньше второго, в противном случае флаг CY сбрасывается в 0. Могут производиться следующие виды сравнений: между содержимым аккумулятора и непосредственно адресуемыми битами во внутренней памяти; между непосредственно заданным в теле команды значением и текущим значением аккумулятора или регистра, относящегося к активному в настоящий момент банку регистров, или байта данных во внутреннем ОЗУ, обращение к которому может осуществляться путём косвенной регистровой адресации.
- Команда DJNZ декрементирует значение операнда и возвращает результат в этот же операнд. Переход осуществляется, если результат не равен нулю. В качестве операнда-источника для команды DJNZ не может использоваться прямо адресуемый байт во внутренней памяти данных. Адресация операнда-источника может быть как прямая, так и регистровая.

Команды возврата из прерывания

Команда RETI осуществляет передачу управления аналогично тому, как это делает команда RET. Однако после выполнения команды RETI текущий уровень приоритета прерываний в системе не изменяется, что позволяет производить обработку новых прерываний с уровнем приоритета не ниже текущего.

7.2.10. Функциональные схемы микроконтроллеров семейства C500

На Рис. 7.14...7.22 приведены функциональные схемы некоторых микроконтроллеров семейства C500. Более подробную информацию о структуре различных типов этих микроконтроллеров можно найти в руководствах по применению и в спецификациях для каждого из них.

7.3. Шестнадцатититные микроконтроллеры

7.3.1. Введение

Создание встроенных систем управления — это исключительно перспективная область применения современных микроконтроллеров, одним из наиболее критических факторов развития которой является быстродействие. Сложные алгоритмы управления функционированием таких систем основаны на обработке большого числа цифровых и аналоговых сигналов, время реакции на которые должно укладываться в заранее заданные границы. Кроме того, часто при проектировании встроенных систем управления большое значение имеют размеры печатных плат, уровень энергопотребления и общая стоимость системы.

Для реализации встроенных систем управления требуются микроконтроллеры, которые:

- характеризуются высокой степенью интеграции;
- позволяют обойтись без использования внешних периферийных устройств и, соответственно, снизить затраты на разработку программного обеспечения;
- гарантируют безопасное функционирование системы и имеют встроенные механизмы выхода из режимов сбоя;

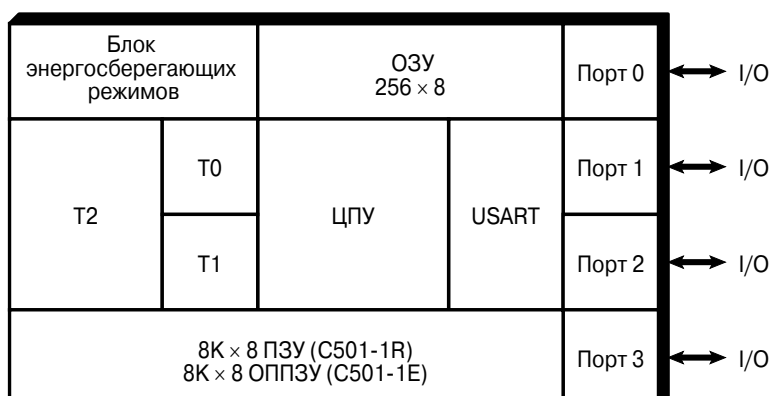


Рис. 7.14. Функциональная схема микроконтроллера C501-F.



Рис. 7.15. Функциональная схема микроконтроллера C504.



Рис. 7.16. Функциональная схема микроконтроллеров C505/C505C/C505A/C505CA.

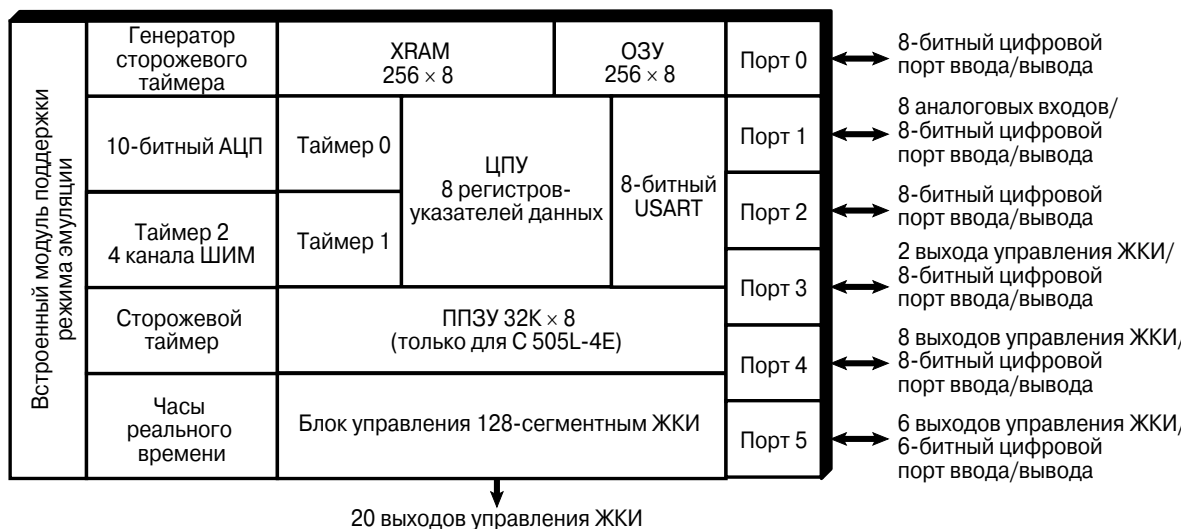


Рис. 7.17. Функциональная схема микроконтроллера C505L.

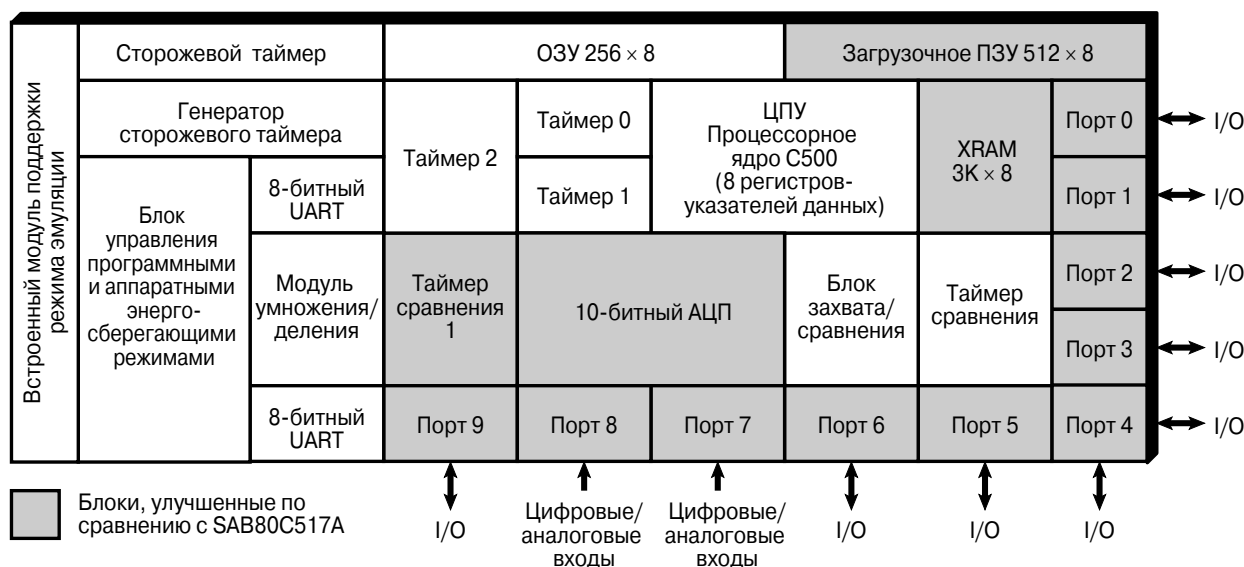


Рис. 7.18. Функциональная схема микроконтроллера C509.

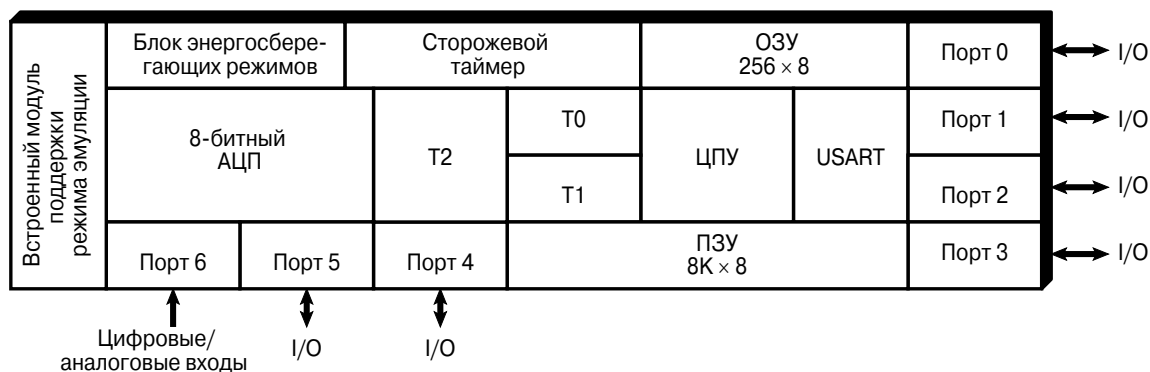


Рис. 7.19. Функциональная схема микроконтроллера C515.

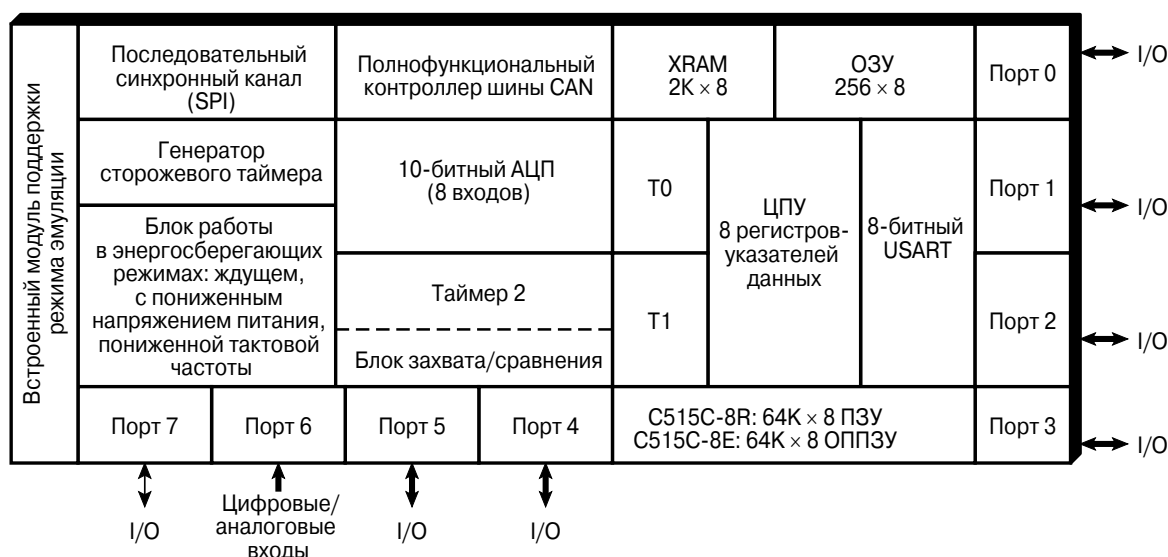


Рис. 7.20. Функциональная схема микроконтроллера C515C.

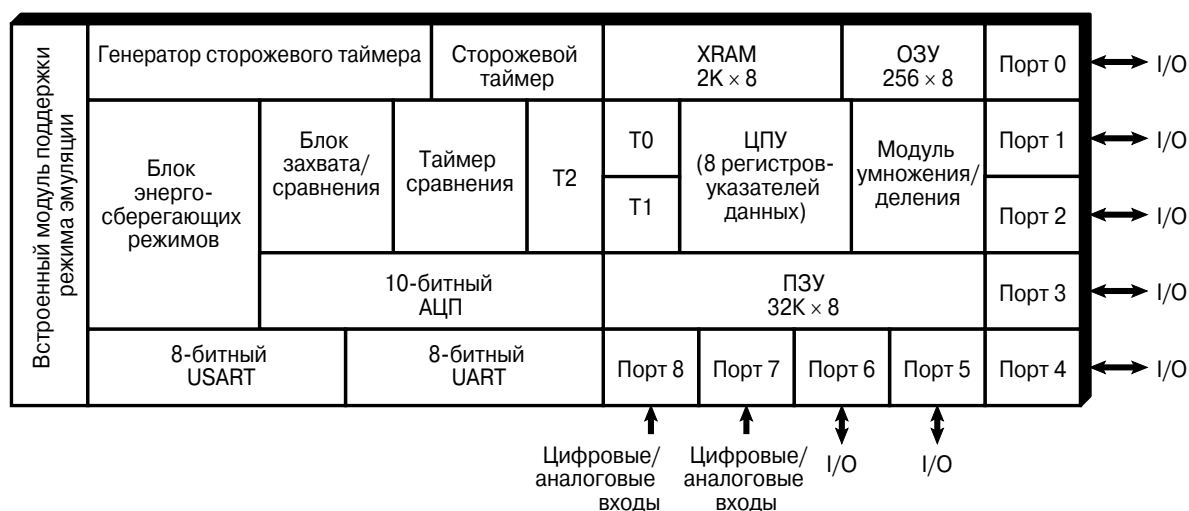


Рис. 7.21. Функциональная схема микроконтроллера C517.

- предоставляют пользователю эффективные средства для управления энергопотреблением и снижения потребляемого тока.

По мере возрастания сложности задач, решаемых встроенными системами управления, для их реализации требуются микроконтроллеры, вычислительная мощность и функциональность периферии которых значительно превышают возможности стандартного 8-битного микроконтроллера. Для удовлетворения потребности в подобных системах компания Infineon приняла решение разработать семейство 16-битных КМОП-микроконтроллеров, не задаваясь при этом целью обеспечить их совместимость с контроллерами предыдущих серий.

Естественно, в архитектуре 16-битных микроконтроллеров были использованы успешные программные и аппаратные решения, разработанные Infineon в процессе создания популярных 8-битных контроллеров.

7.3.2. Состав семейства 16-битных микроконтроллеров

Микроконтроллеры 16-битного семейства разрабатывались компанией Infineon с целью обеспечить соответствие требованиям, предъявляемым к высокопроизводительным системам управления реального времени. Архитектура этих микроконтроллеров была оптимизирована с точки зрения скорости исполнения команд и минимального времени реакции на внешние воздей-

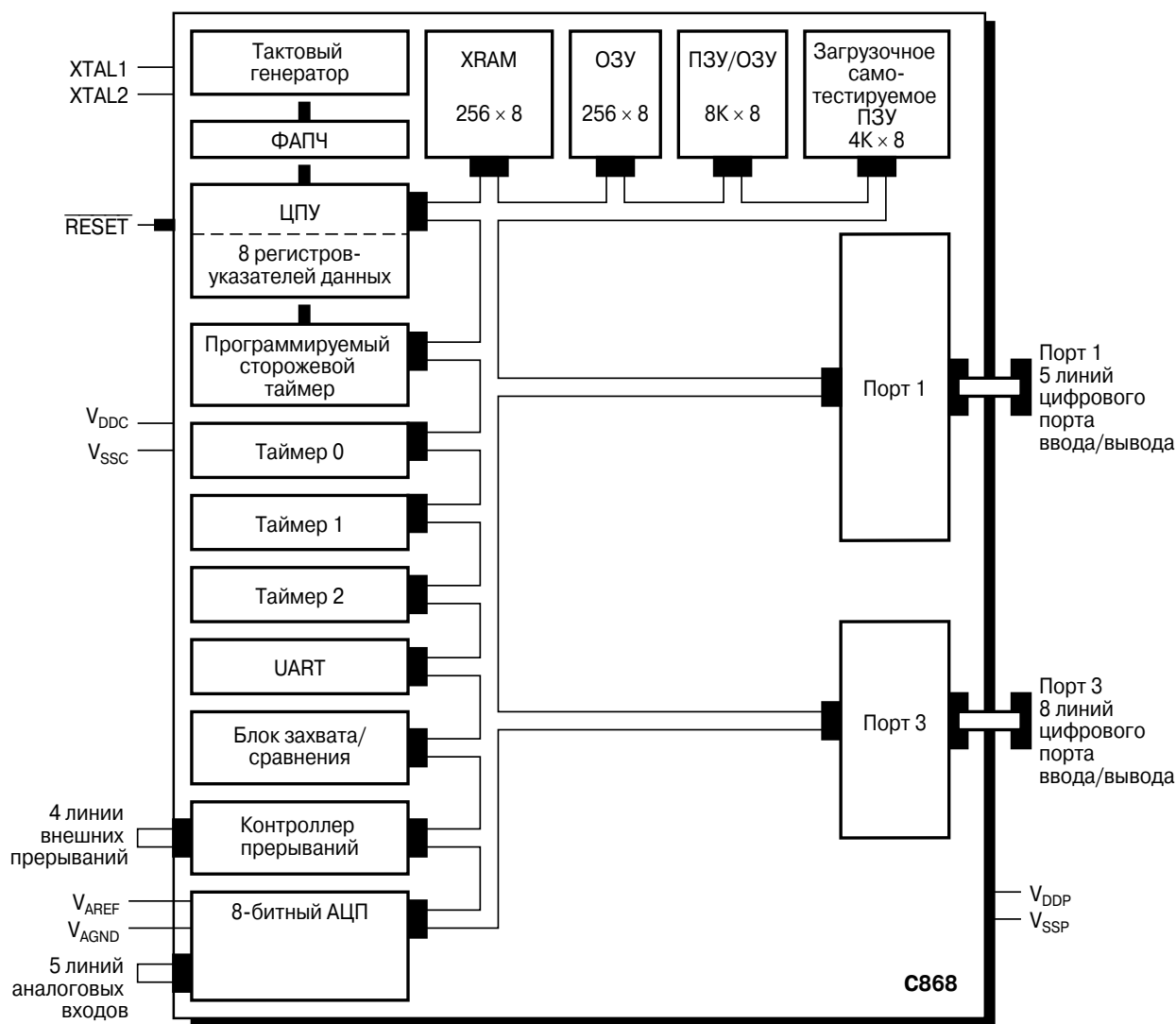


Рис. 7.22. Функциональная схема микроконтроллера C868.

ствия (прерывания). Использование встроенной интеллектуальной системы управления периферийными устройствами микроконтроллера позволило минимизировать уровень загрузки центрального процессора. Кроме того, при этом снизилась потребность в обмене данными с использованием внешних шин. Архитектура 16-битных микроконтроллеров отличается высокой адаптивностью, что обеспечивает возможность их применения в самых различных сферах, например в автомобильной электронике, в системах управления технологическими процессами или в контроллерах систем передачи данных.

Процессорное ядро семейства 16-битных микроконтроллеров Infineon разрабатывалось в рамках модульной концепции. Все процессоры данного семейства поддерживают систему команд, оптимизированную с

точки зрения эффективности управления (16-битные микроконтроллеры Infineon второго поколения поддерживают ряд дополнительных команд). Таким образом, можно быстро и легко производить модернизацию и внедрение новых микроконтроллерных систем, независимо от объема используемой памяти, технологии производства, различий в функциональных возможностях встроенной периферии и/или габаритах корпусов микроконтроллеров.

Концепция XBUS позволяет, в дополнение к стандартному набору встроенных периферийных устройств, интегрировать в чип микроконтроллера ряд специализированных (заказных) периферийных модулей, что даёт возможность наладить производство различных модификаций микроконтроллера, адаптированных под решение пользовательских задач.

Поскольку стоимость программного обеспечения для встроенных систем управления всё время возрастает, программисты предпочитают использовать для его написания языки высокого уровня. Такой подход позволяет значительно упростить процесс разработки, отладки и последующей технической поддержки программного обеспечения.

К первому поколению 16-битных микроконтроллеров компании Infineon принадлежат приборы семейства 80C166, концепция построения которых легла в основу архитектуры микроконтроллеров семейства C166. Представителями второго поколения этого семейства являются C165 и C167. Они обеспечивают более высокую производительность благодаря введению новых команд поддержки языков высокого уровня, расширению адресного пространства, увеличению объёма внутреннего ОЗУ и повышению эффективности управления устройствами, подключёнными к внешней шине.

В состав усовершенствованных микроконтроллеров второго поколения входят, например, такие функциональные блоки, как сверхбыстродействующее внутреннее ОЗУ, встроенный модуль CAN, интегрированная система ФАПЧ и т.д.

При проектировании эффективной встроенной системы управления может возникнуть необходимость в минимизации количества компонентов или в дополнении микроконтроллера теми или иными специализированными периферийными модулями. Проще всего для этого использовать технологию так называемой шины XBUS, поддержка которой предусмотрена архитектурой 16-битных микропроцессоров компании Infineon второго поколения. XBUS можно представить как «продолжение» внутрь микроконтроллера внешней системной шины, поэтому наличие XBUS облегчает интеграцию периферийных устройств в микроконтроллер за счёт использования стандартизированного интерфейса. Характерным примером устройства, в полной мере демонстрирующего достоинства такого подхода, является встроенный модуль CAN.

Микроконтроллер C165 фактически является «облегчённой» версией микроконтроллера C167, отличаясь меньшими габаритами корпуса и меньшим током потребления. Однако в нём отсутствуют АЦП, блок захвата/сравнения и модуль ШИМ.

Приборы серии C164 и некоторые из представителей серии C161 составляют третье поколение 16-битных микроконтроллеров Infineon, основным преимуществом которого по сравнению с предшествующими является наличие гибкой системы управления энергопотреблением. Эта система предусматривает реализацию ряда мер, позволяющих эффективно управлять энергопотреблением в некоторых специфических режимах работы микроконтроллера и тем самым снижать общее энергопотребление.

Дальнейшим развитием 16-битного семейства микроконтроллеров компании Infineon являются микроконтроллеры XC161, XC164 и XC167, образующие семейство XC166. Приборы данного семейства базируются на новом микропроцессорном ядре, которое оптимизировано под совместную работу с блоком умножения/деления (модулем MAC) и обеспечивает поддержку DSP-ориентированных команд.

Это позволяет радикально снизить время выполнения таких операций, как цифровая фильтрация сигналов и быстрое преобразование Фурье (БПФ). Микроконтроллеры данного семейства также обладают улучшенными характеристиками периферийной системы благодаря интегрированию в их состав новых периферийных блоков расширенной функциональности. Вместе с расширением модулей внутренней быстрой памяти это обеспечивает необходимые предпосылки для создания компактных высокопроизводительных систем за весьма небольшие дополнительные деньги.

Существуют различные модификации микроконтроллеров семейства XC166, отличающиеся типом внутренней памяти программ:

- с масочным ПЗУ;
- с флэш-памятью;
- с однократно программируемым ПЗУ (ОППЗУ);
- без ПЗУ.

Кроме того, микроконтроллеры семейства XC166 могут включать в себя те или иные специфические функциональные модули, иметь различные диапазоны рабочих температур и тактовые частоты и поставляться в корпусах различных типов.

В настоящее время продолжается проектирование всё новых модификаций микроконтроллеров семейства XC166. При этом следует понимать, что ни одна из модифи-

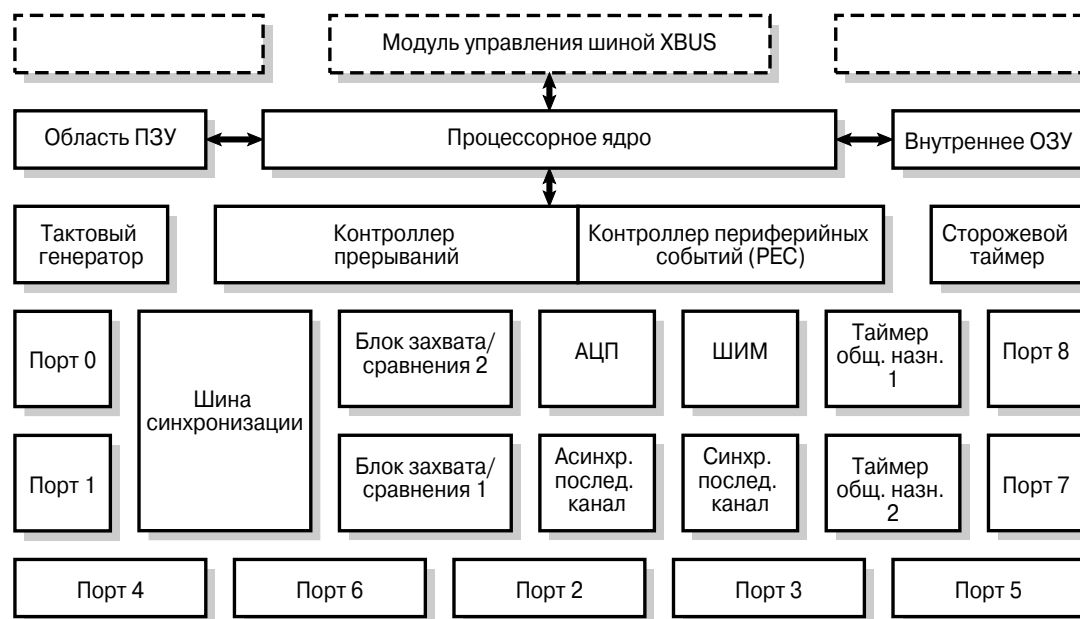


Рис. 7.23. Типичная функциональная схема микроконтроллера семейства C166.

каций этих приборов не сможет работать во всех возможных температурных диапазонах, перекрывать весь ряд допустимых тактовых частот, использовать все типы корпусов или типы памяти программ.

7.3.3. Обзор архитектуры микроконтроллеров семейства C166

Архитектура микроконтроллеров семейства C166 в отлично сбалансированной пропорции сочетает в себе положительные свойства как архитектуры RISC, так и архитектуры CISC (Рис. 7.23). В результате мы имеем высокопроизводительный микроконтроллер, который не только полностью отвечает современным требованиям, но и наверняка будет отвечать этим требованиям в течение ещё долгого времени. C166 — это мощный центральный процессор и множество встроенных модулей периферийных устройств, объединённых в единую систему весьма эффективным способом.

Одной из четырёх шин, обеспечивающих обмен данными и командами в микроконтроллерах семейства C166, является шина XBUS, которая есть не что иное, как внутреннее продолжение внешней системной шины микроконтроллера. Наличие этой шины позволяет стандартным образом интегрировать в чип специализированные периферийные модули, необходимые для создания заказных модификаций микроконтроллеров.

7.3.4. Организация памяти

16 Мбайт пространства памяти микроконтроллеров с архитектурой C166 разделено на 256 сегментов по 64 Кбайт или на 1024 страницы памяти объёмом по 16 Кбайт (Рис. 7.24). Объём доступной внешней памяти зависит от того, какая ширина была задана при конфигурировании адресных сегментов, а также, естественно, от количества доступных выводов порта 4. Доступ к большинству встроенных ресурсов микроконтроллера, например к регистрам периферийных устройств, к внутреннему ОЗУ, к XRAM и т.д., осуществляется через страницу памяти 3, расположенную в сегменте 0.

7.3.5. Основные концепции построения ЦПУ и средства их оптимизации

Основной блок ЦПУ состоит из четырёх-ступенчатого конвейера команд, 16-битного арифметико-логического устройства (АЛУ) и регистров специальных функций (SFR) (Рис. 7.25). Дополнительные аппаратные средства включают в себя модуль умножения/деления, генератор битовых масок и многорегистровое устройство циклического сдвига.

Различные блоки процессорного ядра оптимизированы, чтобы достичь наибольшей производительности и обеспечить максимальную гибкость в использовании микроконтроллера. Функциональные блоки процессорного ядра управляются сигнала-

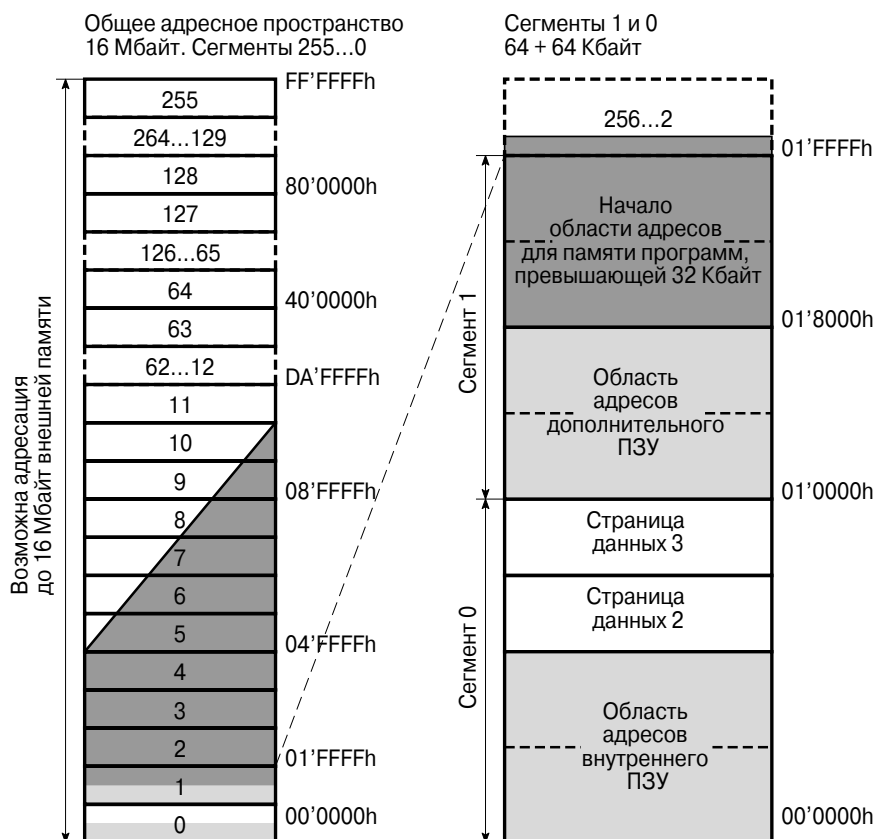


Рис. 7.24. Адресное пространство микроконтроллера семейства C166.

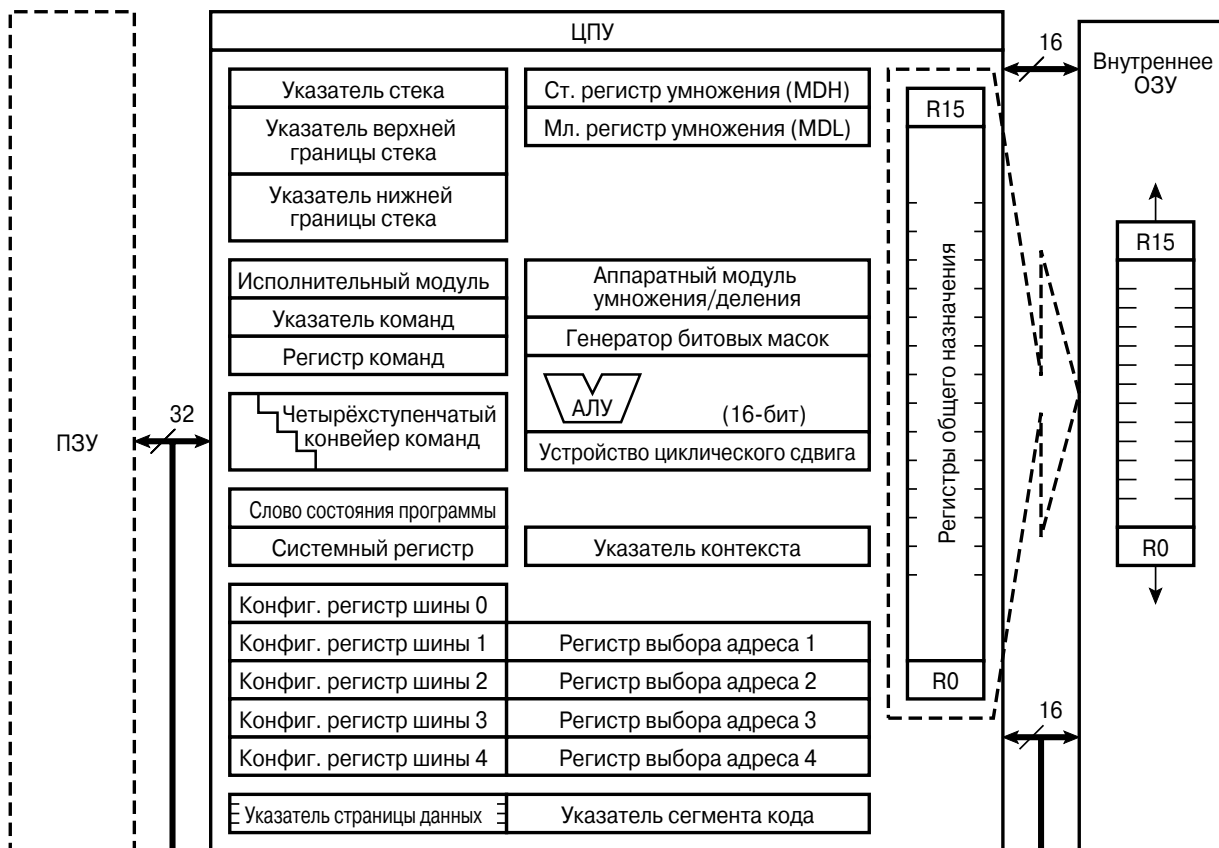


Рис. 7.25. Блок-схема ЦПУ микроконтроллера.

ми, поступающими от логической схемы декодирования команд. Основные характеристики этих блоков состоят в следующем:

1. Высокая скорость выборки и исполнения команд.
2. Высокопроизводительное арифметико-логическое устройство с возможностью обработки 8- и 16-битных данных.
3. Развитая система обработки битовых переменных и управления вводом/выводом.
4. Эффективная система организации ветвления программ, вызова подпрограмм и реализации программных циклов.
5. Единообразные и оптимизированные форматы команд.
6. Программируемая структура прерываний для многоуровневых приоритетов.

Все эти характеристики будут подробно рассмотрены ниже.

Высокая скорость выборки и исполнения команд

Применяемые в микроконтроллерах C166 аппаратные решения позволяют исполнять большинство команд в течение одного машинного цикла, который длится 2 периода тактовой частоты процессора ($2 \cdot 1/f_{CPU} = 4T_{CLK}$). Так, например, операции сдвига и циклического сдвига всегда выполняются в течение одного машинного цикла независимо от того, на какое количество битов должен быть сдвинут исходный операнд.

Команды ветвления, умножения и деления обычно требуют более одного машинного цикла. Однако и эти команды были оптимизированы. Команды ветвления, к примеру, требуют только одного дополнительного машинного цикла, если условие ветвления выполняется, а в процессе прохождения «пустых» программных циклов большинство команд ветвления не требуют дополнительных машинных циклов благодаря использованию так называемого кэширования (маскирования) переходов.

32/16-битное деление занимает 20 периодов тактовой частоты процессора (T_{CPU}), а умножение двух 16-битных операндов — $10 \cdot T_{CPU}$. Среднее время исполнения одной команды удаётся значительно сократить за счёт использования конвейера команд. Благодаря наличию конвейера процессорное ядро может обрабатывать различные участки командных последовательностей параллельно. Ниже перечислены четыре

фазы работы конвейера, использование которых позволяет оптимизировать работу процессорного ядра.

ВЫБОРКА — в этой фазе команда извлекается из внутреннего ПЗУ, ОЗУ или из внешней памяти, в зависимости от текущего значения счётчика команд.

ДЕКОДИРОВАНИЕ — в этой фазе ранее выбранная команда декодируется, и из памяти извлекаются необходимые для её исполнения операнды.

ИСПОЛНЕНИЕ — в этой фазе извлечённые из памяти операнды обрабатываются так, как это предусмотрено командой.

ОБРАТНАЯ ЗАПИСЬ — в этой фазе результат операции записывается в заданную область памяти.

Описанный выше конвейер команд обеспечивает увеличение скорости обработки команд и позволяет обслуживать большее количество задач и прерываний. В отсутствие конвейера процесс исполнения каждой команды занимал бы четыре машинных цикла.

Декодер команд

Декодирование команды начинается с момента появления сигналов на выходах ПЛА (программно-логического автомата), соответствующих выбранной команде. Не используется никакого микрокода, и дальнейшее управление каждой из ступеней конвейера осуществляется сигналами, которые были сохранены в управляющих регистрах ПЛА во время фазы декодирования команды. Иногда конвейер команд может находиться в состоянии ожидания; в основном это происходит, во время циклов ожидания при обращении к внешней памяти, в течение которых сигналы «удерживаются» в управляющих регистрах ПЛА. При исполнении команд микроконтроллера длительностью в несколько машинных циклов используются аппаратные механизмы инъекции (вставки) команд и контроля внутреннего состояния, которые соответствующим образом видоизменяют управляющие сигналы.

Высокопроизводительное 8- и 16-битное арифметико-логическое устройство

Все стандартные арифметические и логические операции реализуются в микроконтроллере с помощью 16-битного ариф-

метико-логического устройства (АЛУ). Кроме того, при операциях с байтами состояние АЛУ отображается значениями шестого и седьмого битов, что позволяет корректно выставлять значения флагов условий. Повышение точности вычислений обеспечивается благодаря использованию в АЛУ сигнала входного переноса CARRY-IN, который генерируется в результате предыдущих вычислений в рамках выполнения требуемой арифметической операции. Большинство внутренних исполнительных блоков АЛУ оптимизированы с целью достижения высокой производительности как при реализации 8-битных, так и 16-битных операций. В нормальном режиме, когда конвейер команд полностью загружен, за один машинный цикл выполняется одна команда. Исключение составляют лишь команды умножения и деления. Они реализуют усовершенствованный алгоритм Бута, обеспечивающий умножение 4-битных операндов и деление 2-битных операндов за один машинный цикл. С учётом того, что умножение и деление осуществляется с использованием регистровой пары 16-битных регистров, MDL и MDH, для вычисления результата перемножения двух 16-битных операндов или деления 32-битного операнда на 16-битный операнд требуется соответственно четыре и девять машинных циклов; ещё один машинный цикл занимает процесс начальной установки операндов и коррекции результата. Поскольку ход исполнения команд умножения и деления может быть приостановлен сигналами прерывания, необходимо обеспечить как можно более быструю реакцию микроконтроллера на возникновение прерывания. Существуют также команды увеличения плотности упаковки байтов в памяти с пословной адресацией и, напротив, команды знакового расширения, которые применяются при осуществлении арифметических операций с числами большого формата (имеющими размерность слова). Структура внутренней шины АЛУ при необходимости позволяет получать или принимать от периферийных устройств данные размерностью байт или слово. Набор соответствующих флагов автоматически обновляется в регистре PSW после каждой арифметической, логической, сдвиговой операции или операции пересылки данных. Наличие флагов позволяет организовывать ветвления программы в

зависимости от тех или иных условий. Проверка на соответствие условиям, заданным пользователем, поддерживается как для знаковых, так и для беззнаковых переменных. Состояние флагов автоматически сохраняется при входе в прерывание или в процедуру обработки ошибки. Все адреса, по которым должен будет производиться переход в ходе выполнения операций ветвления, вычисляются центральным АЛУ.

Наличие 16-битного регистра циклического сдвига позволяет осуществлять многократную инъекцию (вставку) битов в течение одного машинного цикла. Данный регистр аппаратно поддерживает операции циклического сдвига и арифметического сдвига (сдвиг с учётом знакового бита).

Расширенная обработка битовых переменных и управления вводом/выводом

Значительное число команд предназначено для работы с битовыми переменными. Эти команды служат для эффективного управления периферийными устройствами и контроля их состояния, что улучшает качество обработки данных. В отличие от других микроконтроллеров, в систему команд микроконтроллеров семейства C166 входят команды, предназначенные для операций с двумя операндами, расположенными непосредственно в адресном пространстве ОЗУ (т.е. значения этих операндов не нужно предварительно переписывать во временные флаги).

Для операций с битами могут использоваться те же самые логические команды, что и для операций со словами и байтами. Это даёт возможность пользователю сравнивать и изменять соответствующий управляющий бит (флаг) периферийного устройства, используя одну команду. Кроме того, микроконтроллер C166 поддерживает несколько команд побитового сдвига (таким образом, для осуществления операции сдвига одного бита не нужно создавать длинные последовательности команд). Все эти команды выполняются за один машинный цикл. Наконец, имеются несколько команд для работы с полями битовых переменных (когда несколько битов операнда могут быть модифицированы одной командой).

Эффективная система организации ветвления программ, вызова подпрограмм и реализации программных циклов

Поскольку программное обеспечение для микроконтроллеров включает в себя большое количество операций ветвления, соответствующие команды должны быть оптимизированы (т.е. дополнительный машинный цикл под их исполнение должен отводиться лишь в тех случаях, когда ветвление действительно осуществляется). Такая оптимизация достигается предварительным расчётом адреса команды ветвления ещё на этапе декодирования команды.

Для того чтобы сократить временные издержки, связанные с выполнением программных циклов, были разработаны следующие усовершенствования:

- Во-первых, для осуществления перехода предусмотрен один-единственный машинный цикл после первой итерации программного цикла. Это значит, что в процессе исполнения всей циклической процедуры будет потерян только один машинный цикл. В процедурах, завершение которых происходит после полного перебора команд, на выход из программного цикла требуется больше одного машинного цикла. Для организации программных циклов не предусмотрено специальных команд, а команды ветвления автоматически распознаются в процессе исполнения программного цикла.
- Во-вторых, при выполнении программного цикла конец таблицы определяется автоматически, что позволяет обойтись без включения в тело цикла двух команд сравнения. Наименьшее отрицательное число просто записывается в конец заданной таблицы, и ветвление осуществляется, когда достигнуто данное значение или было обнаружено значение, с которым проводится сравнение. Если одно из двух указанных условий выполнено, то программный цикл завершается. При этом предусмотрена возможность проверки условия, в соответствии с которым произошло завершение программного цикла.
- Третье усовершенствование обеспечивает более гибкое решение, чем пара команд «декрементирование» и «переход, если ноль», обычно используемых для

организации выхода из программного цикла в других микроконтроллерах. Используя команды сравнения и инкрементирования или декрементирования, пользователь может организовывать программные циклы, в которых переменные могут принимать любое заданное значение, что особенно удобно при реализации табличного поиска.

Детальная информация о состоянии системы сохраняется во внутреннем системном стеке. Это означает, что можно обойтись без команд, предназначенных для сохранения слова состояния системы при входе и возврате из процедур обработки прерывания или ошибки. Команда вызова подпрограммы сохраняет значение указателя команд в системном стеке, и времени на это уходит не больше, чем требуется для исполнения команды условного или безусловного перехода. Кроме того, существуют команды перехода и вызова подпрограмм с возможностью косвенной адресации. Этим обеспечивается поддержка команд множественного ветвления CASE, реализованных в виде ассемблерных макросов, или соответствующих команд в языках высокого уровня.

Совместимые и оптимизированные форматы команд

Для достижения оптимальной производительности при использовании конвейерной архитектуры был разработан набор команд с использованием принципов, характерных для архитектуры с сокращённым набором команд (RISC). Такой подход позволяет реализовать быстрое декодирование команд и операндов и сокращает время простоя конвейера. При разработке системы команд микроконтроллеров семейства C166 преследовались следующие цели:

1. Предусмотреть особые команды для выполнения таких регулярно осуществляемых операций, которые обычно реализовывались путём последовательного выполнения нескольких команд. Исключить обмен данными с промежуточными регистрами, такими как аккумулятор или флаг переноса. Обеспечить параллельное исполнение различных задач, например, при сохранении состояния системы в процессе входа в программу-обработчик прерывания или в другую подпрограмму.

2. Упростить кодирование команд, т.е. предусмотреть в формате команды стандартные поля для размещения операндов, а также исключить редко используемые сложные схемы адресации. Это позволяет сократить время исполнения команд и, кроме того, упрощает процесс разработки компиляторов и ассемблеров.
3. Длина (формат) наиболее часто используемых команд должна составлять одно 16-битное слово, а остальных команд — не более двух слов. Таким образом, размер каждой из команд, находящихся в памяти программ, будет кратен размеру слова (так называемое выравнивание по границе слова), что позволяет обойтись без сложных схем аппаратного выравнивания. А это, в свою очередь, расширяет область применения команд относительного ветвления.

Для того чтобы программист мог в полной мере задействовать высокопроизводительные аппаратные средства ЦПУ микроконтроллеров семейства C166, была разработана чрезвычайно функциональная система команд, в состав которой входят следующие классы команд:

- арифметические команды;
- логические команды;
- команды для работы с битовыми переменными;
- команды сравнения и управления программными циклами;
- команды сдвига и циклического сдвига;
- команды задания уровня приоритета;
- команды управления потоками данных;
- команды управления системным стеком;
- команды перехода и вызова подпрограмм;
- команды возврата из подпрограмм;
- команды управления режимами работы микроконтроллера;
- прочие команды.

В качестве операндов этих команд могут использоваться биты, байты и слова. Некоторые команды поддерживают преобразование (расширение) байтов в слова. При обращении к операндам может использоваться прямая, косвенная и непосредственная адресация.

Система прерываний с программируемой многоуровневой структурой приоритетов

Для того чтобы микроконтроллеры семейства C166 могли работать с большим количеством источников прерываний, в сис-

тему прерываний были внесены следующие улучшения:

1. Был разработан контроллер периферийных событий (ПЕС). Его применение позволяет разгрузить ЦПУ от обработки большинства запросов на прерывание. Потери времени, связанные с входом и выходом из прерывания или программы обработки ошибки, были устранены за счёт осуществления управляемой прерыванием передачи данных размером байт или слово между любыми двумя точками адресного пространства в пределах нулевого сегмента памяти. Процесс передачи занимает один машинный цикл, при этом возможно инкрементирование регистров-указателей источника или назначения. Таким образом, в ходе обработки прерывания контроллером ПЕС у исполняющейся в данный момент основной программы будет «украден» один-единственный машинный цикл.
2. Контроллер прерываний имеет большое количество уровней приоритета; тому или иному прерыванию может быть присвоен любой требуемый уровень приоритета. Прерывания можно объединять в группы, чтобы программы обработки этих прерываний не оказывали влияния друг на друга. Каждому из возможных источников прерываний соответствует свой управляющий регистр, в состав которого входят флаг запроса на прерывание, флаг разрешения прерывания и битовое поле, используемое для задания уровня приоритета. Программа обработки прерывания может быть приостановлена только при поступлении запроса на прерывание с более высоким уровнем приоритета. Стандартная схема обработки прерываний организована таким образом, что под адрес программы-обработчика для каждого из возможных источников прерывания зарезервировано определённое место в адресном пространстве микроконтроллера (вектор прерывания).
3. Микроконтроллер имеет несколько независимых банков регистров. Это даёт пользователю возможность разместить до 16 регистров общего назначения в любом удобном месте ОЗУ. Для переключения с одной задачи на другую (с одного банка регистров на другой) требуется всего одна команда длительностью в один машинный цикл.

4. В микроконтроллерах семейства C166 разрешены прерывания в процессе исполнения команд, занимающих несколько машинных циклов (например, команд умножения и деления). Благодаря этому удалось сократить время задержки при обработке прерываний. Время реакции на прерывание (если запрос на это прерывание поступает в ходе исполнения команд из внутренней памяти) находится в диапазоне 5...10 периодов f_{CPU} , т.е. микроконтроллер способен исключительно быстро реагировать на любые недетерминированные события. Входы быстрых внешних прерываний микроконтроллера опрашиваются в каждом машинном цикле, что позволяет обнаруживать даже очень быстро меняющиеся внешние сигналы.

В микроконтроллерах семейства C166 реализован ещё один превосходный механизм идентификации и обработки исключительных ситуаций или ошибок, возникающих в процессе работы системы, — так называемое системное прерывание («аппаратная ловушка»). При возникновении системного прерывания в микроконтроллере немедленно генерируется немаскированный запрос на его обработку, как и при выполнении стандартной задачи обработки внешнего прерывания (т.е. происходит передача управления по адресу, указанному в соответствующем векторе прерывания). Возникновение системного (аппаратного) прерывания индицируется состоянием соответствующего бита в регистре флагов TFR, и это событие приостанавливает исполнение любой текущей программы, за исключением уже запущенной программы обработки системного прерывания с более высоким приоритетом. В то же время, выполнение задачи по обработке аппаратного прерывания не останавливается при возникновении программного (обычного или PEC) прерывания. Для того чтобы это произошло, необходимо выполнить команду Tpar, задавая в качестве параметра индивидуальный номер аппаратной ловушки (номер прерывания).

7.3.6. Встроенные ресурсы микроконтроллера

Микроконтроллеры семейства C166 характеризуются наличием мощных систем-

ных ресурсов, интегрированных на одном кристалле с ЦПУ. Такая комбинация ресурсов обеспечивает высокую производительность микроконтроллеров.

Ниже в данной главе рассматриваются ресурсы, доступные для использования на момент написания книги. Однако не исключено, что не все из описанных ресурсов будут присутствовать в конкретных моделях микроконтроллеров семейства C166.

Контроллер периферийных событий (PEC) и управление обработкой прерываний

Использование контроллера периферийных событий (Peripheral Event Controller — PEC) позволяет свести ответ на запрос на прерывание к операции однократной передачи данных (слова или байта). Эта операция занимает всего один машинный цикл, а сохранять и затем восстанавливать состояние системы не требуется. В каждом машинном цикле блок управления прерываниями назначает каждому из источников прерываний свой уровень приоритета. При наличии прерывания, обслуживаемого PEC, начинается передача данных. При обнаружении запроса на обработку прерывания в первую очередь проверяется хранящийся в регистре PSW текущий уровень приоритета прерываний, для того чтобы определить, не обрабатывается ли в настоящий момент прерывание с более высоким уровнем приоритета. Если запрос на обработку прерывания удовлетворён, то текущее состояние процессора сохраняется во внутреннем системном стеке, и происходит передача управления по соответствующему этому периферийному устройству вектору прерывания.

Контроллер периферийных событий содержит набор регистров специальных функций, в которых для каждого из восьми возможных каналов передачи хранятся биты управления и сведения о длине передаваемого пакета данных. Кроме того, PEC использует зарезервированную за ним область ОЗУ для хранения адресов источников данных и адресов их назначения. Управление контроллером периферийных событий осуществляется таким же образом, как и всеми остальными периферийными устройствами микроконтроллера — с помощью регистров специальных функций, в которых сохраняется конфигурация для каждого из каналов передачи данных.

Счётчик передаваемых данных контроллера периферийных событий декрементируется в фоновом режиме при каждом сеансе передачи данных, за исключением режима непрерывной передачи. Когда значение счётчика становится равным нулю, осуществляется переход по вектору обычного прерывания, источник которого связан с соответствующим каналом. РЕС-прерывания очень хорошо подходят, например, для управления процессом записи данных из регистров в таблицы, размещённые в памяти (и наоборот). Каждый из восьми каналов РЕС позволяет осуществлять такую, управляемую прерываниями передачу данных.

Распределение памяти

Адресное пространство памяти микроконтроллеров семейства C166 сконфигурировано в соответствии с фон-неймановской архитектурой, согласно которой память программ, память данных, регистровая память и адреса портов ввода/вывода должны находиться в пределах одного линейного адресного пространства объёмом до 16 Мбайт. При обращении к пространству памяти оно может рассматриваться как множество байтов или множество двухбайтных слов. Обращение к некоторым из областей внутренней памяти может производиться побитно.

Внутреннее 16-битное ОЗУ (IRAM) обеспечивает быстрый доступ к регистрам общего назначения (GPR), пользовательским данным (переменным) и системному стеку. Эта область ОЗУ может также использоваться и для хранения кода программы. Хорошо продуманная схема адресации предоставляет пользователю гибкие возможности по размещению во внутреннем ОЗУ банков регистров и оптимизирует процедуры высвобождения пространства ОЗУ для последующего размещения данных пользователя.

ЦПУ работает с текущим набором регистров, содержащим до 16 выровненных по границе слова и/или байта регистров общего назначения. Физически они расположены во внутреннем ОЗУ. Регистр указателя контекста (Context Pointer — CP) содержит адрес активного (текущего) банка регистров.

Количество банков регистров ограничено только доступным объёмом внутреннего ОЗУ. Адресные пространства различных банков регистров могут перекрываться, что облегчает обмен параметрами (контекстом) между ними.

Системный стек имеет размер 512/1024/1536 слов в зависимости от объёма внутреннего ОЗУ; допускается его использование для хранения промежуточных данных. Организация доступа ЦПУ к содержимому системного стека осуществляется с помощью указателя стека (SP — Stack Pointer). При каждом обращении к нему содержимое двух выделенных регистров специальных функций (STKOV и STKUN) сравнивается в фоновом режиме со значением, находящимся в указателе стека, чтобы определить, не произошел ли выход за верхнюю или нижнюю границу стека. Аппаратная привязка выбранной области памяти к её фактическому расположению происходит во внутреннем дешифраторе адресов памяти, что позволяет осуществлять прямую или косвенную адресацию памяти и получать желаемые данные без использования промежуточных регистров и специальных команд.

Расположенное непосредственно на кристалле микроконтроллера 16-битное XRAM (расширенное ОЗУ) обеспечивает пользовательской программе быстрый доступ к данным (переменным), пользовательскому стеку и коду программ. XRAM входит в состав так называемой X-периферии (т.е. расширенной периферии) и с точки зрения программного обеспечения является частью внешнего ОЗУ. Из-за этого невозможно задействовать данную область памяти для размещения банков регистров, а также использовать при обращении к ней побитовую адресацию.

Опционально на кристалле может размещаться также внутреннее ПЗУ/ОППЗУ/флэш-память, предназначенные для хранения кода программы и констант. Эта область памяти соединяется с ЦПУ 32-битной шиной данных, т.е. команда размером 2 слова (4 байт) может быть полностью извлечена из памяти программ за один машинный цикл. ПЗУ (Read Only Memory — ROM) программируется масочным способом на заводе при производстве микроконтроллера, тогда как однократно программируемое ПЗУ, или ОППЗУ (One Time Programmable ROM — OTP ROM) и флэш-память могут быть запрограммированы непосредственно в приложении. Размещение программы во внутренней (расположенной на кристалле микроконтроллера) памяти программ обуславливает наиболее высокую скорость её выполнения.

Для размещения регистров специальных функций зарезервированы 1024 байт адресного пространства. Первые 512 байт отведены под стандартный блок регистров специальных функций (SFR), а оставшиеся 512 байт представляют собой расширенную область регистров специальных функций (ESFR).

Регистры (E)SFR имеют разрядность, равную одному слову, и используются как управляющие и функциональные регистры различных встроенных ресурсов. Незадействованные адреса (E)SFR зарезервированы для будущих модификаций микроконтроллеров семейства C166 с расширенными функциями.

7.3.7. Интерфейс внешней шины

Часто пользователю не хватает объёма внутренней памяти программ или памяти данных микроконтроллера. Для того чтобы расширить её до потенциально возможных 16 Мбайт, к микроконтроллеру через внешнюю шину могут быть подключены дополнительные модули ПЗУ и/или ОЗУ. Применение интегрированного в структуру микросхемы контроллера внешней шины (External Bus Controller — EBC) обеспечивает максимальную гибкость при организации доступа к внешней памяти и/или периферийным устройствам. Вид шины (мультиплексированная/немультиплексированная), её ширина, или разрядность (8 бит/16 бит) и даже временные характеристики цикла обращения к памяти (время ожидания, временные задержки сигналов) могут быть выбраны независимо друг от друга для пяти различных диапазонов адресов. Это позволяет получать прямой доступ к различным видам памяти и периферийных устройств с максимальной эффективностью. Если микроконтроллер работает не в однокристалльном режиме, когда для его функционирования не требуется внешней памяти, то EBC может управлять доступом к внешним устройствам в одном из перечисленных ниже режимов работы:

- 16/18/20/24-битный адрес, 16-битные данные, немultipлексированная шина;
- 16/18/20/24-битный адрес, 8-битные данные, немultipлексированная шина;
- 16/18/20/24-битный адрес, 16-битные данные, multipлексированная шина;
- 16/18/20/24-битный адрес, 8-битные данные, multipлексированная шина.

В немultipлексированных режимах работы шины порт 1 используется для передачи адреса, а порт 0 — для ввода/вывода данных. В multipлексированных режимах работы шины порт 0 используется как для передачи адреса, так и для ввода/вывода данных. Порт 4 используется для передачи старших битов адреса (A16...), если эти адреса были выбраны.

Важные временные характеристики внешней шины (время ожидания, длительность сигнала ALE, задержки при чтении/записи) теперь могут быть запрограммированы, что даёт пользователю возможность варьировать их в зависимости от используемых типов памяти и периферийных устройств. Обращение к очень медленным устройствам памяти и периферийным устройствам осуществляется с помощью специальной функции Ready.

Для приложений, требующих для своей работы менее 64 Кбайт адресного пространства, может быть выбрана несеgmentированная модель памяти, в рамках которой вся доступная память может быть адресована с помощью 16-битного адреса (A0...A15). При этом не будет необходимости задействовать порт 4 для вывода старших битов адреса (A16...Axx), которые используются в сегментированной модели памяти.

Встроенная шина XBUS является внутренним «отображением» внешней системной шины, и её использование позволяет организовать доступ к интегрированным специализированным периферийным модулям тем же способом, что и к внешним периферийным устройствам. Подобный принцип организации обмена данными обеспечивает стандартизированный подход к подключению специализированных периферийных модулей. Примерами такого рода X-периферии являются встроенные модули памяти XRAM, контроллера интерфейса I²C и контроллера шины CAN.

7.3.8. Встроенные периферийные модули

У микроконтроллеров семейства C166 периферийные функции отделены от процессорного ядра. Такая структура обеспечивает возможность параллельного исполнения максимально возможного количества задач и позволяет добавлять или убирать периферийные функциональные модули из любого контроллера этого семейства без не-

обходимости вносить какие-либо изменения в процессорное ядро. Каждый функциональный модуль работает независимо от других; обмен данными осуществляется через общие шины данных. Встроенные периферийные модули управляются путём записи соответствующих значений в регистры специальных функций (SFR). Эти регистры располагаются как в стандартной области адресного пространства (00'FE00h...00'FFFFh), так и в расширенной (ESFR) области адресов памяти (00'F000h...00'F1FFh). Регистры и области памяти, назначенные для обслуживания встроенных периферийных модулей, подключённых к шине XBUS (X-периферии), расположены в отдельных страницах памяти. Через эти периферийные модули ЦПУ обменивается информацией с внешним миром, а способ их подключения к шине XBUS позволяет интегрировать в состав микроконтроллера функциональные блоки, которые в ином случае пришлось бы делать внешними.

Базовый набор периферийных модулей микроконтроллеров семейства C166 включает в себя:

- порты ввода/вывода с большим количеством альтернативных функций;
- два блока таймеров общего назначения (GPT1 и GPT2);
- сторожевой таймер;
- последовательные интерфейсы (ASC, SSC);
- модули захвата/сравнения (CAPCOM1, CAPCOM2, CAPCOM6);
- четырёхканальный блок широтно-импульсной модуляции (ШИМ);
- АЦП;
- часы реального времени.

К шине XBUS подключается следующая периферия:

- высокоскоростной SSP (синхронный последовательный порт);
- дополнительный USART (ASC1);
- интерфейс I²C (400 Кбит/с, 10-битный адрес);
- CAN-интерфейс (Rev.2.0B active, full-CAN/basic-CAN);
- USB-интерфейс (максимальная скорость, 8 конечных точек);
- модуль последовательной передачи данных (SDLM), соответствующий стандарту J1850 Class 2.

Примечание. Вполне возможно, что не все перечисленные выше периферийные

модули включены в состав каждого из микроконтроллеров семейства C166. Кроме того, одни и те же периферийные модули выпускаются в различных модификациях.

Периферийные интерфейсы

Встроенные периферийные модули поддерживают два типа интерфейсов: интерфейс ЦПУ и интерфейс внешних устройств. Взаимодействие между процессором и периферийными модулями осуществляется с помощью регистров специальных функций (SFR) и системы прерываний. Регистры специальных функций предназначены для управления, контроля и обмена данными с периферией. Прерывания генерируются периферийными модулями в тех случаях, когда в процессе их работы возникает так называемая исключительная ситуация (например, завершение операции, ошибка и т.п.)

Для взаимодействия с внешним оборудованием используются отдельные линии параллельных портов ввода/вывода, функции которых назначаются в соответствии с требованиями периферийных устройств. Они могут использоваться как выходы для управления внешним оборудованием со стороны встроенного периферийного модуля микроконтроллера, либо как входы для сигналов управления встроенным периферийным модулем, поступающих от внешнего оборудования. Это пример реализации так называемых альтернативных функций выводов порта, в том смысле, что их работа в качестве входов/выходов встроенного периферийного модуля альтернативна обычной функции цифрового порта ввода/вывода.

Временные характеристики периферийных модулей

Взаимодействие ЦПУ и встроенных периферийных модулей микроконтроллера основано на использовании сигналов тактовой частоты ЦПУ (f_{CPU}). Эти сигналы формируются на выходе внутреннего генератора микроконтроллера, и их частота определяется параметрами внешнего кварцевого резонатора или внешними тактовыми импульсами. Тактовый сигнал, предназначенный для управления периферийными устройствами, формируется независимо от тактового сигнала, предназначенного для синхронизации работы ЦПУ. В режиме ожидания генерация тактового сигнала

ЦПУ приостанавливается, в то время как периферийные модули продолжают функционировать. В свою очередь, блок управления энергопотреблением может временно приостанавливать работу группы периферийных модулей, отключая подаваемый на них тактовый сигнал. ЦПУ может получить доступ к регистрам специальных функций (SFR) периферийных модулей один раз за такт. Если пользовательская программа попытается осуществить запись в регистр SFR периферийного модуля в то время, когда в этот регистр производит запись периферийный модуль, то действия программы будут обладать более высоким приоритетом, чем действия периферии. Более подробные описания временных характеристик периферийных модулей можно найти в соответствующих разделах технических описаний микроконтроллеров.

Параллельные порты

Входы и выходы микроконтроллеров семейства C166 сгруппированы в порты ввода/вывода. Каждая из линий порта поддерживает индивидуальную (побитовую) адресацию и с помощью регистра направления может быть сконфигурирована как вход или выход. Порты ввода/вывода являются полностью двунаправленными. При конфигурировании в качестве входов они переводятся в высокоимпедансное («третье») состояние.

Выходные драйверы некоторых портов ввода/вывода могут быть индивидуально (побитно) запрограммированы через управляющие регистры как двухтактные каскады или как каскады с открытым стоком. В процессе внутреннего сброса микроконтроллера все выходы его портов конфигурируются как входы. Входные каскады некоторых портов ввода/вывода могут быть сконфигурированы с использованием их управляющих регистров таким образом, чтобы соответствовать ТТЛ- либо КМОП-уровням.

Для большинства выводов портов предусмотрены программируемые альтернативные функции. Эти выводы могут, например, работать как линии передачи адреса и данных при обращении к внешнему устройству памяти, входы выбора микросхемы (CS), входы быстрых внешних прерываний и тактовых сигналов, входы/выходы таймеров, линии последовательных интерфейсов или аналоговые вхо-

ды АЦП. Все выводы порта, не имеющие альтернативных функций, могут быть использованы в качестве стандартных линий ввода/вывода общего назначения.

Таймеры общего назначения (GPT)

Блок таймеров GPT представляет собой гибкую многофункциональную структуру на основе таймера/счётчика, которая применяется при решении многих задач, связанных с измерением времени. С его помощью могут быть определены временные характеристики и произведён подсчёт числа событий, измерены длительность импульса и коэффициент заполнения (скважность) импульсной последовательности, а также сгенерированы импульсы или осуществлено перемножение импульсов. Каждый из таймеров блока GPT может функционировать независимо от других в одном из четырёх основных режимов или же работать совместно с другими таймерами из этого же модуля. Поддерживаются следующие режимы работы: таймер, стробируемый таймер, таймер/счётчик, а также (для таймеров GPT1) режим интерфейса инкрементных датчиков. В режиме таймера входной тактовый сигнал формируется путём деления внутреннего тактового сигнала ЦПУ на программируемый коэффициент, тогда как в режиме счётчика синхронизация таймера осуществляется внешними сигналами (через вход TxIN). Режим таймера со стробированием используется для измерения длительности входных импульсов или коэффициента заполнения импульсной последовательности, при этом таймер управляется внешними стробирующими сигналами, поступающими на вход TxIN.

В режиме интерфейса инкрементных датчиков таймеры GPT1 могут быть напрямую подключены к квадратурным выходам A и B инкрементного датчика через соответствующие входы TxIN и TxEUD. Из этих сигналов модуль GPT1 формирует счётные импульсы и сигнал направления счёта, в результате чего содержимое таймера Tx соответствует положению датчика. Третий сигнал датчика (TOP0) может быть подключён к входу прерываний.

Направление счёта для каждого таймера (прямое/обратное) задаётся программно и может изменяться динамически подачей внешнего сигнала (TxEUD), например, чтобы упростить отслеживание положения.

На выходе базового таймера каждого из модулей GPT (T3 для GPT1 и T6 для GPT2) имеется триггерная защёлка (TxOTL), которая изменяет своё состояние при каждом переполнении таймера (как при прямом, так и при обратном счёте). Кроме того, сигналы с выхода этих защёлок используются при объединении базовых таймеров с соответствующими дополнительными таймерами для формирования 32/33-битных таймеров/счётчиков, позволяющих с высокой точностью измерять временные интервалы большой длительности.

Микроконтроллеры семейства C166 поддерживают большое количество различных режимов захвата/перезагрузки. Они предназначены для перезагрузки таймеров либо для реализации функции захвата (фиксации текущего значения таймера). Захват/перезагрузка осуществляется под управлением внешнего сигнала или по заданному фронту (нарастающему или спадающему) сигнала на выходе триггерной защёлки TxOTL.

Максимальное разрешение таймеров модуля GPT1 составляет 8 тактов сигнала ЦПУ ($= 16 T_{CLK}$). Используя таймер GPT2, который имеет максимальное разрешение 4 такта сигнала ЦПУ ($= 8 T_{CLK}$), можно с большей точностью измерять временные интервалы и определять момент наступления внешнего события.

Сторожевой таймер

Сторожевой таймер — это важный элемент обеспечения безопасности, основной функцией которого является предотвращение опасности длительной некорректной работы микроконтроллера. После сброса микроконтроллера сторожевой таймер всегда находится в активном режиме, отключить его можно только в интервале времени между сбросом микроконтроллера и исполнением команды EINIT (End of Initialization — конец инициализации). Таким образом, процедура начальной загрузки микроконтроллера всегда проходит под контролем сторожевого таймера. При разработке прикладного программного обеспечения всегда следует учитывать необходимость обслуживания сторожевого таймера, не допуская его переполнения. Если (например, вследствие аппаратной или программной ошибки) эта задача не будет реализована, то произойдёт переполнение сторожевого таймера, что вызовет сброс

микроконтроллера; при этом выход $\overline{RSTOUT}$ будет установлен в НИЗКОЕ состояние, разрешая тем самым процесс аппаратного сброса внешних устройств.

Сторожевой таймер представляет собой 16-битный таймер с входной частотой, равной тактовой частоте ЦПУ, делённой на 2/4.../128/256. Старший байт регистра счётчика сторожевого таймера может быть установлен в заранее заданное значение (оно хранится в регистре WDTREL), что позволяет более точно задавать длительность отслеживаемого интервала времени. Каждый раз, когда прикладная программа обращается к регистрам сторожевого таймера, производится перезагрузка указанного выше значения в старший байт счётчика.

Каналы последовательного обмена данными

Последовательный обмен данными с другими микроконтроллерами, процессорами, оконечными устройствами или внешним периферийным оборудованием реализован с помощью нескольких последовательных интерфейсов, обладающих различными функциональными характеристиками.

Интерфейс ASC обратно совместим с последовательными портами 8-битных микроконтроллеров компании Infineon и поддерживает дуплексный асинхронный обмен на скорости до 625 Кбит/с и полудуплексный синхронный обмен на скорости до 2.5 Мбит/с при тактовой частоте процессора, равной 20 МГц. Для получения всех необходимых для работы интерфейса стандартных частот используется специальный генератор, благодаря чему исключается необходимость подстройки частоты тактового генератора микроконтроллера.

Для передачи, приёма данных и обработки ошибок предусмотрены отдельные вектора прерывания. В асинхронном режиме могут передаваться и приниматься 8- и 9-битные пакеты в сопровождении одного старт-бита и двух стоп-битов. Для межпроцессорного обмена предусмотрен встроенный механизм, позволяющий различать байты адреса и байты данных (8 бит данных плюс бит выхода из спящего режима).

В синхронном режиме интерфейс ASC передаёт или принимает байты (8 бит) синхронно с тактовым сигналом сдвига, который он сам же и генерирует. В интерфейсе ASC предусмотрено, что младший знача-

ший бит всегда передаётся или принимается первым.

Тестирование интерфейса осуществляется в так называемом петлевом режиме. Надёжность передачи данных повышается благодаря наличию целого ряда дополнительных аппаратных средств обнаружения ошибок. Бит контроля чётности, автоматически генерируемый при передаче данных, может быть использован для проверки целостности данных на приёмной стороне. Блок обнаружения ошибок обеспечивает распознавание кадров данных с потерянными стоп-битами. Если последний принятый символ не был считан из буфера приёмника до того, как завершился приём следующего символа, то генерируется ошибка переполнения.

Синхронный интерфейс SSC поддерживает дуплексный обмен на скорости до 5 Мбит/с при тактовой частоте процессора 20 МГц. Он может быть сконфигурирован таким образом, чтобы обеспечить соединение периферийных устройств по последовательному каналу. Все необходимые для работы интерфейса стандартные тактовые частоты обеспечивает специальный генератор, тем самым исключается необходимость подстройки частоты тактового генератора микроконтроллера. Предусмотрены отдельные векторы прерывания для таких событий, как передача, приём данных и обработка ошибок.

При использовании интерфейса SSC символы размером от 2 до 16 бит могут передаваться и приниматься синхронно с тактовым сигналом сдвига, который может быть как сгенерирован самим интерфейсом SSC (режим ведущего), так и поступать от внешних устройств (режим ведомого). В интерфейсе SSC предусмотрена возможность выбора, какой бит в байте данных будет передаваться в линию или приниматься из линии первым — младший значащий бит (LSB) или старший значащий бит (MSB). Кроме того, имеется возможность выбора фронта (нарастающего или спадающего) тактовых импульсов, по которому будет осуществляться приём и передача данных, а также полярности тактового сигнала.

Наличие дополнительных аппаратных средств обнаружения ошибок повышает надёжность передачи данных. Контроль ошибок при приёме и передаче обеспечивает корректность работы буфера данных, а про-

верка угловой частоты и скорости последовательной передачи позволяет обнаруживать ошибочные данные.

Интерфейс SSP поддерживает полудуплексный синхронный обмен на скорости до 10 Мбит/с при тактовой частоте процессора, равной 20 МГц. Он может быть сконфигурирован таким образом, чтобы обеспечить обмен данными между последовательно подключёнными периферийными устройствами. Все необходимые для работы интерфейса стандартные тактовые частоты вырабатываются специальным генератором, тем самым исключается необходимость подстройки частоты тактового генератора микроконтроллера. Предусмотрены отдельные векторы прерывания для таких событий, как передача, приём данных и обработка ошибок.

Синхронно с тактовым сигналом сдвига, генерируемым блоком интерфейса SSP в режиме ведущего, может передаваться 1...3 байт данных или приниматься один байт после передачи 1...3 байт данных. Предусмотрена возможность выбора, какой бит в байте данных будет передаваться в линию или приниматься из линии первым — младший значащий бит (LSB) или старший значащий бит (MSB). Кроме того, имеется возможность выбора фронта (нарастающего или спадающего) тактовых импульсов, по которому будет осуществляться приём и передача данных, а также полярности тактового сигнала.

В режиме непрерывной передачи несколько байтов данных может быть передано последовательно, без сопровождения дополнительной адресной или статусной информации. Может быть задействовано до двух сигналов выбора микросхемы, чтобы обеспечить возможность прямой передачи данных к одному или двум периферийным устройствам.

Блоки захвата/сравнения CAPCOM1/2

Два блока CAPCOM микроконтроллера поддерживают до 32 каналов генерирования временных последовательностей, с максимальным разрешением до 8 периодов тактового сигнала ($8 T_{CLK}$). Блоки CAPCOM обычно используются в тех случаях, когда требуется обеспечить высокое быстродействие при работе с портами ввода/вывода, например при генерации импульсных сигналов или сигналов произ-

вольной формы, формировании сигналов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), цифро-аналоговом преобразовании, программном управлении временными характеристиками сигналов или при подсчёте количества импульсов в интервале времени между внешними событиями.

Два 16-битных таймера и соответствующие им регистры (в которых хранятся данные для перезагрузки таймеров) создают две независимые базы отсчёта временных интервалов, необходимые для работы системы регистров захвата/сравнения.

В качестве тактовых сигналов для блоков CAPCOM могут использоваться как внутренние тактовые сигналы ЦПУ (после соответствующих преобразований), так и сигналы, генерирующиеся при переполнении (сверху или снизу) таймера T6 в блоке GPT2. Это позволяет в широких пределах варьировать временные параметры и разрешающую способность таймеров, приводя их в соответствие с требованиями, предъявляемыми теми или иными практическими приложениями. Кроме того, один из таймеров каждого блока CAPCOM имеет специальный вход подсчёта внешних событий, что обеспечивает возможность управления регистрами захвата/сравнения с помощью внешних сигналов.

Каждая из двух групп регистров захвата/сравнения состоит из 16 комбинированных регистров захвата/сравнения; каждый из которых может быть индивидуально «привязан» к одному из двух таймеров соответствующего блока CAPCOM и запрограммирован на выполнение функции захвата или сравнения. Каждый регистр связан с выводом порта, который может работать в качестве входа, если задействован режим захвата, или выхода, если задействован режим сравнения (состояние этого выхода показывает, произошло ли событие сравнения).

Если для регистра захвата/сравнения был выбран режим захвата, то текущее значение связанного с ним таймера будет сохранено (захвачено) в этом регистре в ответ на наступление внешнего события на связанном с ним входе. Кроме того, может быть сгенерирован соответствующий запрос на прерывание. Срабатывание от внешнего события может происходить по нарастающему или по спадающему фронту сигнала на входе, либо осуществляться по обоим фронтам.

Содержимое всех регистров, выбранных для одного из пяти методов сравнения, будет непрерывно сравниваться с содержимым связанного с ним таймера. При совпадении текущего значения таймера с содержимым регистра захвата/сравнения выполняется то или иное действие, зависящее от выбранного режима сравнения.

Блок захвата/сравнения CAPCOM6

Блок CAPCOM6 обеспечивает 3 канала захвата/сравнения и дополнительный канал сравнения. Каждый из трёх каналов захвата/сравнения может управлять двумя выходными линиями, которые программируются на генерацию неперекрывающихся последовательностей импульсов. Дополнительный канал сравнения используется для формирования независимого выходного сигнала, либо для модуляции выходных сигналов трёх остальных каналов.

Универсальные многоканальные ШИМ-сигналы могут генерироваться под управлением либо внутренних таймеров, либо внешних сигналов, поступающих, к примеру, от датчика Холла. Активный уровень сигнала может выбираться отдельно для каждого из выходных каналов.

Блок CAPCOM6 поддерживает также функцию аппаратной ловушки, когда в качестве отклика на внешний сигнал устанавливаются определённые уровни выходных сигналов.

Блок ШИМ

Блок ШИМ обеспечивает генерацию до четырёх независимых высокоскоростных ШИМ-сигналов. Он может генерировать как стандартные ШИМ-сигналы (выровненные по фронту), так и симметричные ШИМ-сигналы (выровненные относительно центра). В пакетном режиме сигналы двух каналов могут быть объединены по «И» так, что выходной сигнал одного из каналов является запусковым для второго канала. Режим однократного запуска позволяет под управлением прикладной программы генерировать (с перезапуском) одиночные импульсы. Каждый канал ШИМ управляется реверсивным счётчиком совместно с регистрами перезагрузки и сравнения. Для задания полярности выходной ШИМ-последовательности может использоваться сигнал с выхода триггерной защёлки соответствующего порта (подключается по схеме Иключающее ИЛИ).

АЦП

Для того чтобы обеспечить возможность измерения аналоговых сигналов, в состав микроконтроллера C166 включён АЦП с мультиплексированными входными каналами и устройством выборки и хранения. В АЦП используется метод последовательного приближения. Время выборки (для зарядки конденсатора) и время преобразования могут быть изменены программно, чтобы они соответствовали внешней схеме.

Обнаружение ошибок переполнения и защита от появления таких ошибок реализована на уровне регистра результата преобразования (ADDAT). Возможны два варианта: если результат предыдущего преобразования не был считан из регистра результата к моменту завершения следующего цикла преобразования, то генерируется запрос на прерывание; альтернативный вариант состоит в том, что следующий цикл преобразования приостанавливается до тех пор, пока результат предыдущего преобразования не будет считан.

Если в приложении необходимо задействовать менее 16 каналов аналоговых входов, то остальные каналы АЦП могут быть использованы в качестве цифровых входов порта.

АЦП поддерживает четыре различных режима преобразования. В стандартном одноканальном режиме преобразования уровень аналогового сигнала в заданном канале измеряется один раз и преобразовывается в цифровой вид. В стандартном одноканальном непрерывном режиме выборка уровня аналогового сигнала в заданном канале и его преобразование в цифровое значение производится периодически, без вмешательства пользовательской программы. В режиме автосканирования производится последовательная выборка аналоговых сигналов на входах нескольких заданных каналов (каждый канал опрашивается однократно) и их преобразование к цифровому виду. В режиме непрерывного автосканирования выборка и преобразование аналоговых сигналов на заданном количестве входных каналов производится циклически. В указанном режиме может быть введён (инжектирован) результат преобразования для ещё одного канала без приостановки уже запущенного цикла преобразования. По этой причине данный режим иногда называют режимом инъекции канала.

Результаты преобразования АЦП могут быть сохранены в памяти микроконтроллера в табличной форме. Для этого удобно использовать контроллер периферийных событий (РЕС), с помощью которого можно осуществлять передачу данных из АЦП в ОЗУ без потерь в производительности, связанных с входом и выходом из программ обработки прерывания при каждой передаче данных (как это происходило бы при отсутствии РЕС).

Часы реального времени

Часы реального времени (RTC) служат для выполнения различных задач:

- работа в качестве системных часов для определения времени и даты, даже (опционально) в режиме пониженного энергопотребления;
- организация циклических прерываний, например, для генерации системных сигналов, не зависящих от тактовой частоты ЦПУ, без использования таймеров общего назначения или для выхода из режима ожидания (формирования сигнала пробуждения) через заданные интервалы времени;
- реализация 48-битного таймера для измерения интервалов времени большой длительности (максимальное измеряемое время составляет 114 лет).

Модуль часов реального времени состоит из трёх включённых последовательно делителей: фиксированного делителя 8:1, перезагружаемого 16-битного таймера T14 и 32-битного таймера часов реального времени (доступного через регистры RTCH и RTCL). Оба таймера работают только в режиме прямого счёта.

Встроенный модуль сопряжения с шиной I²C

Интегрированный в структуру микроконтроллера модуль сопряжения с шиной I²C управляет приёмом и передачей пакетов данных через двухпроводную шину I²C в соответствии с её протоколом. Модуль I²C может передавать и принимать данные с 7- или 10-битной адресацией, обеспечивая работу в качестве ведущего или ведомого устройства, а также в режиме Multimaster (когда ведущее и ведомое устройства определяются в зависимости от сигналов на шине).

Для физического подключения линий этого интерфейса могут использоваться за-

даваемые программно выводы микроконтроллера. Обмен данными может производиться на скорости до 400 Кбит/с. Под обслуживание модуля I²C зарезервированы две группы векторов прерываний, что позволяет эффективно использовать прерывания при организации обмена данными по шине I²C; кроме того, поддерживается передача данных с использованием контроллера периферийных событий (PEC).

Примечание. Выводы порта, предназначенные для работы с шиной I²C, могут работать только как выходы с открытым стоком, поскольку этого требует спецификация данной шины.

Встроенный CAN-модуль

Встроенный CAN-модуль предназначен для управления приёмом и передачей пакетов данных в соответствии со спецификацией CAN v2.0 Part B (active), т.е. он обеспечивает автономный приём и передачу как стандартных пакетов данных с 11-битным идентификатором, так и расширенных пакетов данных с 29-битным идентификатором.

Модуль CAN имеет 15 буферов приёма/передачи и обеспечивает для них полнофункциональный режим работы (full-CAN). Буфер приёма/передачи номер 15 может быть сконфигурирован для работы в режиме basic-CAN. Оба режима имеют приёмные маски, которые обеспечивают фильтрацию входящих сообщений, что позволяет, например, при работе в режиме basic-CAN игнорировать сообщения с идентификаторами, соответствующими режиму full-CAN. Все буферы приёма/передачи могут обновляться независимо друг от друга; максимальная длина сообщения составляет 8 байт.

Тактовая синхронизация осуществляется от сигнала XCLK. Тактовая частота программируется, чтобы обеспечить скорость передачи данных до 1 Мбит/с.

Для подключения модуля CAN к драйверу шины используется два вывода микроконтроллера.

USB-интерфейс

Модуль USB управляет всеми транзакциями между последовательной шиной USB и внутренней параллельной шиной микроконтроллера. Модуль USB включает в себя ряд функциональных блоков, необ-

ходимых для поддержки обмена данными по шине:

- встроенный трансивер шины USB;
- блок памяти USB (две страницы по 128 байт);
- блок управления памятью (MMU), через который осуществляется доступ к памяти USB как для самого контроллера USB, так и для ЦПУ микроконтроллера;
- блок UDC — управляющее ядро протокола обмена данными через шину USB;
- интерфейс микроконтроллера, включающий в себя регистры специальных функций;
- логический блок управления запросами на прерывание;
- генератор тактовых сигналов для модуля USB, программируемый на работу с высокой и низкой скоростью обмена данными по шине USB.

SDLM-интерфейс

Совместно с внешним трансивером шины J1850, модуль последовательной передачи данных (Serial Data Link Module — SDLM) обеспечивает обмен данными через мультиплексированную последовательную шину J1850. Характеристики модуля отвечают требованиям спецификации SAE Class B J1850 для шины J1850, в которой используется модуляция с переменной шириной импульса (VPW). Модуль SDLM является встроенным периферийным устройством и подключается к ЦПУ через внутреннюю системную шину XBUS.

Модуль SDLM обеспечивает следующие основные характеристики:

- соответствие требованиям спецификации SAE Class B J1850 (VPW);
- полная поддержка протокола class 2;
- работа в режиме модуляции с переменной шириной импульсов (VPW) на скорости 10.4 Кбит/с;
- поддержка увеличенной в 4 раза скорости передачи данных — 41.6 Кбит/с;
- программируемый бит нормализации;
- программируемая задержка сигналов, поступающих в трансивер;
- цифровой фильтр подавления помех;
- режим энергосбережения с возможностью автоматического пробуждения при обнаружении активности на шине;
- поддержка однобайтного заголовка и компактного заголовка;
- генерация CRC и проверка контрольных сумм;

- поддержка блочного режима приёма и передачи данных.
Характеристики обмена данными:
- 11-байтный буфер передачи;
- двойной 11-байтный буфер приёма (опционально — с разрешением перезаписи);
- поддержка пакетов IFR (In-Frame Response — ответ внутри пакета) типа 1, 2 и 3;
- возможность сконфигурировать буфер приёма и передачи как буфер FIFO или буфер, работающий в байтовом режиме;
- разветвлённая система управления прерываниями (8 независимых источников прерываний);
- автоматическая передача пакетов IFR (тип 1 и тип 2) для 3-байтных сводных заголовков;
- конфигурируемый делитель частоты;
- управление флагами состояния шины (IDLE/stand-by, EOF, EOD, SOF, Tx и Rx).

7.3.9. Характеристики системы управления электропитанием

В микроконтроллерах семейства C166, помимо стандартных методов энергосбережения (переход в режим ожидания и отключение), используется ряд дополнительных функций управления электропитанием, которые могут комбинироваться, чтобы минимизировать энергопотребление микроконтроллера в той или иной ситуации. К этим дополнительным функциям относятся:

- гибкая система генерации тактовых частот;
- гибкая система управления периферийными устройствами (они могут включаться и отключаться по отдельности или группами);
- периодический вывод микроконтроллера из режима ожидания, используя таймер часов реального времени (RTC).

Наличие перечисленных функций предоставляет разработчикам эффективные средства реализации режимов пониженного энергопотребления микроконтроллера, позволяющие обеспечить оптимальный баланс между сокращением энергопотребления (т.е. временем пребывания в энергосберегающих режимах) и необходимой работоспособностью периферийных блоков (т.е. функциональностью системы).

Гибкая система генерации тактовых частот

Система генерации тактовых частот представляет собой набор усовершенство-

ванных механизмов (некоторые их характеристики задаются пользователем), предназначенных для формирования тактовых сигналов для различных встроенных модулей микроконтроллера. Наличие таких механизмов имеет особенно большое значение при работе в энергосберегающих режимах, например в режиме ожидания.

Оптимизация тактового генератора с точки зрения потребляемой мощности позволяет значительно снизить количество энергии, потребляемой микроконтроллером при генерации тактовых сигналов.

Система распределения тактовых импульсов осуществляет эффективный контроль количества энергии, потребляемой в ходе этого процесса.

Снижение энергопотребления в рабочих режимах достигается путём программного управления коэффициентом деления (1...32) частоты тактового генератора. В результате микроконтроллер работает на более низкой тактовой частоте, что приводит к значительному сокращению общего уровня потребления энергии.

Гибкое управление периферийными устройствами

Гибкость системы управления встроенными периферийными модулями определяется наличием механизма, позволяющего по отдельности включать и отключать каждый из них. В любой ситуации (различные режимы работы системы, режим ожидания и т.д.) активными являются лишь периферийные устройства, непосредственно задействованные в работе. Все остальные периферийные модули отключаются. Кроме того, осуществляется оперативное групповое управление работой периферийных модулей, в том числе контроль энергии, затраченной на генерацию и распределение тактовых сигналов. Некоторые периферийные модули, не задействованные в текущий момент времени, могут оставаться активными (например, если необходимо поддерживать работоспособность уже подключённых каналов обмена данными). В любом случае, доступ к управляющим регистрам периферийных модулей, отключённых в индивидуальном порядке, сохраняется (но в случае группового отключения периферийных модулей их управляющие регистры будут недоступны).

Периодический выход из режима ожидания

Метод периодического вывода микроконтроллера из режима ожидания позволяет, наряду со значительным снижением энергопотребления (особенно в сочетании с дополнительными режимами контроля энергопотребления), обеспечить высокую степень готовности системы. Опрос внешних сигналов и событий осуществляется на самой низкой скорости в моменты периодической активации ЦПУ и отдельных периферийных устройств, после чего микроконтроллер быстро возвращается в энергосберегающий режим. Таким образом, среднее энергопотребление системы значительно снижается.

7.3.10. Особенности микроконтроллеров семейства XC166

При разработке микроконтроллеров семейства XC166 были сохранены основные свойства архитектуры семейства C166. Прежде всего, это относится к системе команд процессора. Она не претерпела существенных изменений, что позволяет использовать в контроллерах нового семейства как разработанное ранее программное обеспечение, так и хорошо зарекомендовавшие себя схемотехнические решения. Благодаря наличию дополнительных DSP-ориентированных команд, заметно увеличилась производительность ЦПУ при решении соответствующих задач (например, при цифровой фильтрации).

Также была сохранена базовая концепция использования регистров для управления периферийными устройствами. Адресное пространство регистров было расширено, чтобы обеспечить поддержку дополнительных периферийных модулей. Благодаря наличию в микроконтроллере различных оптимизированных модулей памяти, имеется возможность реализовать эффективный доступ к регистрам, данным и программному коду.

Коммуникационные возможности микроконтроллеров семейства XC166 возросли за счёт того, что, с одной стороны, стало возможным включить в структуру микроконтроллера несколько независимо работающих копий хорошо знакомых пользователям интерфейсов (ASC, SSC), а с другой стороны, стали использоваться новые высокопроизводительные модули, например TwinCAN.

7.3.11. Система команд микроконтроллеров семейства C166

В данном разделе приведён краткий обзор команд микроконтроллеров семейства C166 в соответствии с их распределением по различным классам. Цель обзора — дать читателю основные сведения о системе команд, продемонстрировать мощност и многофункциональность этих команд, а также ознакомить с общими принципами их использования.

Арифметические команды

- Сложение двух слов или байтов: ADD, ADDB.
- Сложение с переносом двух слов или байтов: ADDC, ADDCB.
- Вычитание двух слов или байтов: SUB, SUBB.
- Вычитание с переносом двух слов или байтов: SUBC, SUBCB.
- 16×16-битное знаковое и беззнаковое умножение: MUL, MULU.
- 16/16-битное знаковое или беззнаковое деление: DIV, DIVU.
- 32/16-битное знаковое или беззнаковое деление: DIV, DIVU.
- Инверсия: CPL, CPLB.
- Отрицание: NEG, NEGB.

Логические команды

- Побитовое логическое умножение (И) двух слов или байтов: AND, ANDB.
- Побитовое логическое сложение (ИЛИ) двух слов или байтов: OR, ORB.
- Побитовое логическое Исключающее ИЛИ двух слов или байтов: XOR, XORB.

Команды сравнения и организации циклов

- Сравнение двух слов или байтов: CMP, CMPB.
- Сравнение двух слов или байтов с последующим инкрементированием на 1 или 2: CMPI1, CMPBI2.
- Сравнение двух слов или байтов с последующим декрементированием на 1 или 2: CMPD1, CMPBD2.

Команды работы с битовыми переменными

- Маскирование старшего и младшего байта слова: BFLDH, BFLDL.
- Установка одного бита в 1: BSET.

- Сброс одного бита в 0: BCLR.
- Пересылка одного бита: BMOV.
- Пересылка одного бита с инверсией: BMOVN.
- Логическое умножение (И) двух битов: BAND.
- Логическое сложение (ИЛИ) двух битов: BOR.
- Исключающее ИЛИ двух битов: BXOR.
- Сравнение двух битов: BCMP.

Команды сдвига и циклического сдвига

- Сдвиг слова вправо: SHR.
- Сдвиг слова влево: SHL.
- Циклический сдвиг слова вправо: ROR.
- Циклический сдвиг слова влево: ROL.
- Арифметический сдвиг слова вправо (сдвиг вместе со знаковым битом): SHR.

Команды нормализации

- Определение количества циклов сдвига, необходимых для нормализации операндов, имеющих размерность слова (поддержка операций над переменными с плавающей точкой): PRIOR.

Команды пересылки данных

- Пересылка слова или байта данных: MOV, MOVB.
- Пересылка байта в адресуемую пословно память со знаковым или нулевым дополнением: MOVBS, MOVBSZ.

Примечание. Команды пересылки данных могут использоваться в сочетании с большим количеством способов адресации, включая косвенную адресацию и адресацию с автоматическим инкрементированием/декрементированием указателя.

Команды работы с системным стеком

- Сохранение слова в системном стеке: PUSH.
- Извлечение слова из системного стека: POP.
- Сохранение слова в системном стеке с последующей заменой старого значения слова новым (для управления регистрами банков): SCXT.

Команды перехода

- Условный переход на указанную команду в границах текущего сегмента памяти программ с абсолютной, косвенной или

относительной адресацией: JMPA, JMPI, JMPK.

- Безусловный переход по указанному абсолютному адресу команды, расположенному в любом требуемом сегменте памяти программ: JMPs.
- Условный переход по относительному адресу команды в пределах текущего сегмента памяти программ, в зависимости от значения проверяемого бита: JB, JNB.
- Условный переход по относительному адресу команды в пределах текущего сегмента памяти программ, в зависимости от значения проверяемого бита, с последующей его инверсией, если переход был совершён (поддержка семафоров): JBC, JNBS.

Команды вызова

- Условный вызов подпрограммы в пределах текущего сегмента памяти программ с абсолютной или косвенной адресацией: CALLA, CALLI.
- Безусловный вызов подпрограммы в пределах текущего сегмента памяти программ с относительной адресацией: CALLR.
- Безусловный вызов подпрограммы из любого сегмента памяти программ с абсолютной адресацией: CALLS.
- Безусловный вызов подпрограммы в пределах текущего сегмента памяти программ с абсолютной адресацией в сочетании с временным сохранением (pushing) значения выбираемого регистра в системном стеке: PCALL.
- Безусловный переход на таблицу векторов внешних прерываний или прерываний от аппаратных/программных ловушек, размещённую в нулевом сегменте памяти программ: TRAP.

Команды возврата

- Возврат из подпрограммы в текущем сегменте памяти программ: RET.
- Возврат из подпрограммы из любого сегмента памяти программ: RETS.
- Возврат из подпрограммы в текущем сегменте памяти программ со считыванием (popping) значения выбираемого регистра из системного стека: RETP.
- Возврат из программы обработки прерывания: RETI.

Команды управления режимами работы микроконтроллера

- Перезапуск микроконтроллера программным способом: SRST.
- Переход в режим ожидания: IDLE.
- Переход в режим пониженного энергопотребления: PWRDN.
- Обслуживание сторожевого таймера: SRVWDT.
- Отключение сторожевого таймера: DISWDT.
- Команда завершения инициализации (переводит вывод RSTOUT в ВЫСОКИЙ уровень и блокирует выполнение любых последующих команд DISWDT): EINIT.

Прочие команды

- Команда, не производящая никаких действий, требует 2 байта для своего размещения в памяти программ и имеет минимальное время среди всех команд исполнения: NOP.
- Команда, указывающая, что последующие команды должны образовывать неразрывную цепочку: ATOMIC.
- Переключение режимов адресации reg, bitoff и bitaddr на расширенную область регистров специальных функций (ESFR): EXTR.
- Отключение схемы адресации на основе регистра-указателя данных (DPP) с использованием вместо DPP заданной страницы данных и (опционально) с возможностью переключения на расширенную область регистров специальных функций (ESFR): EXTP, EXTPR.
- Отключение схемы адресации на основе регистра-указателя данных (DPP) с использованием вместо DPP заданного сегмента и (опционально) с возможностью переключения на расширенную область регистров специальных функций (ESFR): EXTS, EXTSR.

Примечание. Команды ATOMIC и EXT* используются для создания неразрывных последовательностей команд, таких как последовательность команд обслуживания semaфоров. Кроме того, они (за исключением ATOMIC) поддерживают адресацию данных, даже если происходит выход за границы, заданные текущим значением DPP. Такая возможность исключительно полезна при работе с большими объёмами памяти, что характерно для языков высокого уровня.

DSP-ориентированные команды

Микроконтроллеры семейства XC166 построены на процессорном ядре C166SV2. Его блок умножения/деления поддерживает ряд дополнительных (по сравнению с версией C166) команд:

- Перемещение данных: CoMOV, CoLOAD(2), CoSTORE.
- Умножение двух 16-битных чисел: CoMUL.
- Умножение двух 16-битных чисел с последующим 40-битным сложением: CoMAC(R).
- Умножение с последующим сложением и одновременным перемещением данных: CoMACM(R).
- 31/40-битные арифметические команды: CoADD(2), CoSUB(2), CoASHR(2), CoSHR, CoSHL, CoCMP.
- Специальные арифметические функции: CoABS, CoMIN, CoMAX, CoNEG, CoRND.
- Пустая команда (служит для изменения указателя адреса): CoNOP.

Защищённые команды

Некоторые команды, критические для функционирования микроконтроллера, представляют собой так называемые защищённые команды. Эти команды используют максимально допустимый для декодирования формат (32 бит), тогда как обычные команды используют только часть этого формата (как правило, младшие 8 бит), а остальные биты служат для хранения дополнительной информации, например информации о задействованных регистрах.

Декодирование всех 32 бит защищённой команды позволяет снизить вероятность искажения данных в процессе считывания. Такие важные команды, как программный сброс микроконтроллера, выполняются лишь в том случае, если вся команда целиком была декодирована безошибочно. Это повышает безопасность и стабильность работы микроконтроллерных систем.

7.3.12. Функциональные схемы 16-битных микроконтроллеров

Блок-схемы, приведенные на Рис. 7.26...7.34, лишний раз демонстрируют широкое разнообразие 16-битных микроконтроллеров семейства C166. Обратите внимание, что здесь представлены не все ныне существующие модификации микроконтроллеров данного семейства; к тому же, продолжается разработка новых модификаций.

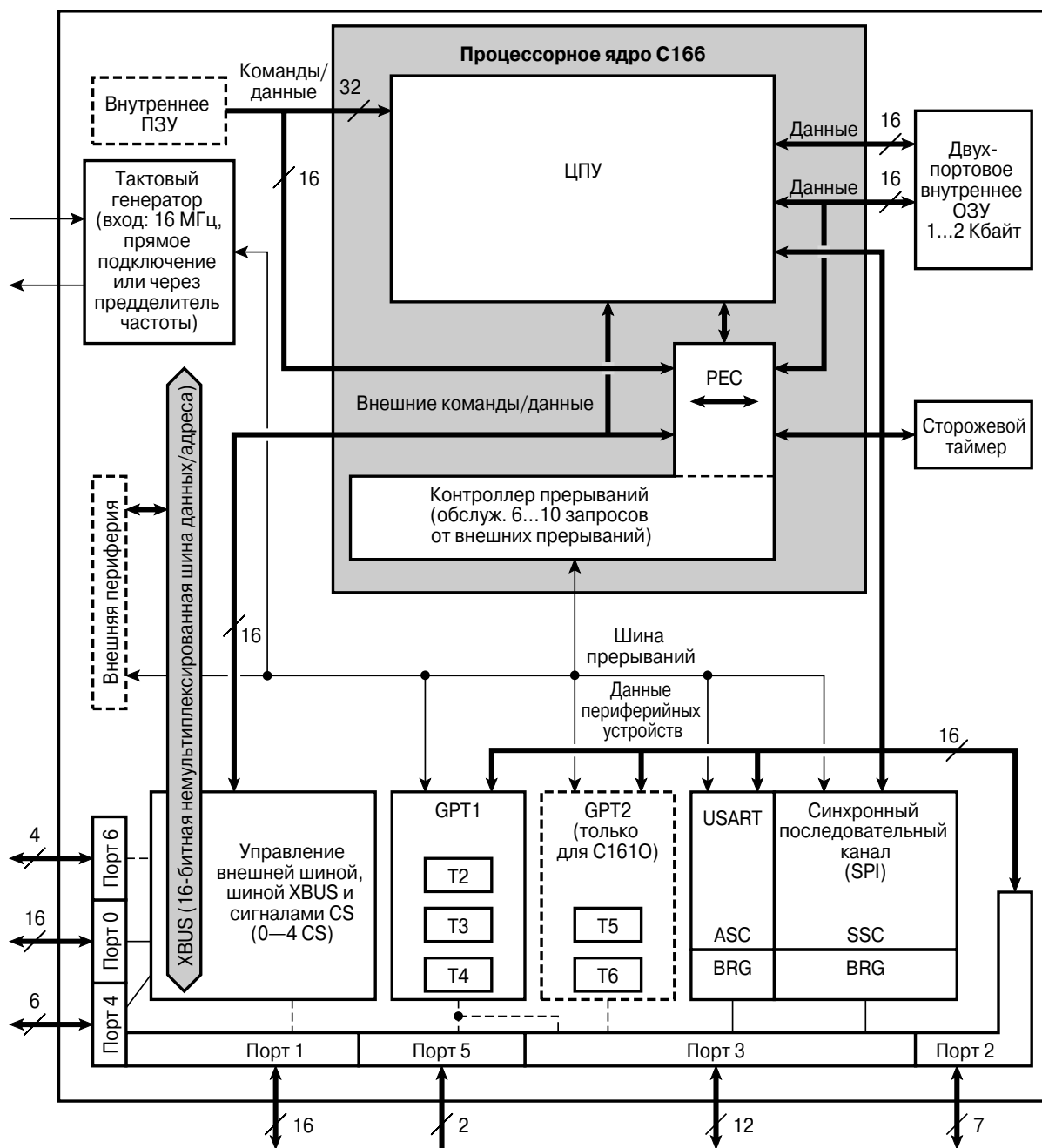


Рис. 7.26. Функциональная схема C161/K/O.

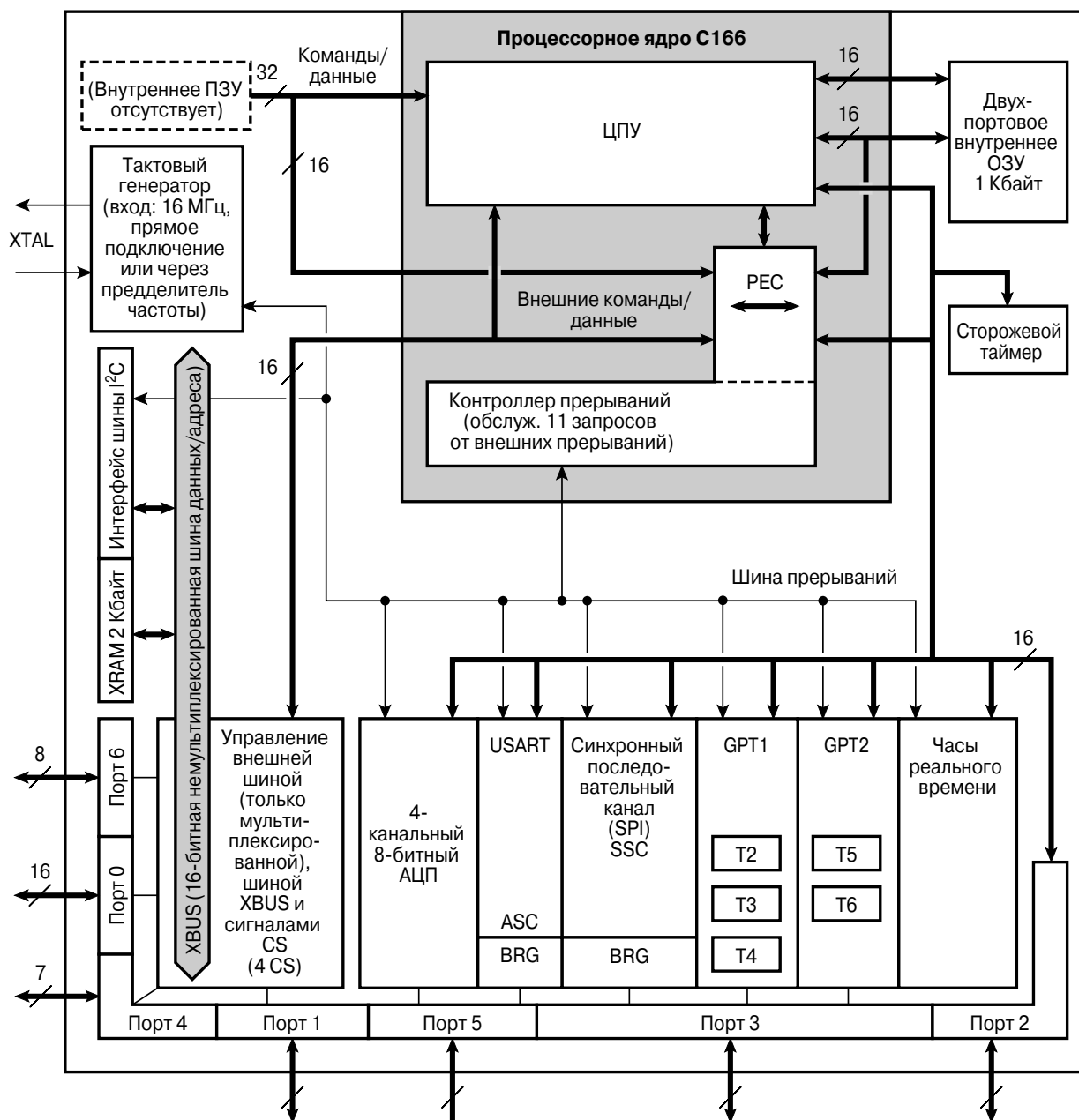


Рис. 7.27. Функциональная схема C161PI.



Рис. 7.28. Функциональная схема С165.

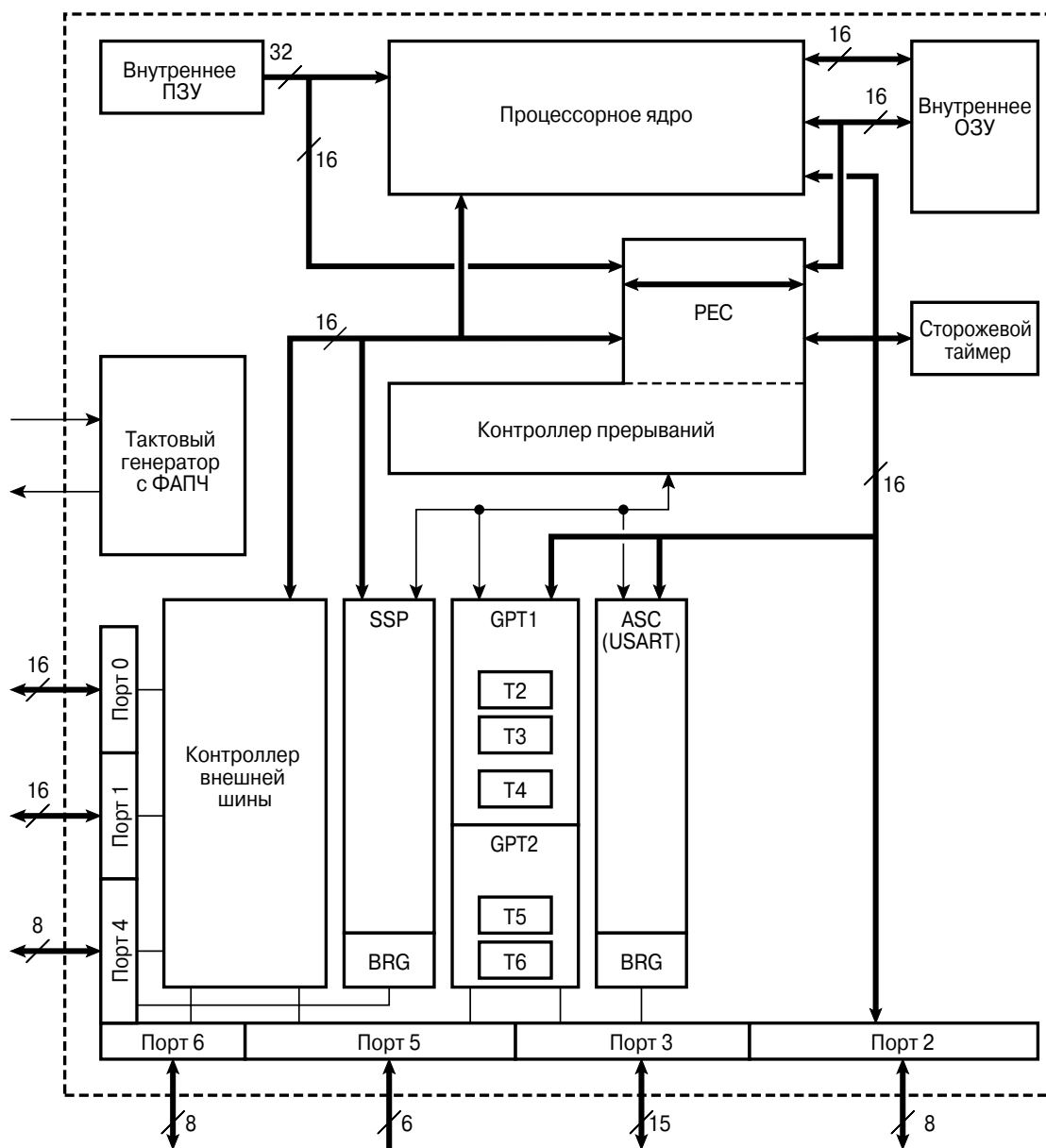


Рис. 7.29. Функциональная схема C163.

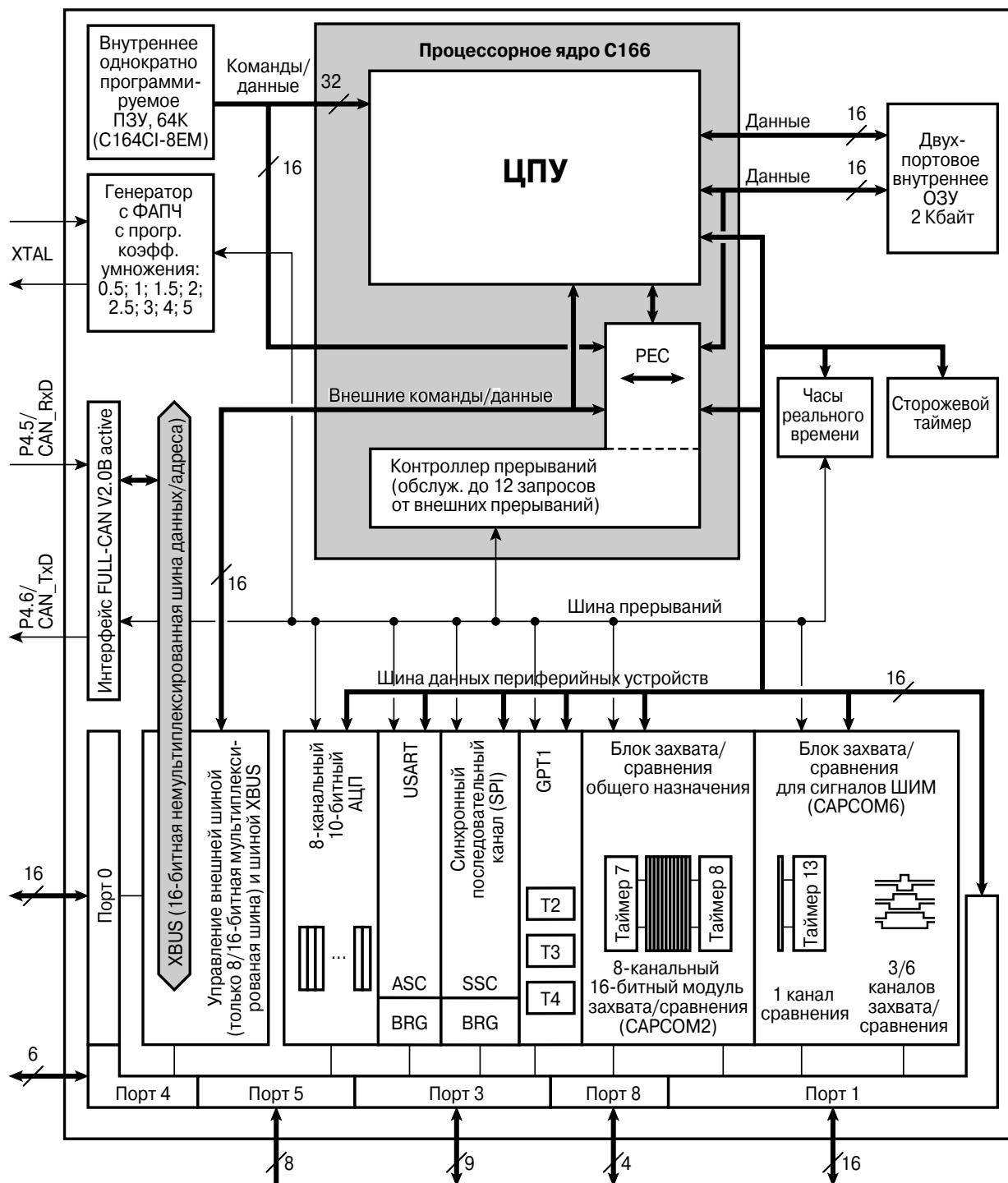


Рис. 7.30. Функциональная схема C164CI.

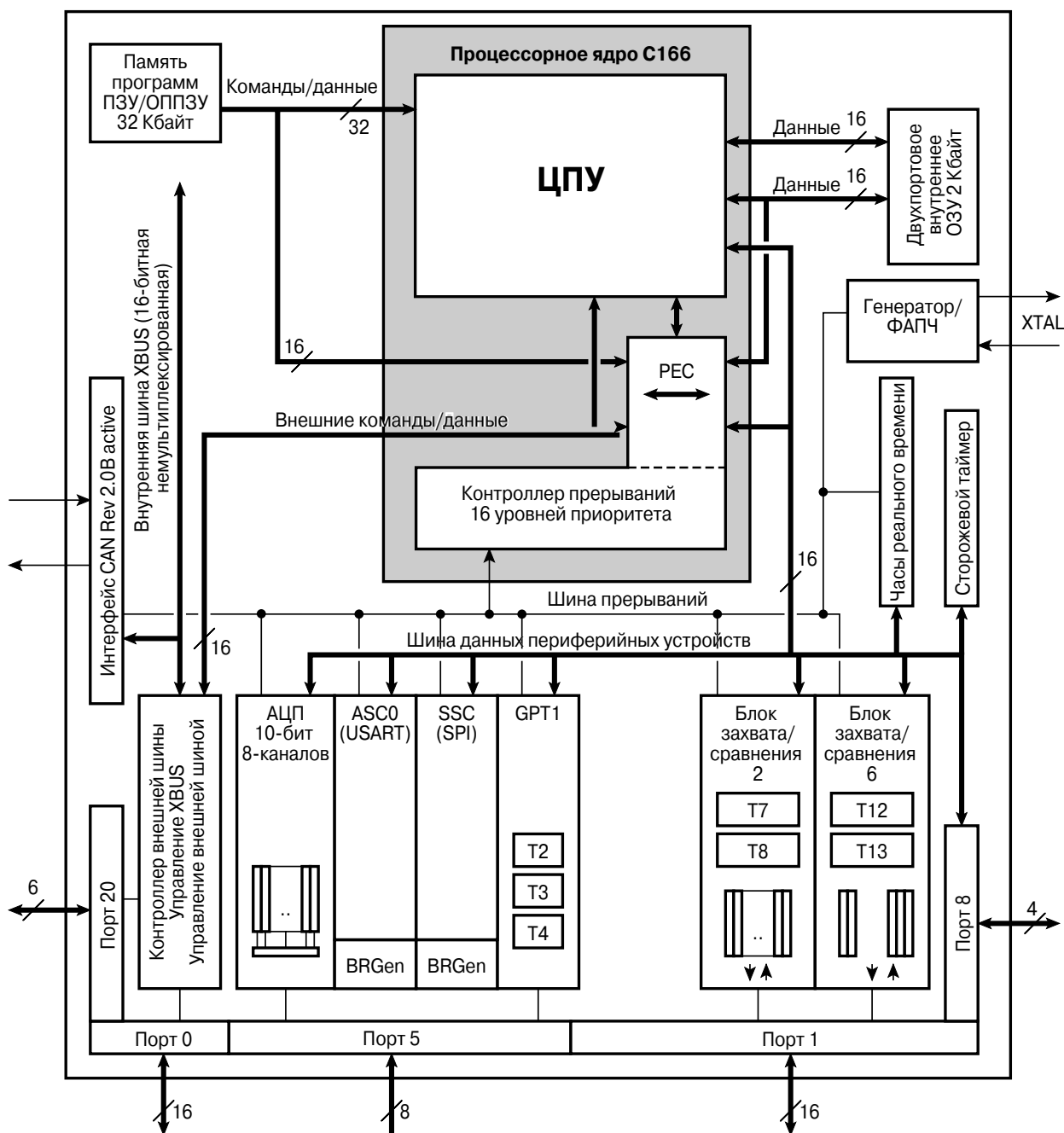


Рис. 7.31. Функциональная схема C164CM.

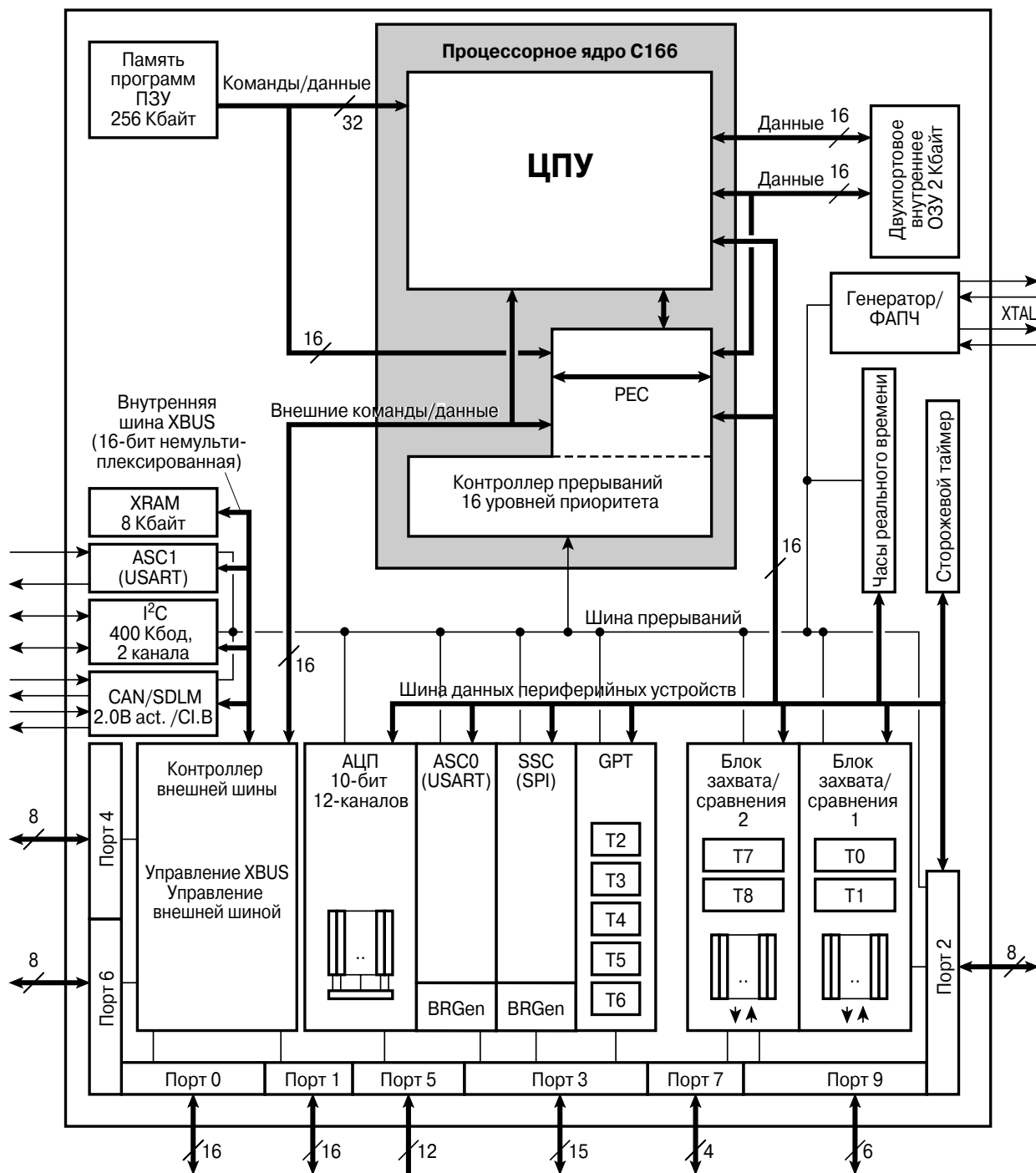


Рис. 7.32. Функциональная схема C161CS.

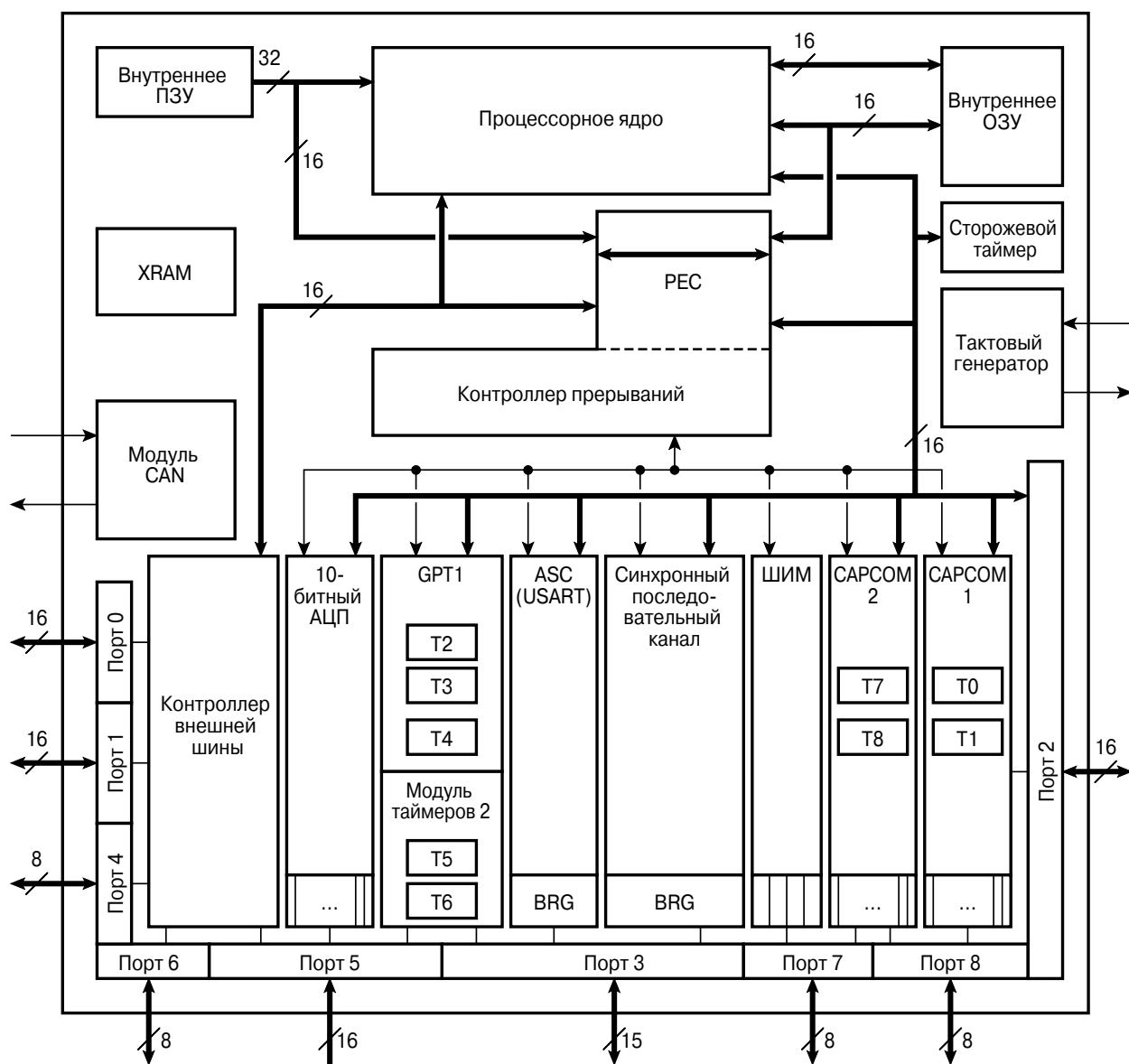


Рис. 7.33. Функциональная схема C167CR.

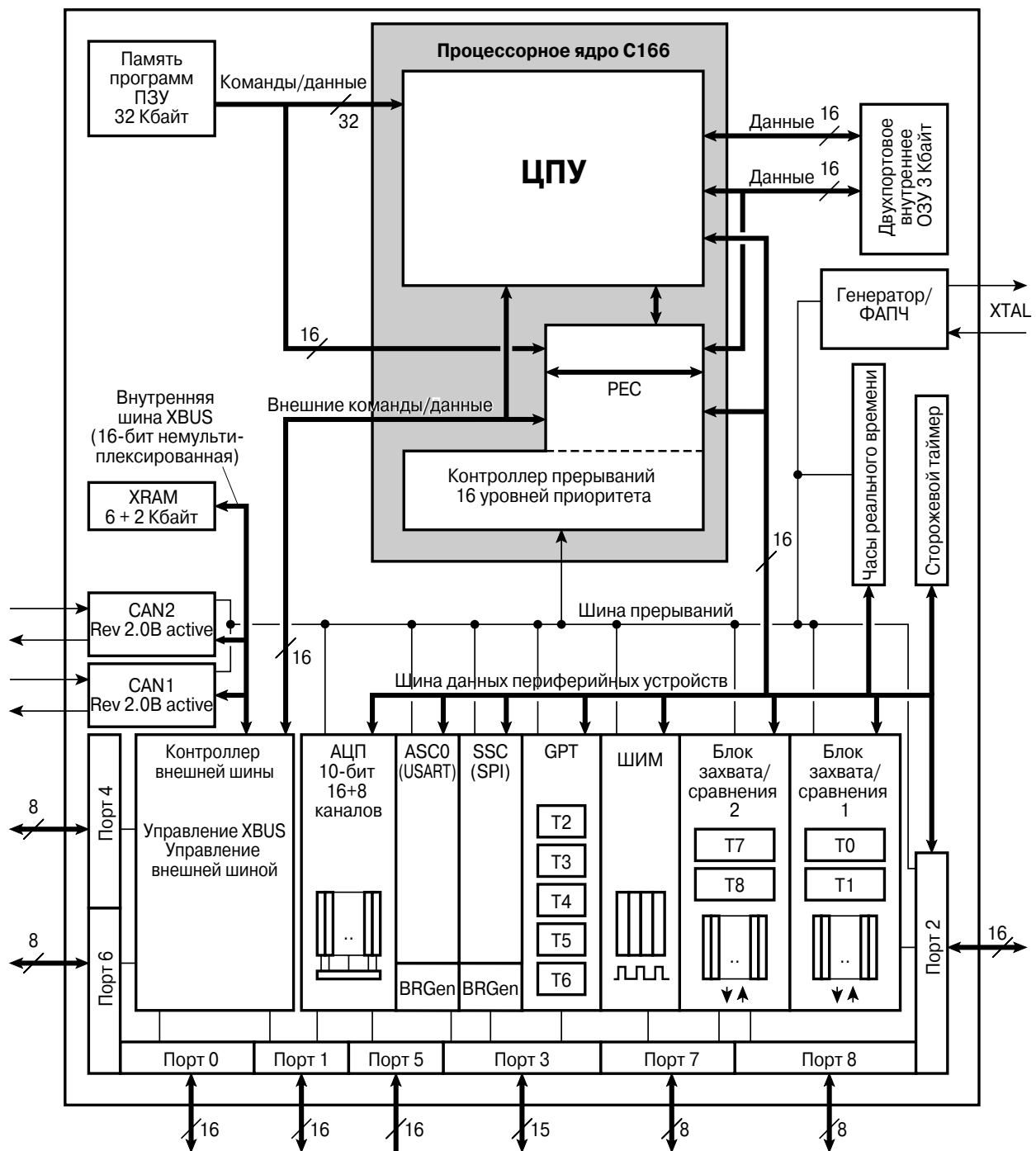


Рис. 7.34. Функциональная схема C167CS.

7.4. Архитектура 32-битных микроконтроллеров TriCore

Архитектура TriCore является первым примером комбинированной архитектуры микроконтроллер/DSP, оптимизированной для построения интегрированных систем реального времени. Она сочетает в себе выдающиеся характеристики сразу трёх различных устройств: эффективность обработки сигналов DSP-контроллера, быстро-

действие микроконтроллера реального времени и вычислительную мощность RISC-архитектуры (которая, в данном случае, и является базовой). Таким образом, использование архитектуры TriCore обеспечивает великолепное соотношение цена/производительность, поскольку в микроконтроллере интегрировано большое количество различных функциональных блоков и для построения микроконтроллерной системы потребуется задействовать меньшее число

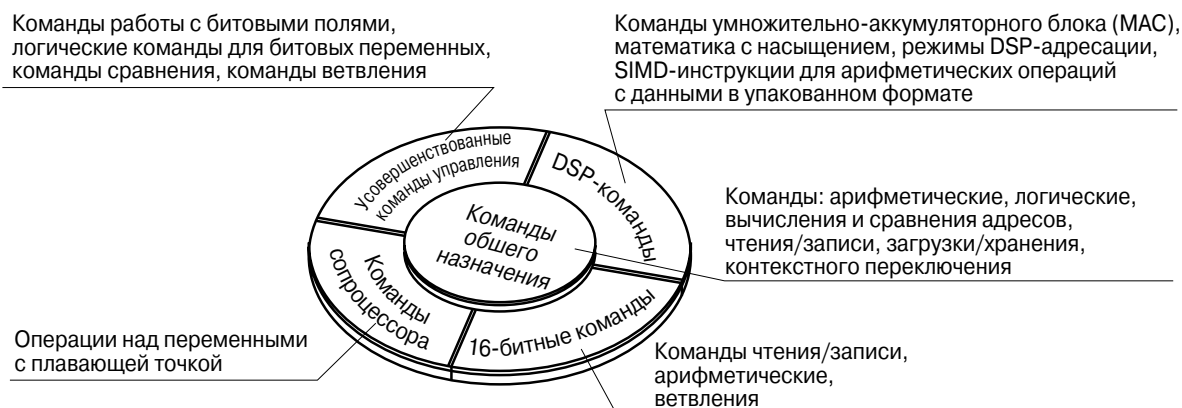


Рис. 7.35. TriCore — единая архитектура с модульным набором команд.

модулей. Микроконтроллеры данного семейства содержат оптимальный набор высокопроизводительных периферийных устройств, что позволяет использовать их для решения широкого спектра задач (обеспечение безопасности и контроль динамических характеристик автомобиля, управление трансмиссией, построение информационно-развлекательных систем, управление кузовной электроникой и системами обеспечения комфорта, и т.д.). На Рис. 7.35 показана общая концепция построения микроконтроллеров семейства TriCore.

Архитектура набора команд (Instruction Set Architecture — ISA) поддерживает общее линейное адресное пространство с память-ориентированным вводом/выводом. Процессорное ядро работает в суперскалярном режиме, т.е. оно может исполнять одновременно до трёх команд и до четырёх операций. Более того, ISA может работать в сочетании с системами различной архитектуры, в том числе и с многопроцессорными системами. Столь высокая толерантность к используемой аппаратной платформе и системному уровню программного обеспечения позволяет создавать микроконтроллеры с различным сочетанием цена/производительность, в зависимости от конкретных требований пользователя.

Микроконтроллер TriCore поддерживает смешанный 16- и 32-битный набор команд. Команды различной длины могут использоваться совместно без изменения режима работы, что позволяет значительно уменьшить среднюю длину программ и даже несколько ускорить их исполнение. При этом уменьшаются стоимость системы, уровень её энергопотребления и снижаются требования к доступному объёму памяти программ.

Эффективность микроконтроллера при работе в режиме реального времени, в основном, определяется длительностями задержек обработки прерываний и скоростью переключения контекста. С этой точки зрения высокопроизводительная архитектура TriCore обеспечивает минимальное время реакции на внешние события благодаря отсутствию длинных команд, исполнение которых занимает большое количество машинных циклов, а также наличию аппаратно-ориентированной системы обработки прерываний. Кроме того, поддерживается быстрое контекстное переключение.

Подробное описание архитектуры TriCore с полным набором команд содержится в документе «TriCore Architecture Manual».

7.4.1. Отличительные особенности архитектуры TriCore

Ниже перечислены основные отличительные особенности архитектуры TriCore:

- 32-битная архитектура;
- единое (4 Гбайт) адресное пространство памяти данных, памяти программ и портов ввода/вывода;
- 16/32-битные команды, использование которых позволяет уменьшить размер программного кода;
- малое время реакции на прерывание;
- быстрое автоматическое аппаратное переключение программного контекста;
- блок умножителя-аккумулятора;
- поддержка целочисленной арифметики с насыщением;
- операции с битовыми переменными и обращение к ним поддерживаются как на уровне архитектуры, так и системой команд;

- обработка упакованных данных (поддержка параллельных вычислений в формате SIMD — одна команда, несколько данных);
- отсутствие потерь в производительности при работе в DSP-приложениях;
- гибкое управление энергопотреблением;
- байтовая и битовая адресация;
- прямой порядок записи байтов (первым записывается младший байт, little-endian);
- поддержка прямого и обратного (первым записывается старший байт, big-endian) порядка записи байтов при передаче данных через шинный интерфейс;
- прецизионное определение исключительных состояний в системе;
- гибкая конфигурируемая система организации прерываний с поддержкой до 256 уровней приоритета.

7.4.2. Регистры состояния программы

Как показано на **Рис. 7.36**, набор регистров TriCore содержит 32 регистра общего назначения (GPR), два 32-битных регистра, содержащих информацию о состоянии программы (PCXI и PSW), а также ещё один регистр — счётчик команд (PC). PCXI, PSW и PC входят в число регистров специальных функций процессорного ядра (CSFR).

32 регистра общего назначения образуют две группы: шестнадцать 32-битных регистров данных (D0...D15) и шестнадцать 32-битных адресных регистров (A0...A15). Четыре регистра общего назначения выполняют особые функции: D15 по умолчанию является регистром данных, A10 служит указателем стека (SP), A11 используется как регистр адреса возврата из подпрограммы и A15 является по умолчанию регистром базового адреса. Регистры A0 и A1 из числа младших адресных регистров в совокупности с A8 и A9 из числа старших адресных регистров определены как глобальные системные регистры. Они не входят в состав переключаемого контекста, поэтому не сохраняются и не восстанавливаются автоматически при аппаратных контекстных переключениях. Операционная система использует их, например, с целью снижения системных издержек.

Регистры PCXI и PSW содержат флаги состояния, информацию о текущей исполняемой команде и служебную информацию.

Обратите внимание, что набор регистров разделен также на нижний и верхний контекст; автоматическое переключение к одной этих частей влечёт за собой аппаратное сохранение второй.



Рис. 7.36. Регистры состояния программы.

7.4.3. Типы данных

Система команд TriCore поддерживает операции с логическими (булевыми) переменными, битовыми последовательностями, символами, числами с фиксированной точкой, адресами, знаковыми и беззнаковыми целыми числами, а также с числами с плавающей точкой одинарной точности.

Большая часть команд поддерживает работу только с определёнными типами данных, однако некоторые команды могут работать с различными типами данных.

7.4.4. Режимы адресации

Режимы адресации позволяют обеспечивать эффективный доступ к элементарным блокам данных внутри таких структур данных, как записи, массивы с прямым или последовательным доступом, стеки и циклические буферы. Длина элементарных блоков данных может составлять 1, 8, 16, 32 или 64 бит.

Режимы адресации также обеспечивают эффективную компиляцию программ, написанных на языке C, лёгкий доступ к регистрам периферийных устройств или эффективное использование стандартных для DSP структур данных (DSP-режимы адресации, например циклические буферы для фильтров и адресация с инвертированием битов адреса для реализации функции БПФ). Архитектурой TriCore поддерживаются следующие семь режимов адресации:

- абсолютная;
- базовый адрес + короткое смещение;
- базовый адрес + длинное смещение;
- предварительное инкрементирование или предварительное декрементирование;
- адресация с последующим инкрементированием и адресация с последующим декрементированием;
- циклическая;
- с инвертированием битов адреса.

7.4.5. Форматы команд

Архитектура TriCore поддерживает как 16-битные, так и 32-битные форматы команд. По умолчанию все команды имеют 32-битный формат; 16-битные команды представляют собой подмножество наиболее часто используемых команд. Их реализация в 16-битном формате позволяет

уменьшить объём программного кода. Команды выбираются компилятором и могут выполняться параллельно; при этом не требуется изменения режима работы.

7.4.6. Задачи и контекст

В данной книге термин «задача» используется для обозначения независимой процедуры управления.

Можно выделить два типа задач: программно управляемые пользовательские задачи (SMT) и процедуры обработки прерываний (ISR). Первые порождаются службами ядра реального времени или операционной системы и выполняются под управлением программы-диспетчера. ISR-процедуры обслуживаются по аппаратным запросам как ответ на прерывание. В данной архитектуре ISR относятся только к программному коду, который запускается на исполнение непосредственно аппаратной частью. Программно управляемые задачи иногда называют также пользовательскими задачами, поскольку они запускаются в пользовательском режиме.

Каждой задаче может быть присвоен её собственный уровень авторизации. Эти индивидуальные права обычно включаются/отключаются установкой соответствующих битов в регистре PSW (слово состояния программы) через соответствующие выводы порта ввода/вывода. Ассоциированный с каждой из задач набор элементов в совокупности называется контекстом. Термин «контекст» относится ко всем элементам, необходимым процессору для корректного определения состояния соответствующей задачи и для её дальнейшего исполнения. Контекст включает в себя используемые в процессе исполнения задачи регистры общего назначения ЦПУ, счётчика команд (PC) и регистры состояния (PCXI и PSW). В архитектуре TriCore реализовано эффективное управление контекстом задач аппаратными средствами.

Верхний и нижний контекст

Как показано на **Рис. 7.37**, контекст делится на две части: верхний контекст и нижний контекст.

В состав верхнего контекста входят старшие регистры адреса A10...A15 и старшие регистры данных D8...D15. Эти регистры определены как энергонезависимые с

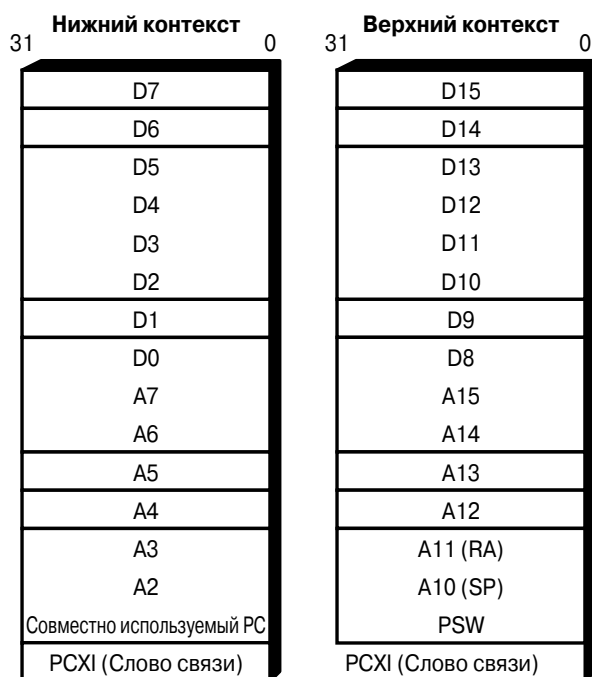


Рис. 7.37. Верхний и нижний контекст.

целью осуществления вызовов функций. Верхний контекст также включает в себя регистры PCXI и PSW.

Нижний контекст включает в себя нижние регистры адреса A2...A7, нижние регистры данных D0...D7 и счётчик команд (PC), а также регистр PCXI.

Связь между обеими частями контекста, верхней и нижней, осуществляется через регистр PCXI, в котором содержится так называемое слово связи — LINK WORD. Содержимое регистров, входящих в состав верхнего или нижнего контекста, хранится в областях памяти фиксированного размера, определённых в соответствии со словом связи (см. следующий раздел).

При возникновении прерывания верхний контекст автоматически сохраняется в памяти, а при возврате из программы обработки прерываний (ISR) — восстанавливается. Если ISR использует большее количество регистров, чем имеется в составе верхнего контекста, то сохранение и восстановление нижнего контекста будет осуществляться непосредственно этой программой обработки прерывания.

Область сохранения контекста

Поддержка систем с множественными связанными потоками управления в архитектуре TriCore обеспечивается за счёт использования связанных списков областей

сохранения контекста (CSA) фиксированного размера. Каждая область CSA включает в себя 16 слов во внутреннем ОЗУ, выровненных по границе 16-битного слова, и может содержать ровно один верхний или нижний контекст. Для указания неиспользуемых CSA существует специальный список. Когда возникает потребность в дополнительных областях сохранения контекста, они выбираются из этого списка, а когда потребность исчезает, вновь возвращаются в список неиспользуемых CSA. Процесс назначения и высвобождения CSA управляется аппаратно процессором, при этом указанные списки доступны («прозрачны») для прикладных программ. Впрочем, прямого доступа к спискам CSA и к памяти микроконтроллера требуют только программа инициализации и некоторые, относящиеся к операционной системе процедуры обработки исключительных ситуаций.

Быстрое переключение контекста

Увеличение производительности архитектуры TriCore достигается благодаря наличию унифицированного механизма аппаратного переключения контекста при вызове функций, процедур обработки прерываний и процедур обработки ошибок. Верхний контекст всегда автоматически сохраняется и восстанавливается аппаратными средствами, а сохранение и восстановление нижнего контекста производится опционально в случае его использования прикладной программой. Микроконтроллеры TriCore имеют уникальную систему управления памятью, которая обеспечивает одновременную пересылку до 16 слов данных между регистрами процессора и памятью, весь контекст может быть сохранён в памяти всего за одну операцию, что обеспечивает беспрецедентно высокую скорость его переключения.

7.4.7. Система обработки прерываний

Микроконтроллер поддерживает следующие виды запросов на обслуживание: запрос на обслуживание прерывания от периферийного устройства, запрос на прямой доступ к памяти (DMA) и внешнее прерывание. Для простоты, во всех этих случаях мы будем использовать термин «прерывание».

Входной код для ISR состоит из кодовых блоков, расположенных по адресу, запи-

санному в векторе прерывания. Каждый кодовый блок представляет собой вход для источника прерывания. Каждому источнику прерывания присвоен некоторый уровень приоритета. Все уровни приоритета программируются. Программа обслуживания использует уровень приоритета, чтобы определить, в каком месте в памяти расположен входной код обработчика прерывания.

Такая система распределения приоритетов программ обслуживания прерываний позволяет использовать вложенные прерывания. Запрос на обслуживание может прервать процесс обработки прерывания с более низким приоритетом. Прерывания с одинаковым уровнем приоритета не могут взаимно прерывать друг друга.

7.4.8. Система обработки ошибок

Обработка ошибок осуществляется с использованием так называемых ловушек — особого вида прерываний. Исключительные ситуации, возникновение которых отслеживается аппаратными или программными ловушками, можно отнести к следующим восьми основным классам:

- сброс;
- срабатывание внутренней защиты;
- ошибка при исполнении команды;
- управление контекстами;
- ошибка на внутренней шине или ошибка периферийного устройства;
- логическое значение «истина» (т.е. логическая 1), определённое для сигнала с НИЗКИМ логическим уровнем;
- системный вызов;
- немаскируемое прерывание.

Входной код для программ обработки ошибок включает в себя вектор кодовых блоков. Каждый такой блок содержит адрес точки входа для программы обработки ошибок. Когда ловушка срабатывает, её идентификационный номер (TIN) сохраняется в регистре данных D15. Процедура обработки ошибки использует этот TIN для того, чтобы определить точную причину возникновения ошибки. Наименьшему номеру TIN соответствует наивысший приоритет.

7.4.9. Система защиты

Наличие системы защиты позволяет программисту задавать права доступа к областям памяти, где расположены данные

или программный код. Это повышает защищённость операций процессорного ядра микроконтроллера от случайных аппаратных сбоев или от ошибок, которые могут «просочиться» через все процедуры тестирования. Кроме того, система защиты микроконтроллеров TriCore содержит средства для изоляции критических ошибок, что облегчает процесс отладки.

Уровни доступа

В микроконтроллерах с архитектурой TriCore каждой задаче может быть сопоставлен определённый уровень доступа, оптимальный с точки зрения выполнения её функций. Индивидуальный уровень доступа задаётся посредством установки соответствующих битов режима ввода/вывода в регистре состояния программы (PSW). Три уровня доступа называются User-0, User-1 и Supervisor:

- уровень User-0 присваивается задачам, которые не имеют доступа к периферийным устройствам. Задачи с уровнем User-0 не могут разрешать и запрещать прерывания;
- уровень User-1 присваивается задачам, имеющим доступ к незащищённым периферийным устройствам общего пользования. Обычно это подразумевает чтение/запись последовательных портов ввода/вывода, а также возможность осуществлять чтение содержимого регистров таймеров и большинства регистров состояния ввода/вывода. Задачи с данным уровнем доступа могут отключать прерывания;
- уровень Supervisor позволяет осуществлять чтение/запись в системные регистры и все периферийные устройства. Задачи с этим уровнем доступа могут отключать прерывания.

Модель защиты

Защита памяти в архитектуре TriCore основана на том, что в адресном пространстве памяти создаются области, каждая из которых имеет свои параметры доступа. Границы этих областей с соответствующими им параметрами доступа задаются в таблицах, размещённых в пространстве памяти, отведённой под регистры специальных функций ядра (CSFR). Одновременно сохраняется от двух до четырех идентичных набо-

ров таких таблиц, так называемых наборов регистров защиты (PRS). Когда система защиты активирована, микроконтроллер TriCore при обращении к памяти проверяет легальность адреса для каждой операции чтения и записи данных или выборки команды. Легальным является адрес, который принадлежит к одной из областей адресов, указанных в выбранном в настоящий момент PRS. При этом для операции, которая пытается осуществить обращение к памяти, должен быть разрешён доступ к текущей области адресов (путём задания соответствующего уровня доступа).

7.4.10. Сброс системы

Сброс и перезагрузку микроконтроллера TriCore могут вызвать следующие события:

- сброс по включению питания — осуществляется через соответствующий внешний вывод при включении питания микроконтроллера (холодный пуск);
- аппаратный сброс — осуществляется через соответствующий внешний вывод микроконтроллера в процессе его работы (тёплый пуск);
- программный сброс — осуществляется прикладной программой путём записи соответствующих значений в регистр запроса на сброс. Для предотвращения несанкционированного доступа к этому регистру предусмотрен специальный механизм защиты. В зависимости от версии микроконтроллера, запись в этот регистр может вызывать как частичный, так и полный сброс микроконтроллера;
- сброс от сторожевого таймера — запускается при возникновении состояния ошибки, распознанного сторожевым таймером;
- сброс при выходе из спящего режима — осуществляется через соответствующий внешний вывод микроконтроллера при его выходе из энергосберегающего (спящего) режима.

Процессорное ядро, проверяя содержимое регистра состояния сброса, может определить, какое именно событие вызвало сброс.

7.4.11. Система отладки

В архитектуре TriCore предусмотрены аппаратные средства, обеспечивающие возможность встроенной отладки (On-Chip

Debugging — OCD). Эти средства и ресурсы реализованы в виде не входящего в состав процессорного ядра модуля отладки (Debug Control Unit). Структура и функции этого модуля зависят от конкретной модели микроконтроллера. Дальнейшее описание модуля Debug Control Unit и его управляющих регистров выходит за рамки задач данной книги. Подробные сведения о модуле Debug Control Unit можно найти в документации на конкретные микроконтроллеры.

7.4.12. Модель программирования

Далее в этом подразделе обсуждаются следующие важные с точки зрения программного обеспечения особенности архитектуры TriCore: поддерживаемые типы данных, форматы размещения данных различных типов в регистрах и в памяти, поддерживаемые режимы адресации и структура памяти микроконтроллера.

Типы данных

Система команд TriCore поддерживает операции с логическими переменными, битовыми строками, символами, адресами, целыми числами со знаком и без знака, дробными числами со знаком, а также операции с числами с плавающей точкой единичной точности. Большинство команд работает только с одним определённым типом данных, однако некоторые из команд могут работать с различными типами данных.

Логические выражения

Логическое (булево) выражение может принимать значение ИСТИНА (TRUE) или ЛОЖЬ (FALSE). Значению ИСТИНА соответствует логическая единица (1), если речь идёт о результате вычисления, либо ненулевое значение, если речь идёт о проверке состояния переменной или содержимого регистра. Значению ЛОЖЬ соответствует логический ноль (0). Логическое выражение генерируется как результат сравнения или результат выполнения логической команды и может использоваться как операнд-источник в логических командах и командах условного перехода.

Битовые строки

Битовая строка — это упакованное в определённом формате битовое поле (непрерывная последовательность битов). Бито-

вые строки создаются и используются командами логического сдвига и командами работы с битовыми полями.

Символы

Символ — это единица представления данных разрядностью восемь битов. Значение символа выражается как короткое целое число без знака. Символы передаются в распакованном (не кодированном) виде.

Дробные числа со знаком

Архитектура TriCore поддерживает дробные 16-битные числа со знаком для DSP-арифметики. Данные в этом формате имеют один старший знаковый бит со значением 0 или 1 (для представления положительного или отрицательного числа соответственно), за которым идет неявная двоичная точка и дробная часть. Значения указанных данных лежат в диапазоне $[-1, 1]$. При их сохранении в регистрах микроконтроллера, в 16 старших битов записывается 16-битное дробное число, а в младшие 16 битов — нули.

Адреса

Адрес — это 32-битное число без знака.

Целые числа со знаком/без знака

Разрядность целых чисел со знаком и без знака обычно составляет 32 бит. Когда целые числа со знаком и без знака, имеющие меньшую разрядность, загружаются из памяти в один из регистров микроконтроллера, происходит расширение их формата до 32-битного, при этом «пустые» биты заполняются нулями или копируют знаковый бит.

Операции сложения и вычитания с учётом переноса (заёма) предусматривают возможность работы с целыми числами с многократно увеличенной точностью. При выполнении команд пересылки и маскирования целые числа рассматриваются как битовые строки. Сдвиговые операции с многократно увеличенной точностью могут быть реализованы путём комбинации команд сдвига единичной точности и команд извлечения данных из битового поля.

Числа с плавающей точкой единичной точности согласно IEEE-754

В зависимости от конкретной реализации архитектуры ядра, обработка чисел с

плавающей точкой единичной точности (в соответствии со стандартом IEEE-754) может осуществляться или с помощью прямых аппаратных команд, или путём программной эмуляции.

Форматы данных

Все регистры общего назначения имеют разрядность 32 бит, и большинство команд микроконтроллера работает с операндами, имеющими размер слова (32 бит). Если данные, считанные из памяти, имеют меньшую разрядность, то они должны быть соответствующим образом выровнены (путём вставки дополнительных знаковых битов или нулей), прежде чем над ними будут производиться какие-либо операции. Выравнивание адресов осуществляется иначе, нежели выравнивание данных. В первом случае, для обеспечения корректной передачи информации между адресными регистрами микроконтроллера и областью памяти 32-битные адреса должны быть выровнены по границе слова. Что же касается передачи информации между регистрами данных и памятью, то выравнивание может производиться по границе любой половины 32-битного слова, вне зависимости от его размера; обращение к байтам памяти может осуществляться при использовании побайтовой адресации любого допустимого типа. На **Рис. 7.38** представлены поддерживаемые форматы данных.

Данные в памяти и регистрах ЦПУ хранятся с использованием прямого порядка записи байтов (little-endian, т.е. младший значащий байт хранится в ячейке памяти с меньшим адресом). Этот порядок записи байтов (его иллюстрирует **Рис. 7.39**) применяется для хранения в памяти как данных, так и команд микроконтроллера.

Если микроконтроллер семейства TriCore подключён к внешнему устройству, в котором используется обратный порядок записи байтов (big-endian, в ячейке с меньшим адресом записывается старший значащий байт), то необходимое преобразование форматов записи обеспечивается с помощью шинного интерфейса. Как упоминалось выше, данные должны быть выровнены по границе байта, а если они имеют формат полуслова (16 бит), слова или двойного слова — по границе полуслова.



Рис. 7.38. Форматы данных, поддерживаемые микроконтроллерами семейства TriCore.

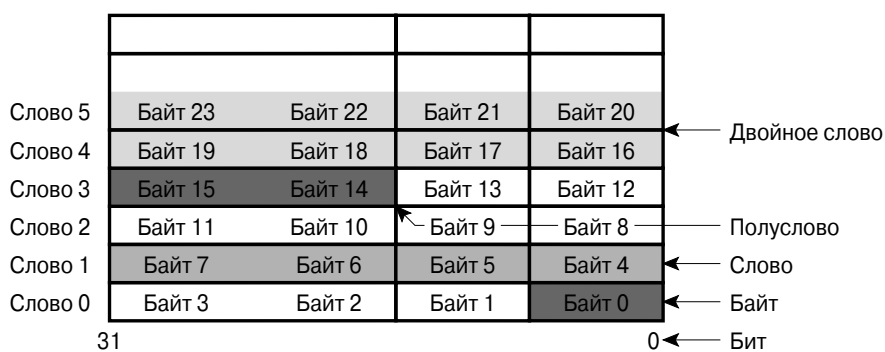


Рис. 7.39. Порядок записи байтов.

7.4.13. Организация памяти

Архитектура TriCore позволяет осуществлять адресацию до 4 Гбайт памяти. Контроллеры этого семейства имеют 32-битную адресную шину. Адресное пространство разделено на 16 областей или сегментов (с 0 по 15). Каждый сегмент имеет размер 256 Мбайт.

Старшие четыре бита адреса используются для выбора конкретного сегмента. Обращение к первым 16 Кбайт каждого сегмента может производиться с помощью абсолютной адресации или абсолютной битовой адресации.

Для сегментов 14 и 15 не поддерживается режим опережающего чтения. Доступ к ним осуществляется лишь в тех случаях, когда ЦПУ «уверено», что процесс обращения к памяти будет успешно доведён до конца. Данные сегменты памяти используются для размещения периферийных регистров специальных функций (PSFR) или регистров управления внешними периферийными устройствами. FIFO, регистры состояния периферийных модулей и других устройств также размещаются в этих адресных сегментах. Соответственно, здесь не приме-

ним режим опережающего чтения, поскольку его использование может привести к потере данных. В режиме User-0 доступ к устройствам, расположенным в сегментах 14 и 15, запрещён.

Сегменты с 0 по 7 зарезервированы. Любое обращение к ним инициирует запуск программы обработки ошибок. Доступ к сегментам 8...13 может осуществляться с определёнными ограничениями, в зависимости от версии процессора (эти ограничения указываются в документации на конкретную модель микроконтроллера).

Многие из способов адресации основаны на использовании адреса, который получается в результате прибавления некоторого значения (так называемого смещения) к содержимому базового адресного регистра. При этом, однако, необходимо контролировать величину смещения, чтобы получаемый адрес не выходил за границы текущего сегмента памяти (в противном случае, будет инициирована программа обработки ошибок). Таким образом, базовый адрес всегда может использоваться для определения сегмента памяти, который доступен в данный момент.

Регистры специальных функций процессорного ядра (CSFR) размещаются в границах одной области памяти размером 64 Кбайт. Базовый адрес этой области памяти зависит от версии микроконтроллера и приводится в соответствующей документации.

7.4.14. Режимы адресации

Помимо режимов адресации, которые упоминались при описании системы команд микроконтроллера, архитектура TriCore позволяет реализовать дополнительные режимы адресации с использованием коротких последовательностей команд.

Встроенные режимы адресации

Эти режимы адресации разрешают командам чтения и записи осуществлять обращение к элементарным блокам данных, хранящимся в таких структурах, как записи, массивы с прямым или последовательным доступом, стековая память и циклические буферы. Элементарные блоки данных могут иметь длину (разрядность) 1, 8, 16, 32 или 64 бит. В Табл. 7.3 перечислены поддерживаемые режимы адресации.

Эти режимы были выбраны так, чтобы обеспечить эффективную работу компиляторов C, упростить доступ к периферийным регистрам и эффективно использовать типичные для DSP-процессоров структуры данных (циклические буферы для алгоритмов цифровой фильтрации и индексирования с инвертированием битов для реализации функций быстрого преобразования Фурье (БПФ)).

Формат команд микроконтроллера TriCore (32-битный) был специально выбран таким образом, чтобы обеспечить как можно больше места для записи адреса при прямой адресации или, в случае использования косвенной адресации, — для записи смещения.

Абсолютная адресация

Абсолютная адресация хорошо подходит для обращения к периферийным устройствам или к глобальным данным. В этом случае в качестве адреса ячейки памяти используется 18-битная константа, указываемая непосредственно в теле команды. Полный 32-битный адрес образуется следующим образом: старшие четыре бита 18-битной константы используются в качестве старших четырёх битов 32-битного адреса, младшие 14 бит напрямую копируются в соответствующие им биты адреса, а в 14 бит между ними записываются нули.

Таблица 7.3. Встроенные режимы адресации

Режим адресации	Используемые адресные регистры	Величина смещения [бит]
Абсолютная	Не используются	18
Базовый адрес + смещение	Адресный регистр	10/16 (короткое/длинное)
С последующей модификацией	Адресный регистр	10
С предварительной модификацией	Адресный регистр	10
Циклическая	Пара адресных регистров	10
С инвертированием битов адреса	Пара адресных регистров	—

Адресация с использованием базового адреса + смещение

Адресация с использованием базового адреса и смещения удобна, когда необходимо осуществить доступ к структурным элементам и локальным переменным (с использованием указателя стека в качестве базового адреса), а также к статическим данным (с адресным регистром в качестве указателя базового адреса). Результирующий адрес представляет собой сумму содержимого адресного регистра и величины смещения (с учётом знака). Величина смещения составляет 10 бит или 16 бит для некоторых команд, что позволяет осуществлять адресацию всего доступного пространства памяти.

Адресация с последующей модификацией

Этот режим адресации использует находящееся в адресном регистре значение в качестве окончательного адреса, но после осуществления доступа к ячейке памяти изменяет содержимое адресного регистра, добавляя к нему 10-битное смещение со знаком. Наличие знака смещения позволяет сдвигать указатель адреса как вперёд, так и назад. Оба этих варианта могут быть использованы, например, для последовательного доступа к элементам массива или для удаления («выталкивания» по команде POP) данных из стека.

Адресация с предварительной модификацией

В этом режиме адресации к значению адресного регистра добавляется 10-битное смещение со знаком, и полученный результат сохраняется в адресном регистре в качестве конечного значения адреса, по которому и производится обращение. Знак выбирается в зависимости от того, вперёд или назад необходимо передвинуть указатель адреса. Данный режим адресации может быть использован, например, для последовательного доступа к элементам массива или для сохранения (PUSH) данных в стеке.

Циклическая адресация

Основное применение циклической адресации — это обращение к данным в циклическом буфере в процессе цифровой фильтрации. В этом случае текущее состояние указателя адреса сохраняется в паре ад-

ресных регистров. Регистр с чётным номером содержит базовый адрес, в старшей половине нечётного регистра содержится размер буфера, а в младшей — индекс буфера. Результирующим адресом является сумма базового адреса и индекса.

После того, как было произведено обращение по выбранному адресу, индекс изменяется (к нему прибавляется 10-битное смещение со знаком, которое указывается непосредственно в теле команды). Если это смещение меньше размера буфера, значение индекса будет автоматически изменяться по кругу от одного конца буфера к другому. К примеру, если буфер имеет размер 50 байт, а значение индекса составляет 48 и увеличивается на смещение, равное 4, то новое значение индекса будет равно 2 ($48 + 4 - 50$).

На циклический буфер наложены следующие ограничения:

- начало циклического буфера должно быть выровнено по границе, кратной 64 бит;
- размер буфера должен быть кратен формату данных, в неявном виде задаваемой командой, которая осуществляет обращение к памяти. Так, например, когда используется команда `LOAD WORD`, размер буфера должен быть кратен 4 байт, а при использовании команды `LOAD DOUBLE WORD` — кратен 8 байт.

Адресация с инвертированием битов адреса

Данный тип адресации применяется в алгоритмах быстрого преобразования Фурье (БПФ), поскольку эти алгоритмы обычно используют для представления результатов формат с инвертированием битов. Текущее состояние указателя адреса хранится в паре адресных регистров. Чётный (по номеру) регистр содержит базовый адрес, в младшей половине нечётного регистра содержится индекс массива, а в его старшей половине — величина модификации. Результирующий адрес представляет собой сумму базового адреса и индекса. После каждого обращения к памяти индекс инвертируется, к нему прибавляется значение модификатора и результат вновь инвертируется. Если, например, значение модификатора равно 1024 (как правило, оно представляет собой число, полученное путём инвертирования двоичного числа, значение которого равно

$1/2$ размера массива), результатом таких действий будет следующая последовательность чисел: 0, 1024, 512, 1536, 256, и т.д.

Использование данного метода адресации упрощает реализацию алгоритмов БПФ и увеличивает скорость их работы; в то же время инвертирование битов не является операцией с битовым полем, что может создать определённые проблемы при программировании.

Расширенные режимы адресации

Специальные режимы адресации, не поддерживаемые напрямую архитектурой TriCore, могут быть реализованы с использованием коротких последовательностей команд.

Индексная адресация

Команда ADDSC.A служит для масштабирования содержимого регистра-указателя адреса, что позволяет реализовать индексную адресацию массивов, расположенных в памяти и состоящих из байтов, полуслов, слов или двойных слов (коэффициент масштабирования равен 1, 2, 4 или 8 соответственно).

Адресация битовых полей обеспечивается командой ADDSC.AT, задающей слово, в котором расположен требуемый бит или битовое поле. Значения битов считываются с использованием команды EXTR.U и сохраняются в памяти при помощи команды LDMST (чтение/модификация/запись).

Относительная адресация с использованием счётчика команд (PC)

Как правило, при организации ветвления программ и вызова подпрограмм применяется относительная адресация с использованием содержимого счётчика команд. Однако поскольку этот метод адресации может привести к снижению производительности, напрямую (аппаратно) архитектура TriCore его не поддерживает. Для его реализации программными средствами следует загрузить в адресный регистр адрес ближайшей программной метки и использовать его в качестве базового.

Если используется динамически загружаемый программный код, то текущее значение счётчика команд может быть определено с помощью команды JL (jump and link), которая записывает адрес следующей

за ней команды в регистр A11. Адрес возврата для текущей процедуры должен быть сохранён заранее.

Расширенная абсолютная адресация

Расширенная абсолютная адресация реализуется путём последовательного исполнения двух команд. Команда LEA (загрузить действительный адрес) загружает 32-битное значение адреса в адресный регистр. После исполнения команды MOVH.A происходит обращение к памяти данных с использованием базового адреса и 16-битного смещения.

7.4.15. Регистры процессорного ядра

В архитектуре микроконтроллеров TriCore чётко определён набор регистров специальных функций процессорного ядра (CSFR). Эти регистры управляют работой процессорного ядра и содержат информацию о состоянии, позволяющую контролировать процесс исполнения команд. Регистры CSFR разделены на группы в соответствии со следующими осуществляемыми ими функциями:

- информация о текущем состоянии программы;
- управление стеком;
- управление контекстом;
- управление прерываниями и обработкой ошибок (ловушками);
- управление системой;
- защита памяти;
- управление отладкой.

Ниже в данном подразделе приводится краткий обзор этих регистров. Регистры специальных функций процессорного ядра дополняются набором регистров общего назначения (GPR). Полный список регистров CSFR и GPR приведён в **Табл. 7.4**.

Организация доступа к регистрам процессорного ядра

Для доступа к регистрам CSFR используются две команды: MFCR и MTCR. Команда MFCR (Move From Core Register) переписывает значение из выбранного (адресованного) регистра процессорного ядра в регистр данных. Она может быть исполнена при любом уровне доступа. Команда MTCR (Move To Core Register) переписывает данные из регистра данных в выбранный (адресованный) регистр CSFR. С целью предот-

Таблица 7.4. Список регистров процессорного ядра

Название регистра	Описание
D0...D15	Регистры данных
A0...A15	Адресные регистры
PSW	Слово состояния программы
PCXI	Информация о предыдущем состоянии контекста
PC	Счётчик команд
FCX	Указатель на первое свободное место в списке CSA
LCX	Указатель на последнее свободное место в списке CSA
ISP	Указатель стека обработчика прерываний
ICR	Контрольный регистр прерываний
BIV	Базовый адрес таблицы векторов прерываний
BTv	Базовый адрес таблицы векторов обработчика ошибок
SYSCON	Системный конфигурационный регистр
DPRx_0...DPRx_3	Набор регистров защиты сегментов данных ($x = 0...3$)
CPRx_0...CPRx_3	Набор регистров защиты сегментов кода программы ($x = 0...3$)
DPMx_0...DPMx_3	Набор регистров режима защиты данных ($x = 0...3$)
CPMx_0...CPMx_3	Набор регистров режима защиты кода программы ($x = 0...3$)
DBGSR	Регистр состояния отладочного режима
EXEVT	Признак наличия внешнего прерывания
SWEVT	Признак наличия программного прерывания
CREVT	Признак наличия аппаратного CSFR-прерывания
TR n EVT	Признак наличия триггерного события ($n = 0, 1$)

вращения несанкционированного доступа к CSFR, команда MTCR может выполняться только при уровне доступа Supervisor.

Кроме того, содержимое CSFR отображается (копируется) в верхнюю область текущего (локального) сегмента кода программы в пространстве адресов памяти. Благодаря этому отображению CSFR на адресное пространство состояние процессорного ядра оказывается полностью доступным для контроля, что повышает эффективность процесса отладки и эмуляции.

Примечание. Данный механизм доступа к регистрам CSFR может не поддерживаться процессорным ядром некоторых модификаций микроконтроллеров TriCore, в этом случае необходимо использовать команды MFCR и MTCR.

В системе команд TriCore отсутствуют команды, разрешающие обращение к отдельным битам или битовым полям, расположенным в CSFR; проведение операций «чтение-модификация-запись» для этих регистров также не допускается. Команда RSTV (сброс флагов переполнения) воз-

действует только на флаг переполнения в PSW, не изменяя другие биты этого регистра. Команда RSTV может быть исполнена при любом уровне доступа.

7.4.16. Регистры общего назначения (GPR)

На Рис. 7.40 показана структура регистров общего назначения микроконтроллера семейства TriCore. 32-битные регистры общего назначения поровну разделены на две группы из 16 регистров данных, или DGPR (D0...D15), и 16 адресных регистров, или AGPR (A0...A15). Разделение регистров адреса и данных облегчает применение механизма, позволяющего ЦПУ параллельно производить арифметические операции и операции обращения к памяти. В системе команд микроконтроллера предусмотрен ряд команд, обеспечивающих обмен информацией между регистрами данных и адресными регистрами. Они могут, например, применяться для генерации или модификации индексов при работе с таблицами.

Соседние регистры данных могут быть объединены попарно, образуя восемь рас-

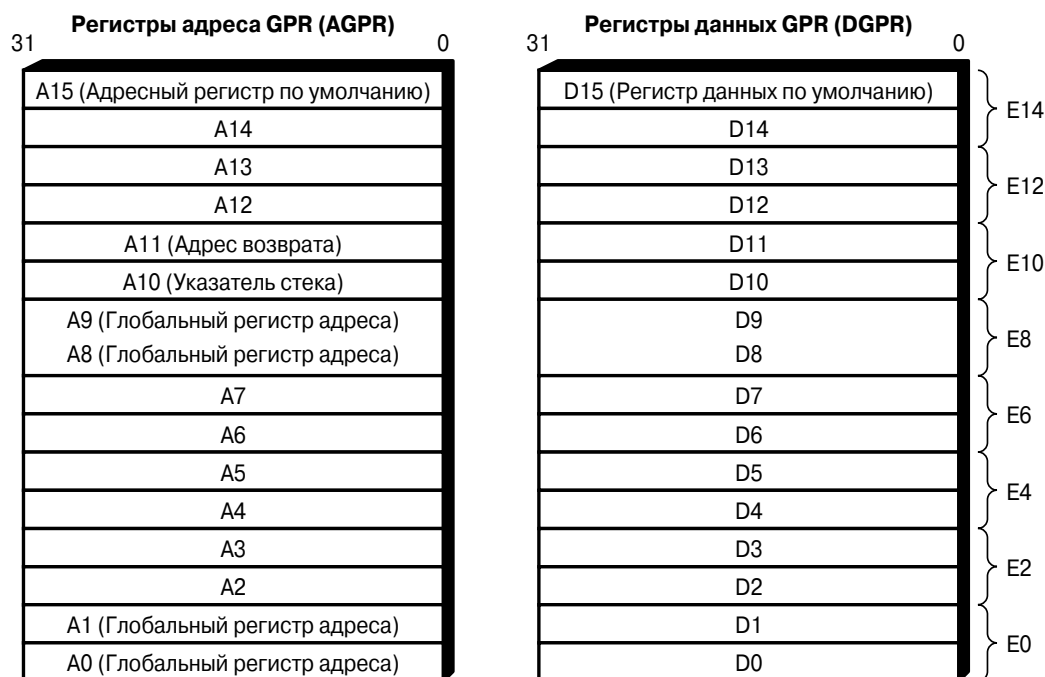


Рис. 7.40. Регистры общего назначения (GPR).

ширенных регистров (E0, E2, E4, E6, E8, E10, E12 и E14) для работы с 64-битными данными (см. Рис. 7.40).

Регистры A0, A1, A8 и A9 являются глобальными системными регистрами. Их содержимое не сохраняется и не восстанавливается при вызове подпрограмм, программ обработки прерываний и программ обработки ошибок. Регистр A10 используется как указатель стека (SP). Регистр A11 используется для хранения адреса возврата (RA) при вызове подпрограмм и исполнении команд условного перехода или для сохранения значения счётчика команд (PC) во время исполнения программ обработки прерывания или ошибки.

В то время как 32-битные команды имеют неограниченный доступ к регистрам общего назначения, большинство 16-битных команд используют по умолчанию A15 в качестве регистра адреса, а D15 в качестве регистра данных, что упрощает их применение. Поддержка 64-битных данных обеспечивается благодаря возможности их записи в регистровую пару, состоящую из двух соседних (чётного и нечётного) 32-битных регистров. В ассемблере микроконтроллера TriCore такая регистровая пара может обозначаться либо как два регистра (например, D9/D8), либо как один расширенный 64-битный регистр (например, регистр E8 состоит из двух связанных регистров D9 и

D8, при этом в D8 записывается младшее слово данных).

Необходимо отметить, что для записи чисел в формате с плавающей точкой не предусмотрено каких-либо особых регистров, и все операции с числами в таком представлении производятся через регистры данных. Запись и чтение чисел в формате с плавающей точкой осуществляются автоматически с использованием быстрого переключения контекста. Регистры общего назначения представляют собой важный элемент контекста задачи. Когда контекст задачи сохраняется или извлекается из памяти, он подразделяется на верхний и нижний. Регистры A2...A7 и D0...D7 являются частью нижнего контекста. Регистры A10...A15 и D8...D15 входят в состав верхнего контекста.

Регистры состояния программы

PC, PSW и PCXI хранят и отображают информацию о ходе исполнения программы. Содержимое этих регистров имеет большое значение при сохранении или восстановлении контекста задачи и соответствующим образом сохраняется, восстанавливается или модифицируется в ходе данного процесса.

Счётчик команд (PC) содержит адрес текущей исполняемой команды. Пять старших битов регистра PSW содержат флаги

состояния АЛУ, которые устанавливаются или сбрасываются при выполнении арифметических команд. Остальные биты PSW управляют уровнем доступа, выбором регистров защиты (PRS) и состоянием счётчика вложенных подпрограмм. Через регистр PCXI осуществляется связь с контекстом предыдущей выполнявшейся задачи, управление быстрыми прерываниями и автоматическим переключением контекста.

Регистры управления контекстом

Регистры управления контекстом включают в себя три указателя: FCX, PCX и LCX. Эти указатели служат для управления переключением контекста и используются в операциях сохранения и восстановления контекста.

Каждый указатель состоит из двух полей: 16-битного поля смещения и 4-битного идентификатора сегмента. Область сохранения контекста (CSA) занимает 16 слов (64 байт) в адресном пространстве, т.е. именно такой объём памяти, который необходим для сохранения верхнего и нижнего контекста. При инкрементировании поля смещения на единицу действительное значение адреса всегда возрастает на такую величину, которая соответствует его смещению на 16 слов относительно предыдущего адреса (т.е. содержимое поля смещения сдвигается на 6 бит влево). Общий объём используемого для хранения CSA пространства памяти в каждом из адресных сегментов составляет 4 Мбайт, что позволяет разместить 64К (65535) областей сохранения контекста.

Действительный адрес должен указывать на реально существующую область памяти. В противном случае поведение системы будет непредсказуемым.

В регистре FCX хранится указатель на начало списка свободного пространства, который всегда содержит адрес доступного в текущий момент времени CSA.

Указатель на предыдущее значение контекста (PCX), входящий в состав регистра PCXI, содержит значение адреса для CSA предыдущей задачи.

Регистр LCX содержит указатель на конец списка свободного пространства и используется для того, чтобы предупредить о возможном недостатке свободного места в списке CSA. Если значение регистра FCX после входа в программу прерывания или

исполнения команды CALL соответствует значению, содержащемуся в регистре LCX, то будет запущена программа обработки ошибок, которая, хотя операция сохранения контекста и будет выполнена, очистит список CSA.

Регистр управления стеком

Система управления стеком в архитектуре TriCore обеспечивает поддержку пользовательского (программного) стека и стека прерываний. В ней задействованы адресный регистр A10, указатель стека прерываний (ISP) и один бит из регистра PSW. В качестве указателя стека используется адресный регистр общего назначения A10. Начальное значение данного регистра определяется операционной системой при создании задачи, при этом каждой отдельной задаче назначается индивидуальная область стека. Указатель стека прерываний (ISP) позволяет отслеживать, не пытается ли программа обработки прерывания проинвестировать обращение к областям адресного пространства, выделенным под индивидуальные стеки задач (если бы это произошло, то привело бы к повреждению контекста программно администрируемых задач). В архитектуре TriCore реализовано автоматическое переключение на использование указателя стека прерываний вместо индивидуального указателя стека.

Регистр управления обработкой прерываний и обработкой ошибок

Три регистра CSFR предназначены для управления обработкой прерываний и обработкой ошибок: регистр контроля прерываний (ICR), регистр указателя на таблицу векторов прерываний (BIV) и регистр указателя на таблицу векторов обработчиков ошибок (BTV).

Регистр контроля прерываний (ICR) содержит текущее значение уровня приоритета ЦПУ (CCPN), бит включения/отключения системы обработки прерываний, значение приоритета прерывания, ожидающего обработки (PIPN), а также (в зависимости от версии микроконтроллера) биты управления схемой арбитража прерываний. Два остальных регистра содержат базовые адреса таблиц векторов прерывания (BIV) и таблиц векторов программ обработки ошибок (BTV).

При поступлении запроса на прерывание или при обнаружении ошибки (срабатыва-

нии аппаратной или программной ловушки) значение указателя на адрес в таблице векторов прерывания и программ обработки ошибок вычисляется следующим образом: значение приоритета прерывания / класса ошибки сдвигается на 5 бит влево, после чего производится его дизъюнкция (объединение по ИЛИ) с содержимым регистра BIV/BTV. Сдвиг на 5 бит влево приводит к тому, что интервал между отдельными адресами входа в таблицу прерываний оказывается равен 8 словам (32 байт). При выравнивании результирующих базовых адресов следует принимать во внимание два обстоятельства. С одной стороны, эти адреса должны соответствовать чётным байтам (т.е. выравнивание осуществляется по границам полуслова), а с другой стороны, он должен быть выровнен по границе, пропорциональной числу 2 в определённой степени. Значение показателя степени зависит от количества используемых входных адресов прерываний. Например, если используется полный набор из 256 входов в прерывание, то это потребует выравнивания адреса по границе 8 Кбайт (256×32). Для 8 классов ошибок (0...7) достаточно выравнивания по границе 256 байт (8×32).

Регистры управления системой

Для управления системой предназначены ещё три регистра: регистр управления конфигурацией системы (SYSCON), регистр блока управления локальной памятью программ (PMUCON) и регистр блока управления локальной памятью данных (DMUCON).

Регистры защиты памяти

В архитектуре TriCore предусмотрена поддержка аппаратного механизма защиты указанных пользователем областей памяти от несанкционированного чтения, записи или вызова команд. Кроме того, аппаратные средства защиты могут быть использованы как источник сигналов для блока отладки. Ядро TriCore поддерживает наборы регистров, содержимое которых определяет диапазоны адресов и права доступа для соответствующих областей памяти. Для защиты памяти данных и памяти программ используются отдельные наборы регистров.

Задавая значение двухбитного поля PRS в регистре PSW, можно выбрать в каждом из этих случаев до четырёх наборов регистров (четыре для данных и четыре для кодов

программ). Количество наборов регистров, используемых для защиты памяти, определяется в зависимости от конкретной модификации микроконтроллера TriCore.

Регистры защиты данных и кода программы

Каждый регистр из пары $DPRx\_n/CPRx\_n$ имеет размер два слова. В совокупности содержимое этих регистров определяет верхнюю и нижнюю границы защищаемой области памяти. Если нижняя граница больше верхней, то никакой проверки не проводится. Если нижняя граница совпадает с верхней, то соответствующая область памяти считается пустой.

Когда генерируется отладочный сигнал, значения $DPRx\_n/CPRx\_n$ воспринимаются как индивидуальные адреса, а не как границы области памяти. Если адрес, по которому осуществляется обращение к памяти, совпадает с содержимым одного или более регистров $DPRx\_n/CPRx\_n$, то генерируется сигнал, поступающий в модуль отладки. Под совпадением с $DPRx\_n/CPRx\_n$ понимается совпадение с содержимым регистра верхней границы ($CPRx\_n$).

Восьмибитный регистр режима защиты данных/кода программы определяет права доступа и условия генерации отладочных сигналов для защищаемых областей данных/кода программы, границы которых заданы в соответствующих регистрах.

Регистры управления отладкой

С целью поддержки встроенной системы отладки в архитектуру TriCore были дополнительно введены семь регистров. Содержимое этих регистров определяет условия, при которых наступает отладочное событие и действие, инициируемое при его наступлении, а также предоставляет информацию о текущем состоянии блока отладки. Точный алгоритм работы блока отладки зависит от характеристик конкретной модели микроконтроллера. Подробное описание работы этого алгоритма и используемых регистров можно найти в документации на конкретную модель.

7.4.17. Функциональные схемы 32-битных микроконтроллеров

На Рис. 7.41...7.43 приведены примеры функциональных схем трёх 32-битных микроконтроллеров.



Рис. 7.41. Функциональная схема микроконтроллера ТС1765.

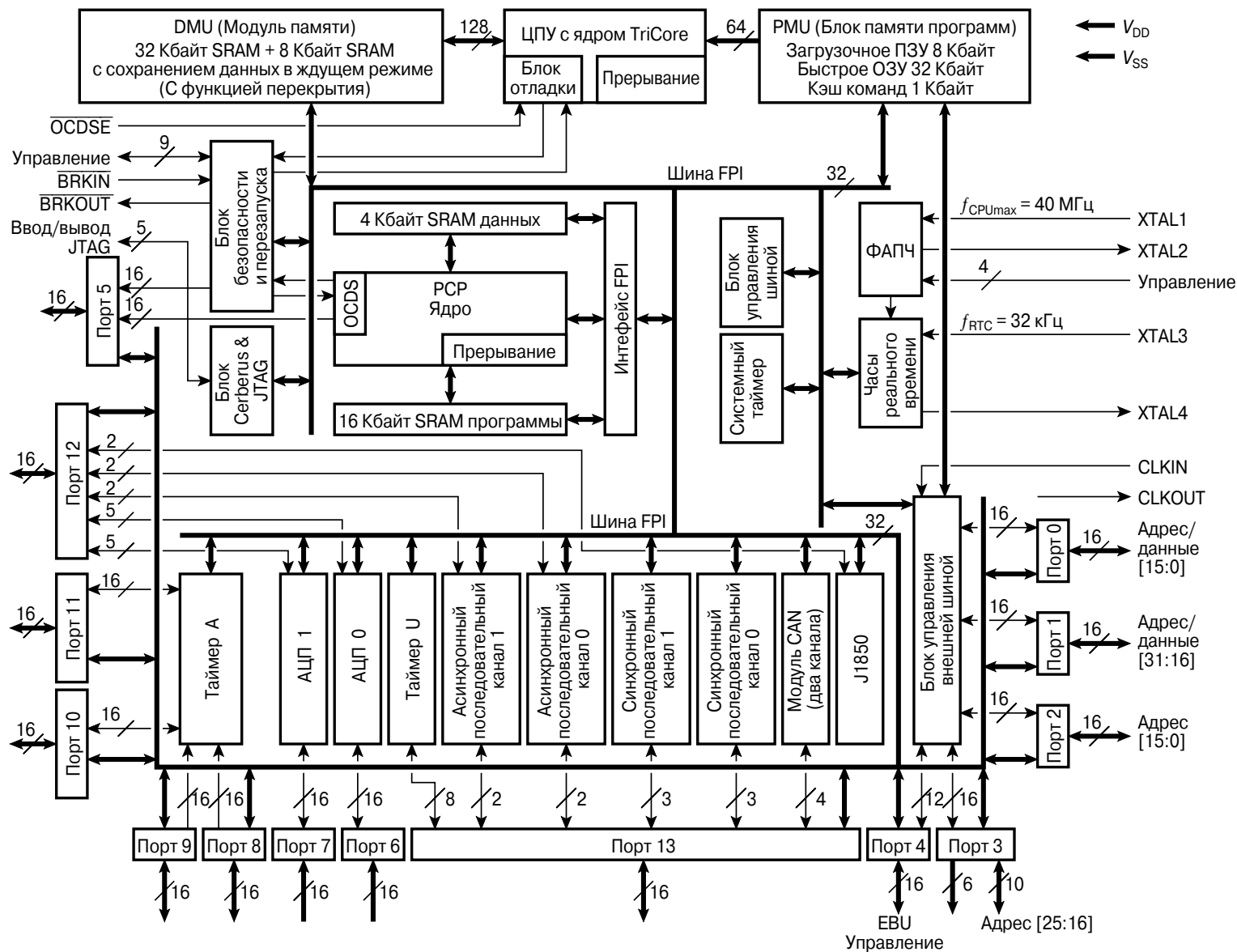


Рис. 7.42. Функциональная схема микроконтроллера TC1775.

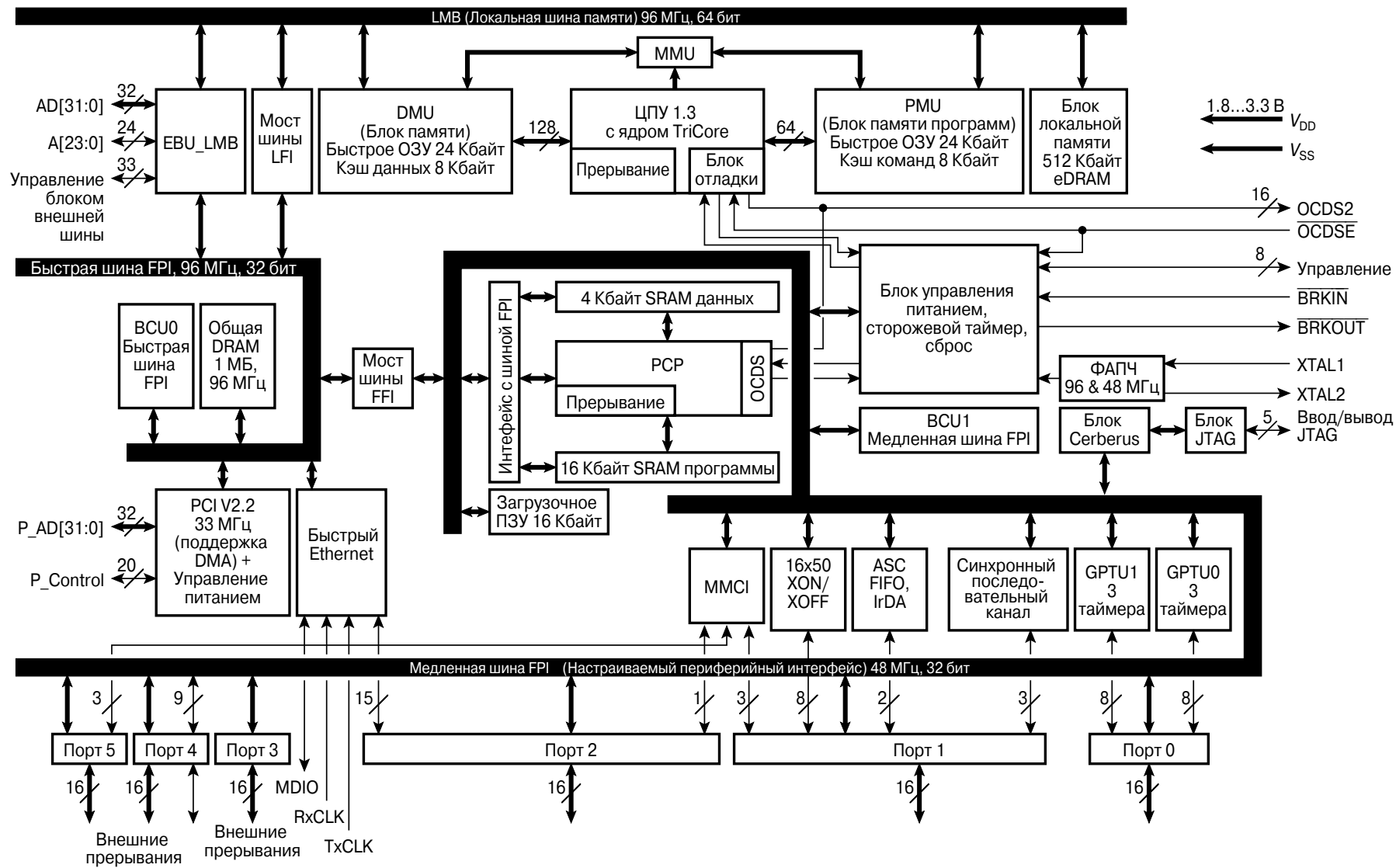


Рис. 7.43. Функциональная схема микроконтроллера TC11IB.

8. СМАРТ-КАРТЫ

8.1. Обзор

Микросхемы для смарт-карт (называемых также чип-картами) ждёт великое будущее: современные полупроводниковые технологии позволяют изготавливать сверхминиатюрные чипы, характеризующиеся небывалой производительностью. Наряду с внедрением инновационных концепций их производства, это создаёт предпосылки для использования смарт-карт в самых разнообразных областях применения.

Несомненно, смарт-карты будут играть чрезвычайно важную роль в глобальном информационном сообществе и сфере обслуживания.

8.2. Введение

Общение, являющееся базисом социальной жизни людей, столь же необходимо и в бизнесе. Компании, которые смогут обеспечить быстрый и эффективный обмен данными, окажутся победителями в конкурентной борьбе на любом рынке. Высокая скорость обмена информацией — это важнейший фактор, стимулирующий развитие сетевой инфраструктуры.

Процесс внедрения в нашу повседневную жизнь глобальных и удобных для обмена информацией («прозрачных») коммуникационных сетей означает не только физическую их реализацию, но и интенсивное формирование во всём мире «сетевого сознания». Если в былые времена интеллектуальная собственность бережно хранилась в подвалах банков и передавалась непосредственно из рук в руки (устно или в письменном виде), то в ближайшей перспективе обмен информацией будет осуществляться через открытые коммуникационные сети, а сама эта информация будет «пребывать в целостности и сохранности» в процессе такой передачи.

Таким образом, возникает новое требование к коммуникационным сетям: инфраструктура информационной безопасности сетей должна заменить банковские сейфы прошлого. В свою очередь, наличие такой инфраструктуры открывает возможности

реализации новых глобальных услуг в таких областях, как телекоммуникации, мультимедиа, электронные платежи, мониторинг состояния здоровья пациентов и многие другие, ещё не придуманные сферы применения.

С этой точки зрения смарт-карты представляют собой идеальное средство поддержки и вывода на рынок сетевых услуг такого рода.

8.3. Состояние рынка

Производство смарт-карт является одним из факторов, заметно влияющих на развитие национальных экономик. Всего несколько лет назад рынок смарт-карт был преимущественно европейским, но в настоящее время он стал практически всемирным, как в смысле проникновения на те или иные местные рынки, так и в связи с возрастанием доли предоставляемых местных услуг. При этом среднегодовой рост мирового рынка смарт-карт превышает 25%. Подобная ситуация стала возможной в результате глобализации сетевых услуг при возросших требованиях к обеспечению безопасности со стороны всех участников сети, а также благодаря низкому уровню инвестиций (как в программное обеспечение, так и в аппаратные средства), необходимых для создания высокотехнологичных систем на базе смарт-карт, и наличию легко внедряемой инфраструктуры (коммуникационных сетей).

8.3.1. Структура рынка микросхем для смарт-карт в зависимости от области применения

Рынок микросхем для смарт-карт, который на сегодняшний день не превышает 1% от общего объёма продаж микросхем, составляющего 118.5 миллиардов долларов в год, становится всё более значимым. При его годовом росте более чем на 25% можно ожидать, что уже в ближайшие годы продажи микросхем данного типа будут играть доминирующую роль.

Рост экономик высокоразвитых стран всё в большей степени обеспечивают ком-

паний, предоставляющие различные услуги; между тем, функции и возможности систем, использующих смарт-карты, в основном определяются применяемыми в этих картах микросхемами.

Область мобильных коммуникаций, на которую сегодня приходится около 45% продаж, судя по всему, удержит лидерство и в будущем. Далее в настоящее время следуют такие сегменты рынка, как оплата услуг (15%), идентификация пользователя (14%), платное телевидение (12%) и телекоммуникационные услуги (10%).

Наиболее перспективными с точки зрения темпов роста являются такие сегменты рынка, как идентификация пользователя и транспорт (45% и 28% среднегодового роста соответственно). В свою очередь, такая сфера применения смарт-карт, как предварительная оплата телефонных услуг, где задействовано огромное количество устройств, может «поглотить» до 50% от общего объёма выпуска микросхем для смарт-карт (в качестве средств безопасного хранения данных).

8.3.2. Требования рынка

Типичный для полупроводниковой техники набор требований рынка применительно к микросхемам для смарт-карт сводится к следующему:

- низкая цена;
- высокий уровень безопасности при хранении и передаче информации;
- низкое энергопотребление;
- большой объём памяти программ и данных;
- оптимальная технология корпусирования.

Рынок микросхем для смарт-карт характеризуется постоянным снижением цен, на 15...25% в год. Благодаря этому многие компании, занимающиеся производством полупроводниковой продукции, оказываются весьма заинтересованы в данном рынке и готовы к огромным финансовым вложениям в технические разработки, поскольку специфические требования этого рынка не могут быть удовлетворены, например, путём использования стандартного набора микросхем энергонезависимой памяти и микроконтроллеров.

8.4. Области применения

Успешность проектов с использованием смарт-карт зависит от объёмов их произ-

водства и, следовательно, от успешного решения достаточно большого количества различных проблем. Чем эффективнее производители полупроводниковых приборов смогут удовлетворить требования, относящиеся ко вновь возникшей области применения их продукции, тем большим окажется успех в реализации предлагаемых услуг, и/или оборудования, а значит — и финансовый успех. К области ответственности правительства относится установление легальных рамок, ограничивающих использование тех или иных решений на основе смарт-карт (например, принятый в Германии закон об электронной подписи), так как наличие законодательной базы позволяет обеспечить безопасный фундамент для их развития и ускорить процесс внедрения и распространения этих решений. Не менее значимым фактором успеха является чёткое понимание провайдером услуг, системным провайдером, производителем смарт-карт и всеми теми, кто вовлечён в создание систем на основе смарт-карт, реальных возможностей полупроводниковой индустрии. Понимание всех этих механизмов является важнейшей предпосылкой для того, чтобы в данной области произошёл прорыв, и технология безопасных услуг, базирующаяся на использовании смарт-карт, воплотилась в реальность.

Вот лишь минимальный перечень из бесконечного числа возможных вариантов применений смарт-карт, которые следует упомянуть в первую очередь: телекоммуникации (телефонные карты, SIM-карты мобильных телефонов), различные способы совершения платежей (электронные кошельки, кредитные карты), платное телевидение, транспорт (электронные билеты), электронные паспорта, мониторинг состояния здоровья (электронная карта клиента), контроль доступа к тем или иным ресурсам.

8.4.1. Цифровая подпись — подпись будущего

Электронный обмен деловой информацией связан с определённым риском, поскольку во многих случаях получатель послания (формуляра заказа, платёжного поручения и т.п.) не может быть абсолютно уверен в легитимности отправителя (т.е. в том, что заявленный в послании отправитель действительно является таковым).

Типовой протокол передачи данных, применяемый в настоящее время при обмене через Интернет, не создаёт каких-либо серьёзных препятствий ни для создания фальшивых идентификационных данных пользователя, ни для подделки посланий.

Только цифровая подпись обеспечивает необходимую легальность электронной коммерции и других видов законных деловых обменов данными с использованием электронных средств. На сегодняшний день это единственное средство реализации электронной подписи, уровень легитимности которой соответствует подписи на обычном бумажном документе; при этом обеспечивается компьютерная поддержка подтверждения аутентичности (подлинности) подписи и исключается возможность её подделки.

Некоторые страны уже сделали первые заметные шаги на пути к конечной цели — полной равнозначности перед законом электронной подписи и обычной («бумажной») подписи. Так, бундестагом ФРГ в августе 1997 года был принят закон об электронной подписи.

Необходимой предпосылкой полной эквивалентности цифровой и обычной подписи является создание условий, когда её подделка стала бы настолько более сложной по сравнению с подделкой обычной подписи, что мошенникам было бы невыгодно подделывать цифровые послания (в то время как сегодня такие послания защищены от мошенников намного хуже, чем бумажные). Проще говоря, требуется обеспечить абсолютную невозможность подделки цифровой подписи (здесь следует учитывать, какие именно сетевые технологии возможно будут доступны хакерам в течение ближайших нескольких лет). Таким образом, на планируемые к использованию системные компоненты должны быть наложены определённые ограничения.

С технической точки зрения, процесс аутентификации электронной подписи состоит в проверке, действительно ли в состав подписи входят секретные данные пользователя (так называемый секретный код или ключ (он же ПИН-код)). Эта проверка производится с использованием соответствующего открытого ключа. Системная инфраструктура должна быть организована таким образом, чтобы в случае положительного результата проверки у получателя послания

не возникало сомнений в том, что открытый ключ действительно принадлежит отправителю послания (электронного документа).

Применяемые алгоритмы, т.е. правила, в соответствии с которыми цифровая подпись извлекается из послания, используют секретный ключ, и должны гарантировать, что без знания этого секретного ключа партнера невозможно будет получить (вычислить) правильную цифровую подпись (а также, естественно, невозможно будет «взломать» сам секретный ключ).

В любом случае, секретный ключ ни в коем случае не должен быть раскрыт. Поэтому, учитывая возможность кражи или попыток анализа тех или иных компонентов персональной подписи, необходимо также принимать во внимание и такие сценарии, когда партнёр вводит электронную подпись через чужой терминал, который может содержать средства, раскрывающие секретный ключ.

Строгое соответствие между подписанным цифровым способом документом и тем его изображением, который подписант видит на экране дисплея, должно обеспечиваться специальной системой создания подписей (это вовсе не так просто, как может показаться — достаточно, например, представить, как много документов Windows может быть одновременно открыто на ПК...) Кроме того, такая система должна исключить возможность случайной подписи документов.

Современные смарт-карты предоставляют необходимую защиту от попыток нелегально получить информацию о секретном ключе. Следовательно, у пользователя появляется возможность подписывать документы, работая с чужого терминала, чем обеспечивается необходимая мобильность.

Защита ключа от нелегитимного чтения обеспечивается сочетанием аппаратных и программных средств безопасности.

Несмотря на то что используемые криптографические алгоритмы требуют наличия больших вычислительных ресурсов, они должны исполняться непосредственно на самой смарт-карте. В противном случае ключ придётся пересылать в компьютер терминала, а тот может оказаться инструментом, используемым злоумышленниками с целью взлома ключа.

Генератор случайных чисел, находящийся на смарт-карте, обеспечивает генерацию ключа непосредственно на самой карте. Этим устраняется риск потери секретности ключа эмитентом карты (или системой, используемой эмитентом).

Проанализировав все возможности смарт-карты, можно в итоге заключить, что она в любой ситуации остаётся управляемой системой, в отличие, например, от персонального компьютера. Эта управляемость является необходимой предпосылкой корректной оценки безопасности в соответствии со стандартом IT-SEC E4 (как того требует, например, закон об электронной подписи ФРГ).

8.4.2. Электронная торговля в сети Интернет

Интернет к настоящему времени превратился в поистине всеобъемлющую сеть обмена данными, которая также открывает для частных пользователей широкие возможности для поиска во всём мире различных товаров и услуг с последующим размещением заказов на них в режиме онлайн.

Важнейшим здесь следует считать вопрос безопасности платежей, и эта проблема должна быть решена вне зависимости от способа, которым осуществляется платёж: с помощью кредитной карты или путём использования удобных для расчётов «киберденег».

Платежи через Интернет могут осуществляться в самых разнообразных формах. Они могут базироваться на использовании банковских счетов (перечисление денег с использованием удалённого (домашнего) банковского офиса, электронных чеков), кредитных карт расчётов в так называемых свободно обращающихся электронных деньгах (E-Cash, Net-Cash).

Во всех этих случаях достижение необходимой безопасности является одним из основополагающих факторов. Между тем, чисто программные решения абсолютно не соответствуют предъявляемым требованиям из-за слабой устойчивости ПК к воздействию вредного или преступного программного обеспечения, такого как вирусы и трояны. Поэтому, хотя установка дополнительного аппаратного средства (смарт-карты или кард-ридера) связана с дополнительными денежными затратами, такие

средства в сочетании с криптографическими протоколами обеспечивают более высокий уровень безопасности.

Во Франции стандарт SET, применяемый в платёжных системах Visa и MasterCard, в настоящее время дополнен протоколом поддержки смарт-карт. Это позволяет использовать смарт-карты в качестве кредитных карт с самостоятельным подтверждением аутентичности.

Электронные кошельки, которые в Европе приобрели невиданную прежде популярность, очень хорошо подходят в качестве платёжного средства при оплате через Интернет. Соответственно, уже предпринимаются попытки внедрения немецких расчётных карт («GeldKarte») в качестве средства осуществления платежей через Интернет. Аналогичные планы разрабатываются и для других платёжных систем.

8.4.3. Банковское обслуживание на дому

В сфере предоставления банковских услуг на дому также необходимо решить проблемы обеспечения информационной безопасности, поскольку сегодня огромное количество пользователей желает получить возможность удалённого доступа к своему банковскому счёту. Между тем, до недавнего времени услуга «домашний банк» характеризовалась исключительно слабой системой безопасности. Мало того, что используется ненадежный, с точки зрения защищённости, список номеров транзакций (TAN), который всего-навсего избавляет лицо, подписывающее чек, от необходимости вручную заполнять документы и который далеко не всегда может рассматриваться как вполне безопасный. Даже в случае хранения персональных данных в банковской программе домашнего компьютера существует, по меньшей мере, один значимый изъян в обеспечении информационной безопасности, а именно: данные передаются через сеть в простом текстовом виде.

Использование смарт-карт в качестве замены TAN как инструмента обеспечения безопасности и дальнейшее применение соответствующих криптографических методов, например для шифрования, является тем направлением развития, которое уже в ближайшем будущем обеспечит эффективную реализацию банковских услуг на дому.

8.5. Сеть деловых взаимоотношений

Сеть деловых взаимоотношений, характерная для современного рынка смарт-карт и связывающая между собой производителей чипов, производителей карт, системных интеграторов и поставщиков услуг (провайдеров), будет характеризоваться следующими тенденциями:

- доминированием многонациональных бизнес-групп;
- вертикальной интеграцией (прямой и обратной);
- информационной безопасностью как основой развития этого бизнеса.

Бизнес, связанный с использованием микросхем для смарт-карт, в основном представляет собой крупные проекты. Центром, с точки зрения принятия решений и реализации процесса внедрения, становится компания, предоставляющая услуги конечным пользователям (например, провайдер Интернет-услуг, страховая компания, банк). При этом существует сложная, зависящая от специфики проекта, схема взаимоотношений между компанией, предоставляющей услуги конечным пользователям, поставщиком системных услуг, производителем микросхем и производителем смарт-карт.

Для этого бизнеса характерно существенное влияние внешних факторов, таких как государственная политика, законы, подзаконные акты, деятельность общественных организаций. Важнейшей предпосылкой для успеха проекта является обеспечение условий, при которых все эти факторы создавали бы благоприятную среду для реализации проекта, а в некоторых случаях и прямо способствовали этому (например, если речь идёт о картах медицинского страхования).

Основой для всех деловых связей в области разработки систем с использованием смарт-карт является философия обеспечения безопасности. Она объединяет:

- электронные компоненты (микросхемы, терминалы);
- взаимоотношения (например, сертификация потребителей и производителей);
- процедуры (к примеру, процедуры обмена техническими описаниями на компоненты и другой технической информацией);

- коммуникации (безопасная передача данных).

Рабочая среда, а также системная и сетевая инфраструктуры должны обеспечивать защиту информации как от атак извне, так и от атак изнутри (ведь содержимое смарт-карт — это электронные деньги в чистом виде или данные, стоимость которых ничуть не меньше).

Безопасность помещений (зданий) и сетевой инфраструктуры может быть достигнута путём создания зон, перемещение персонала в которых ограничено, а контроль доступа осуществляется с использованием биометрических параметров. Кроме того, может быть организован мониторинг всего здания или отдельных помещений с помощью видеокамер и датчиков движения, а также осуществлено разделение сетей персональных компьютеров и сетей рабочих станций при помощи брандмауэров (аппаратно-программных средств межсетевой защиты), либо предприняты иные меры аналогичного характера.

8.6. Продукция

8.6.1. «Чип на карте» — современное положение дел

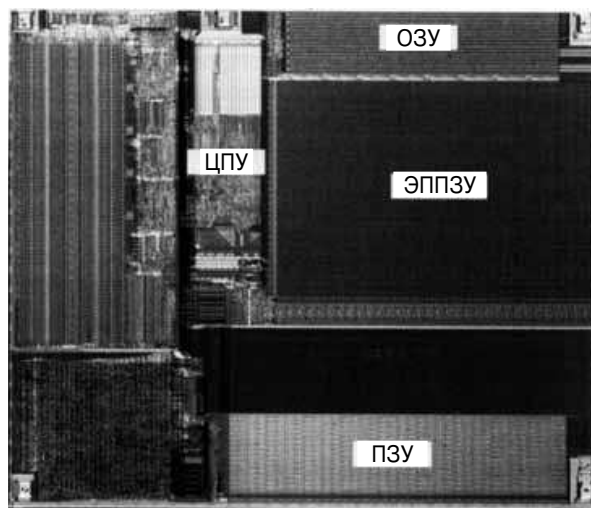


Рис. 8.1. Разводка современного высокопроизводительного контроллера безопасности для смарт-карт с 16-Кбайт ЭППЗУ и интегрированным криптопроцессором.

Современные микросхемы микроконтроллеров, предназначенные для применения в смарт-картах (типичный пример такой микросхемы показан на **Рис. 8.1**), ха-

рактизуются наличием 8-, 16- или 32-битного контроллера безопасности, а также наличием встроенной оперативной (ОЗУ) и энергонезависимой памяти. Объём ОЗУ такого процессора может достигать 2 Кбайт, объём ЭППЗУ — до 32 Кбайт, объём ПЗУ — также до 32 Кбайт. Опционально в состав микросхемы может входить аппаратно-оптимизированный криптопроцессор (512 и 1024 бит) и бесконтактный интерфейс с частотой передачи 13.65 МГц. При наличии такого интерфейса данные могут передаваться на расстояние от нескольких миллиметров до 10 см.

Концепция «семейства микроконтроллеров», исповедуемая компанией Infineon, нацелена на создание группы различных по цене, характеристикам и функциональным возможностям устройств, что позволяет удовлетворять самым различным требованиям рынка контроллеров безопасности для смарт-карт.

Самое успешное семейство контроллеров (SLE 66CxxP) базируется на специально разработанном для смарт-карт 16-битном процессорном ядре, вместе с которым на кристалле могут быть размещены 64...136 Кбайт ПЗУ, 2...4 Кбайт ОЗУ и 8...64 Кбайт ЭППЗУ или флэш-памяти. Производительность ядра может быть увеличена за счёт использования специализированных аппаратных решений. Например, криптопроцессор Advanced Crypto Engine (улучшенная шифровальная машина) совместно с полностью аппаратным генератором «истинно» случайных чисел обеспечивают быстрые и эффективные расчёты для таких криптографических алгоритмов, как RSA (длина ключа до 2048 бит), или эллиптических логарифмов. Аппаратные датчики обеспечивают защиту кристалла при любом режиме работы. Данное семейство контроллеров уже сегодня может служить основой для создания multifunctionальных смарт-карт. Наряду с высокой производительностью, все микросхемы оптимизированы с точки зрения минимизации энергопотребления и могут быть использованы в бесконтактных системах.

8.6.2. «Система на карте» — вызов будущего

При разработке портативного компьютера будущего («система-на-карте»), обеспе-

чивающего высокую степень защиты информации, предполагая, что ядром этой системы будет созданный специально для смарт-карт защищённый ЦПУ, необходимо принимать во внимание следующие факторы:

- разработка криптоконтроллеров связана с повышенными требованиями со стороны различных пользовательских приложений. Это обуславливает необходимость использования усовершенствованных или специализированных, масштабируемых и высокопроизводительных микроконтроллеров, удовлетворяющих высочайшим требованиям безопасности, особенно когда речь идёт о размещении нескольких устройств в непосредственной близости друг от друга на одном кристалле;
- при реализации периферийных устройств необходимо будет использовать модули, снабжённые двумя физическими интерфейсами: контактным и бесконтактным. Модули ввода/вывода, размещённые на смарт-карте, вместе с клавиатурой, датчиком отпечатка пальца, гибким ЖК-экраном, солнечными батареями, микрофоном и акустическими системами, будут представлять собой интерфейс «человек — машина»;
- объединение компонентов на карте открывает гораздо большие, нежели простое совершенствование полупроводниковых технологий, перспективы в плане развития кардинально новых подходов к технологии инкапсуляции. Только использование интеллектуальной концепции безопасности, основанной на мониторинге состояния всей системы в целом, в том числе — состояния кристалла, корпуса ИС и самой смарт-карты, позволит удовлетворять высочайшим требованиям по обеспечению безопасности, которые будут предъявляться к аппаратной части «систем-на-карте»;
- применение датчиков, сопроцессоров, а также дополнительных аппаратных средств обеспечения безопасности с поддержкой функции саморазрушения, являются теми направлениями работы по повышению безопасности, которые были заложены при проектировании новых поколений микросхем для смарт-карт.

8.7. Криптографическая экспертиза

В области асимметричной криптографии (криптографии с открытым ключом) за последние четверть века был разработан целый ряд процедур, рассчитанных прежде всего на решение двух математических проблем: факторизации больших чисел и вычислений дискретных логарифмов. Для существующих сейчас компьютерных мощностей каждая из этих задач не разрешима (при условии, что вычисления осуществляются для достаточно больших чисел). Именно этот факт может служить основой при создании информационно-технологических протоколов для аутентичной и конфиденциальной передачи электронных данных, поскольку для взлома защищённых таким образом посылок злоумышленнику необходимо будет решить вышеописанные математические проблемы.

Для реализации указанных алгоритмов требуется специализированный арифметический процессор, способный осуществлять операции с предельно большими числами. Разрядность этих чисел является критической величиной, определяющей безопасность протокола, и поэтому служит постоянным объектом для дискуссий.

Ранее считалось, что число, состоящее из 150 десятичных цифр, расшифровать практически невозможно. Однако сегодня, в связи с огромным прогрессом в области разработки аналитических алгоритмов, а также увеличением доступной вычислительной мощности компьютеров, уже используются числа разрядностью 200...300 десятичных цифр.

Стремясь соответствовать этим требованиям, полупроводниковое отделение компании Infineon AG разработало криптографический сопроцессор, предназначенный для применения в смарт-картах. С момента своего выхода на рынок более 5 лет назад и по настоящее время этот сопроцессор представляет собой пример наилучшего компромисса между скоростью работы, размером кристалла и потребляемой мощностью. Его архитектурная концепция допускает возможность масштабирования, т.е. в зависимости от своего предназначения модуль криптографического сопроцессора может иметь конфигурацию, оптимизированную по одному из перечисленных выше пара-

метров или по заданному сочетанию этих параметров.

В отличие от своих конкурентов, криптопроцессор компании Infineon построен как независимый процессор, т.е. он имеет свой аккумулятор, арифметико-логическое устройство, набор регистров, а также свой собственный набор команд. Таким образом, он представляет собой независимо программируемый сопроцессор, который может либо выполнять свою собственную задачу, либо значительно снизить нагрузку на основной процессор смарт-карты.

Данный полностью заказной криптографический сопроцессор является самым компактным и малогабаритным из всех, представленных в настоящее время на рынке. Применяемая при его производстве полупроводниковая технология обеспечивает в три с лишним раза большую по сравнению со стандартной технологией производства заказных микросхем плотность размещения транзисторов в кристалле. Это позволяет либо втрое увеличить функциональность при сохранении прежней площади кристалла, либо в три раза уменьшить размеры кристалла при сохранении той же функциональности.

Первое поколение этих арифметических процессоров было оптимизировано для работы с числами разрядностью до 300 десятичных цифр, а уже следующее поколение было разработано для протоколов, использующих 600 и более десятичных цифр. Вычисления производятся за время, значительно меньшее, чем время реакции человека (которое составляет примерно одну секунду) — и всё это на кристалле столь миниатюрном, что он может быть без проблем размещён в качестве сопроцессора на смарт-карте.

Поскольку высокая производительность криптографического сопроцессора была достигнута без использования умножителей частоты и при предельно малой потребляемой мощности, следовательно, его архитектура имеет достаточный резерв для обработки чисел ещё большей разрядности (если это потребуется для конкретного применения).

В качестве альтернативы факторизации чисел или вычислению дискретных логарифмов в настоящее время при разработке систем информационной безопасности рассматривается возможность использова-

ния еще одной математической проблемы: вычисление эллиптических логарифмов. Поскольку базовые операции при осуществлении такого расчёта требуют в несколько раз больше вычислительных ресурсов, чем традиционные арифметические команды процессора, тот же уровень безопасности может быть достигнут при использовании гораздо более коротких чисел. Достаточными, в настоящее время, считаются 50-рядные десятичные числа. Благодаря значительно меньшим требованиям к объёму памяти и скорости передачи данных, скорее всего рост коммерческого использования криптографических сопроцессоров для смарт-карт будет происходить за счёт алгоритмических процедур, базирующихся на обработке эллиптических логарифмов.

Поскольку архитектура криптопроцессоров компании Infineon хорошо подходит для реализации таких алгоритмов, эти криптопроцессоры представляют собой аппаратное решение, соответствующее не только требованиям текущего момента, но и требованиям будущих перспективных разработок.

Смарт-карты с поддержкой асимметричной криптографии могут использоваться в качестве мобильного персонального устройства обеспечения безопасности личных данных пользователя в процессе доступа к защищённым объектам или при оплате услуг и покупок. Этот доступ будет безопасным, аутентичным и, при необходимости, анонимным.

Кроме того, именно широкое применение асимметричной криптографии является тем необходимым условием, которое позволит разнообразить использование смарт-карт (в настоящее время их применение, в основном, специализировано). С использованием же упомянутых выше алгоритмов можно будет безопасно изменять или расширять функциональные возможности смарт-карты, даже после того, как она уже будет передана клиенту.

8.8. Чипы для многофункциональных карт

Смарт-карты в наше время в подавляющем большинстве ориентированы на специализированное применение (кредитки, телефонные SIM-карты, и т.п.). Однако всё явственнее становится необходимость сов-

мещения нескольких приложений в одной карте. Например, торговые сети желают иметь программу бонусов, которая позволит собирать информацию о бонусных баллах, начисляемых покупателю при использовании кредитной карты. Однако при этом возникает определённая проблема. Она состоит в том, что в уже проверенную экспертом кредитную карту нужно добавить функцию, которую нельзя проверить с точки зрения стоимости и универсальности.

Решение данной проблемы могут обеспечить многофункциональные карты, в которых гарантируется безопасное разделение исполняемых ими функций. Такие карты позволяют загрузить тщательно протестированные приложения совместно с другими, которые не подвергались такому тестированию; при этом последние не будут оказывать никакого влияния на функционирование первых.

Безопасное разделение функций может быть осуществлено различными способами. Один из многообещающих подходов заключается в использовании операционной системы с встроенным интерпретатором. С программной точки зрения, интерпретатор создаёт реально несуществующую (виртуальную) машину. Эта виртуальная машина может исполнять команды (так называемые байт-коды), подобные командам настоящего процессора, но физически она не является аппаратно реализованным процессором, а представляет собой машинный код (программу), который исполняется в настоящем, реальном процессоре.

Приложения в смарт-карте реализуются именно в таких байт-кодах и исполняются интерпретатором. Выгода подобного подхода заключается в том, что интерпретатор может ограничить права доступа исполняемого кода к данным других приложений. В отличие от аппаратно реализованных контроллеров, в которых машинный код имеет свободный доступ ко всему объёму памяти, это позволяет ограничивать доступ для исполняемого кода только данными, ассоциированными с конкретным приложением (т.е. с определённой функцией), не предоставляя ему возможности читать и изменять данные и коды других приложений.

Таким образом, появляется возможность добавления дополнительных приложений к уже существующему, отвечающему требованиям безопасности приложению

(например, кредитной карте) с сохранением достигнутого уровня безопасности. Так, торговая сеть может получить программу подсчёта бонусных баллов от любого, по своему выбору, поставщика программного обеспечения и загрузить её в кредитную карту пользователя, если последний решит участвовать в бонусной программе.

Безопасное разделение приложений позволяет дополнять смарт-карту новыми приложениями (функциями) непосредственно в процессе её использования. Владелец карты может сам определять, в каких программах он желает принимать участие. Поскольку смарт-карты применяются достаточно широко, внедрение интерпретаторов позволяет разрабатывать приложения на принципах открытой платформы быстро, эффективно и в стандартной форме, что обеспечивает сокращение стоимости разработки. Существенные в настоящее время расходы на производство и распространение смарт-карт в перспективе будут сведены практически к нулю, поскольку для загрузки требуемых приложений в уже существующие смарт-карты необходимо будет обеспечить только соответствующую инфраструктуру.

Сегодня наиболее конкурентоспособными из представленных на рынке интерпретаторов для смарт-карт являются три решения:

- JavaCard V2.1 — виртуальная машина производства компании SUN на базе языка Java;
- MultOs — виртуальная машина от поставщика платёжных систем Mondex;
- WinSC — решение, предлагаемое Microsoft.

Существуют различные варианты реализации интерпретаторов на смарт-карте — от полностью программных до практически полностью аппаратных. Каждый из вариантов имеет свои достоинства и недостатки как с точки зрения скорости выполнения операций, так и с точки зрения необходимого объёма памяти, уровня энергопотребления и гибкости в применении.

8.8.1. Поддержка интерпретаторов в микроконтроллерах Infineon

Компания Infineon разработала 32-битные микропроцессоры с наличием специализированной аппаратной поддержки интерпретаторов, которая учитывает специ-

фические для смарт-карт ограничения и требования. Процессоры семейства SLE88Cxx представляют собой специально ориентированные на применение в смарт-картах ЦПУ, в которых аппаратно реализованы наиболее часто используемые функции интерпретаторов, часть из которых была перечислена выше. Цель — оптимизация производительности и минимизация программного кода — достигается за счёт использования принципа параллельности при исполнении интерпретатором операций по обработке команд виртуального процессора (байт-кодов). Поскольку аппаратные средства при этом могут быть ограничены лишь теми функциями, которые уже интегрированы в ЦПУ, уровень энергопотребления микропроцессора останется небольшим. Такой подход с «упором» на базовые функции интерпретатора обеспечивает необходимую гибкость при совершенствовании или при разработке кардинально новых концепций интерпретаторов.

В результате могут быть созданы оптимизированные многофункциональные смарт-карты, обеспечивающие ускоренное исполнение байт-кодов в процессе интерпретации и, таким образом, повышенную производительность и более быстрое выполнение транзакций. Дополнительными преимуществами являются аппаратная поддержка безопасности работы и минимизация размеров кристалла. Это значит, что на кристалле можно размещать модули памяти достаточного объёма при сохранении минимального уровня энергопотребления, что допускает использование таких смарт-карт в системах с бесконтактным обменом данными.

Сочетание поддерживающих работу интерпретаторов контроллеров смарт-карт от Infineon и операционной системы или виртуальной машины (в зависимости от применения) даёт в совокупности высокопроизводительную и безопасную многофункциональную смарт-карту.

8.9. Интерфейс «человек-машина» как новый класс периферийных устройств

При реализации «системы на карте» важное значение с точки зрения пользователя приобретает удобство применения таких

систем, которое определяется интерфейсом «человек-машина».

С технической точки зрения, назначение этого интерфейса — «довести» до процессора, размещённого на смарт-карте, ту или иную информацию, предоставляемую её владельцем, и наоборот — обеспечить возможность владельцу карты получать информацию о её состоянии. Для этого используются дисплей, громкоговоритель и устройства ввода информации (световое перо, клавиатура) совместно с биометрическими датчиками (такими как датчик отпечатка пальца).

Следует особо подчеркнуть, что обработка данных осуществляется непосредственно процессором персональной смарт-карты и, следовательно, эти данные доступны только для владельца карты. Если интерфейсный блок встроен в терминал, то это может создать проблемы для индивидуальных пользователей, которые могут не знать или не помнить, каков порядок работы с устройствами ввода и отображения данных.

Показательным примером, если речь идёт о достоинствах «систем на карте», является их использование в качестве замены для так называемого ПИН-кода (персонального идентификационного номера клиента). В настоящее время подтверждением того, что карта используется её действительным владельцем, является ввод ПИН-кода. В качестве его возможной замены рассматриваются, например, биометрические методы идентификации. Если владелец смарт-карты сможет использовать для своей идентификации атрибут, который всегда находится под рукой, то использование смарт-карт значительно упростится и станет ещё более безопасным.

8.10. Технологии и производство

Наиболее продвинутые полупроводниковые технологии позволяют создавать микросхемы высочайшей производительности и минимальных габаритов, что вместе с инновационными концепциями производства (трёхмерные структуры и многокристальные модули) создаёт предпосылки для самого разнообразного применения смарт-карт.

Кристалл, расположенный на карте, — самая важная часть системы смарт-карты. Существующее ограничение на его разме-

ры, которые не должны превышать 25 мм², объясняется потенциальной опасностью повреждения хрупкой пластины кремния, находящейся внутри гибкой карты. Это ограничение в значительной степени определяет производительность, безопасность и соотношение цена/эффективность для всей системы.

Такое ограничение площади кристалла при одновременном росте требований к характеристикам микросхем для смарт-карт вызывает необходимость применения новейших технологий производства полупроводниковой продукции. К числу этих требований относятся высокая производительность вычислений (например, при расчёте криптографических алгоритмов), безопасность данных (например, при работе с электронными кошельками) и надёжность (например, в США зарегистрировано более 100 миллионов владельцев медицинских страховых карт). Наиболее современные из существующих на настоящий момент технологий должны быть как можно скорее адаптированы к специфическим требованиям, предъявляемым к процессу производства смарт-карт.

Большое значение имеет и использование новейших технологий корпусирования интегральных схем при размещении кристалла микропроцессора внутри гибкой пластиковой смарт-карты.

8.10.1. Передовые технологии

Отдел разработки систем безопасности и чип-карт компании Infineon AG ставит перед собой задачу обеспечить лидирующие позиции в производстве микросхем для смарт-карт с инновационной архитектурой, включающей в себя «многоязычное» ядро ЦПУ и высокопроизводительные периферийные устройства. Кроме того, рассматриваются возможности по дальнейшему развитию современных полупроводниковых технологий с целью создания, например, устройств энергонезависимой памяти (наличие такой памяти является одним из краеугольных камней в технологии производства микросхем для смарт-карт). В современной технологии производства встроенной флэш-памяти используются технологические нормы 0,2 мкм, что позволяет выпускать контроллеры безопасности для GSM-приложений, имеющие 32 Кбайт

встроенной ЭППЗУ на кристалле площадью менее 10 мм^2 . Переход в 2003 году к технологическим нормам 0.13 мкм стал важнейшим шагом вперёд в области создания ещё более высокопроизводительных микросхем, выгодным в том числе и с экономической точки зрения.

Отвечая требованиям рынка, компания Infineon устанавливала новые стандарты де-факто (путём выпуска новой высокопроизводительной продукции) для микросхем, использовавшихся в качестве аппаратной платформы смарт-карт. Эти стандарты, помимо всего прочего, включают в себя 0.6-мкм КМОП-технология в качестве базового производственного процесса микросхем контроллеров (при этом стандартный контроллер безопасности с 8-Кбайт ЭППЗУ, обычно используемый для GSM-приложений, занимает менее 8 мм^2 поверхности кристалла). Последовавшее в 1998 году внедрение 0.25-мкм технологического процесса существенно улучшило функциональность контроллеров и позволило увеличить объём встроенной памяти. С появлением флэш-технологии стало возможным быстро «персонализировать» память программ и память данных в соответствии с конкретными требованиями пользователей. В свою очередь, развитие технологии, базирующейся на использовании 20-см полупроводниковых пластин, значительно повысило экономические показатели при массовом производстве смарт-карт.

Следующим шагом в развитии смарт-карт будет интеграция памяти, изготовленной по технологии FRAM, в микросхемы контроллеров для смарт карт, что обеспечит дальнейшее снижение энергопотребления и более быстрый доступ к памяти.

8.10.2. Требования к технологии, продукции и схемным решениям

Поскольку микросхемы для смарт-карт могут разрабатываться только на основе самых передовых технологий, а требования к их производительности всё время растут, срок службы этих устройств достаточно ограничен. Для того чтобы обеспечить разработчикам возможность гибкого выбора и внедрения самых современных решений, интервал появления технологических новинок должен составлять примерно 1.25 года.

Смарт-карты используются в условиях значительных механических нагрузок и при воздействии факторов, способных вызвать коррозию материалов. Следовательно, очень важно предусмотреть правильный способ корпусирования кристаллов микросхем, поскольку чем тоньше чип, тем выше гибкость готовой смарт-карты. Это требует внедрения новых технологических процессов, позволяющих довести толщину чипов смарт-карт примерно до 120 мкм . С развитием перспективных технологических процессов, таких как интеграция на основе трёхмерных (3D) структур, можно ожидать снижения этой величины до $5...10 \text{ мкм}$.

Внедрение технологий 3D-структур в производстве полупроводниковых кристаллов микросхем позволит увеличить количество слоёв, задействованных в передаче электрических сигналов, при той же площади кристалла (для смарт-карт максимально допустимая, с точки зрения устойчивости к механическим нагрузкам, площадь поверхности кристалла составляет 25 мм^2). Взаимное экранирование этих слоёв обеспечивает дополнительную защиту от помех, что ещё больше увеличивает безопасность работы.

В заключение следует подчеркнуть, что высокая скорость обновления продукции и особенности конструкции микросхем для смарт-карт требуют специально подготовленных разработчиков, которые должны хорошо разбираться в вопросах безопасной передачи информации и обладать способностью оптимально реализовывать математические алгоритмы на кристалле минимального размера.

8.10.3. Требования, предъявляемые к готовой продукции

Производство смарт-карт характеризуется быстрым обновлением ассортимента выпускаемой продукции. Различные модели следуют одна за другой, причём время от времени происходит и переход к новому поколению полупроводниковых технологий. Эта тенденция, а также значительные колебания потребительского спроса, требуют от производителей максимальной гибкости в принятии решений на всех этапах цепи поставок.

Основную проблему здесь составляет сложность производимой продукции, а так-

же риск возникновения схемотехнических и технологических ошибок. Предварительным условием снижения этого риска является использование наиболее эффективных технологий производства и постоянный контроль готовой продукции и технологических процессов.

8.11. Информационная безопасность

Встроенная система безопасности смарт-карт, когда все защитные функции реализованы непосредственно «в кремнии», гарантирует конфиденциальность пользовательской информации, защиту от подделки и корректность доступа к данным.

8.11.1. Смарт-карта как система безопасности

Экстраординарные показатели роста, отмеченные в последние годы на рынке систем обеспечения информационной безопасности и производства ИС криптоконтроллеров, демонстрируют, сколь большое внимание уделяется вопросам безопасности в современных информационных технологиях.

Благодаря своим превосходным характеристикам, смарт-карты становятся стандартом де-факто среди средств обеспечения безопасности при обработке информации.

Основой эффективной защиты против незаконных манипуляций со смарт-картами является сочетание:

- аппаратной безопасности (на уровне микросхем);
- программной безопасности (на уровне операционных систем смарт-карт и прикладного программного обеспечения);
- системной безопасности (обеспечение безопасного взаимодействия между смарт-картой, считывающим устройством и базовой системой).

Высочайший уровень безопасности может быть достигнут лишь в том случае, когда производитель полупроводниковых приборов, производитель смарт-карт, дистрибьютор и системный интегратор заинтересованы в решении этой задачи и тесно сотрудничают друг с другом. При этом разработки каждого из участников команды в той области, где он обладает наиболее высоким уровнем компетентности, должны с максимально возможной эффективностью

обеспечивать решение общей задачи — построение системы информационной безопасности.

8.11.2. Аппаратная безопасность

Для того чтобы обеспечить максимально возможную на аппаратном уровне безопасность, следует обратить внимание на все этапы производственного цикла. При этом ответственность за обеспечение безопасности, связанной с архитектурой микросхемы, её схемотехнических решений и технологии её изготовления, возлагают на производителя. Он же гарантирует эффективность размещённых на кристалле средств обеспечения безопасности (так называемая технологическая философия безопасности) и защиту информации в процессе разработки и производства микросхем для смарт-карт.

8.11.3. Пирамида безопасности

Поскольку для различных применений смарт-карт требуются различные уровни безопасности, полупроводниковая промышленность должна выпускать широкий ассортимент микросхем для смарт-карт, параметры которых зависят от необходимого уровня безопасности конкретного приложения (т.е. возникает своего рода «пирамида безопасности»).

Различные ступени этой пирамиды представляют собой переходы от базового уровня безопасности (основанного на использовании энергонезависимой памяти) к аппаратным методам обеспечения безопасности, а затем и к использованию средств повышенной безопасности (например, криптографического сопроцессора или специальной технологии проектирования).

Самый высокий уровень обеспечения безопасности, являющийся при этом основным для большинства применений смарт-карт, может быть достигнут путём реализации криптографических алгоритмов с использованием открытого ключа. Цифровая подпись, разделение ключей и усовершенствованные схемы управления ключами — всё это возможно только с внедрением систем, поддерживающих криптографические алгоритмы с использованием открытого ключа. Выгода от обретения логической «уникальности», которую обеспечивает использование смарт-карты, состоит в

том, что любые попытки взлома становятся абсолютно неэффективными и потому, в конечном счёте, бессмысленными.

С целью обеспечения высочайшего уровня производительности при расчётах асимметричных алгоритмов, наиболее «продвинутые» контроллеры систем безопасности смарт-карт дополнительно имеют специальный математический криптографический сопроцессор, оптимизированный для расчёта таких алгоритмов.

Сочетая алгоритмическую безопасность криптографических решений, использующих открытые ключи, с физической и логической безопасностью, реализованной на уровне микросхем, смарт-карта является доступным и универсальным средством обеспечения информационной безопасности. Это означает, что производители микросхем для смарт-карт возлагают на себя чрезвычайно большую ответственность, поскольку безопасность всей системы самым непосредственным образом зависит от характеристик безопасности микросхемы, встроенной в смарт-карту.

8.11.4. Безопасность как совокупность технических и организационных мер

Даже при использовании последних достижений в области схемотехники и производства микросхем невозможно гарантировать стопроцентную и постоянную защиту от хакерских атак. Обеспечение информационной безопасности в значительной степени — динамический процесс, и он должен быть организован таким образом, чтобы технические возможности (ноу-хау) разработчиков микросхем всегда опережали возможности хакеров, и этот разрыв сохранялся бы постоянным или даже увеличивался. Поскольку данный процесс непрерывен, его влияние на характеристики продукции сказывается в течение всего срока её службы. Это означает, что необходимо уделять особое внимание проведению мероприятий технического и организационного характера для систем с использованием смарт-карт.

С точки зрения перспективы необходимо заменять существующие микросхемы для смарт-карт на микросхемы нового, бо-

лее производительного поколения через два, максимум три года. Это соревнование между полупроводниковой промышленностью и потенциальными возможностями хакеров требует от производителей микросхем значительных усилий, связанных с постоянным обновлением ассортимента выпускаемой продукции. Причём такое обновление необходимо осуществлять в дополнение к естественной (и характерной для всех остальных областей полупроводниковой индустрии) смене поколений продукции, вызываемой внедрением новых концептуальных и технологических решений. Это обстоятельство, как минимум, на порядок увеличивает уровень сложности и объём трудностей, связанных с использованием смарт-карт, по сравнению со «стандартным» полупроводниковым бизнесом.

8.12. Перспективы

В будущем смарт-карты будут играть одну из центральных ролей в обществе, основанном на глобализации информационного пространства и услуг. В поддержку этого утверждения можно привести следующие аргументы.

Смарт-карты — это ключ к информационному обществу XXI века

Уже сегодня смарт-карты нашли своё применение там, где безопасность идентификации и хранения персональных данных имеет большое значение. Их роль ещё более возрастёт в случае реализации сценария, описанного ниже.

Смарт-карты — основа безопасности финансовых технологий будущего

Смарт-карты могут хранить (не хуже, чем в сейфе банка) ключи, наличие которых позволяет за счёт использования криптографических методов обезопасить обмен данными в любой форме. Основой указанной технологии является электронная подпись, которая при работе в сети служит адекватной заменой «ручной» подписи. Чтобы обрести законную силу при осуществлении онлайн-транзакций, электронная подпись должна удовлетворять лишь минимальному набору требований.

Смарт-карта — гарант качества жизни индивидуума

С появлением смарт-карт впервые в истории стало возможным хранить и обрабатывать персональные данные независимо от центральных архивов или баз данных. Таким образом, смарт-карты защищают индивидуальную, частную жизнь. Используя смарт-карту, можно отказать кому бы то ни было в доступе к своим персональным данным либо разрешить этот доступ, что значительно улучшает информационную безопасность каждого человека.

Мало того — использование смарт-карт увеличивает мобильность, поскольку любой человек всегда может иметь при себе все необходимые данные, что даёт ему возможность пользоваться многочисленными цифровыми услугами всюду, где бы он не находился.

Смарт-карты — деньги будущего

Повсюду — в киоске, в супермаркете, в метро, в автобусе или при покупке через Интернет — можно осуществлять удобную и безопасную оплату при помощи смарт-карты.

В ближайшем будущем каждый человек будет иметь в своём кармане в среднем от трёх до пяти смарт-карт, а их общее количество во всём мире достигнет 21...35 миллиардов

Всевозможные смарт-карты различных типов распространятся по всему миру: телефонные карты, карты системы Eurocheck, кредитные карты, карты медицинских данных, карты платного телевидения, карты в качестве электронных кошельков, идентификационные карты, автомобильные ключи, разнообразные карты доступа (офисные, для ПК, для доступа в зоны безопасности) и т.д. При этом количество смарт-карт на душу населения в индустриально развитых и развивающихся странах будет примерно одинаковым.

Играя заметную роль в производстве микросхем для контактных и бесконтактных смарт-карт, компания Infineon обладает всеми необходимыми технологическими возможностями по созданию многофункциональных микросхем для смарт-карт, способных удовлетворять требованиям будущего.

9. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Уже на заре автомобилестроения конструкторы первых моделей автомобилей предложили использовать в них различные электрические устройства. Сначала это были простейшие схемы зажигания, затем появились электрические осветительные приборы, а также автомобильные клаксоны. К тому времени автомобили уже оснащались аккумуляторами, зарядка которых производилась с помощью электрогенераторов. Вплоть до начала 1960-х годов электрооборудование большинства серийных автомобилей включало в себя всё тот же весьма скудный набор, претерпевший лишь незначительные усовершенствования, важнейшим из которых оказался переход к стандартному напряжению аккумулятора +12 В (вместо первоначально использовавшегося напряжения +6 В).

9.1. Автомобильная электроника

Первые электронные устройства стали применяться в автомобилях в 1960...1970-е годы. В связи с этим следует упомянуть электронные системы зажигания, регуляторы освещения, реле прерывателя указателей поворотов, различные индикаторы на панели приборов, а также радиоприёмники. Начиная с этого момента, развитие автомобильной электроники шло всё возрастающими темпами. Когда в конце 1970-х годов появились первые микроконтроллеры, вряд ли можно было предположить, что спустя каких-то 20 лет в автомобиле будет использоваться до 80 микроконтроллеров и более сотни электромоторов, а также несметное количество различных электронных компонентов, в том числе стабилизаторы напряжения, мощные МОП-транзисторы (MOSFET), интегральные микросхемы, реле, всевозможные датчики, конденсаторы и дроссели; все эти компоненты входят в состав различных специализированных контроллеров, которых в современном автомобиле насчитывается более 50. Сегодня развитие автомобильной электроники привело к созданию таких устройств, как электронные системы управления двигателем (в том числе, системы впрыска топлива, лямбда-

регуляторы и электромеханические регуляторы положения дроссельной заслонки), системы управления коробкой передач, антиблокировочные системы тормозов (ABS), подушки безопасности, системы кондиционирования, управление освещением, электрические стеклоподъёмники и регуляторы положения зеркал, различные датчики (например, датчики дождя или датчики системы контроля сближения), встроенные системы диагностики и многофункциональные устройства отображения различной информации вплоть до доступа в Интернет, а также многие другие устройства.

Сложности, с которыми сталкиваются разработчики автомобильной электроники, определяются стремлением обеспечить «военный» уровень надёжности и, в то же время, удержать цену на приемлемом для массового потребителя уровне. Данные требования предусматривают возможность работы в очень широком диапазоне температур ($-40...+150^{\circ}\text{C}$, а в некоторых случаях и до $+200^{\circ}\text{C}$), в условиях воздействия высоких механических нагрузок (вибраций) и химически агрессивной окружающей среды (солёной воды, различных масел и т.д.). Особое внимание уделяется выполнению требований по электромагнитной совместимости (ElectroMagnetic Compatibility — EMC) автомобильной электроники, как в плане снижения уровня электромагнитных излучений, так и в плане повышения помехоустойчивости. Например, для того чтобы обеспечить функционирование критических с точки зрения безопасности узлов при значительном уровне внешних помех, приходится применять целый ряд дорогостоящих технологий. Кроме того, необходимо гарантировать высочайшую надёжность и минимальное число отказов электронных систем при работе в течение 6000 и более часов, как и возможность замены тех или иных компонентов даже спустя 15 лет после снятия их с производства. Используемые технологии должны также предотвращать электрический пробой компонентов и обеспечивать высокую степень их защиты от электростатических разрядов (Electro Static Discharge — ESD).

Несмотря на все уже достигнутые успехи в разработке автомобильной электроники, её развитие только начинается. Заглядывая в будущее, резонно предположить, что электроника будет играть всё большую роль в автомобилях. По оценкам экспертов, до 90% будущих инноваций в области автомобилестроения будут связаны с электроникой. В первую очередь, речь идёт об информационно-развлекательных и телематических системах, где большое значение приобретёт обмен данными между отдельными контроллерами автомобиля, между контроллерами автомобиля и пассажирами или между автомобилями/пассажирами и окружающим миром.

При описании современного автомобильного электрооборудования часто употребляется термин «управление по проводам» (x-by-wire). Речь идёт о переходе от механических устройств управления автомобилем к электронным системам управления. Так, например, термин *brake-by-wire* относится к тормозному устройству с электрическим приводом, которое с помощью проводов соединено с педалью тормоза. При этом жизненно важно, чтобы все три этих компонента (педаль тормоза, соединительные провода и собственно исполнительное устройство) надёжно работали в любых условиях. Другими примерами использования данной технологии являются электромеханическое рулевое управление (*steer-by-wire*), электронная система переключения передач (*shift-by-wire*), система управления положением дроссельной заслонки (*throttle-by-wire*), клапаны с электромеханическим приводом (*valve-by-wire*), система управления стеклоочистителем (*wipe-by-wire*) и, наконец, электронная система запуска двигателя (*start-by-wire*). Все эти устройства характеризуются большими потребляемыми токами и мощностями, что сложно обеспечить при использовании стандартного «автомобильного» напряжения +12 В. В связи с этим в настоящее время обсуждается вопрос о целесообразности использования в автомобиле источника дополнительного напряжения +42 В.

Появление в автомобиле всё большего количества электронных устройств связано с целым рядом факторов, в том числе с необходимостью обеспечить соответствие автомобилей требованиям по охране окружа-

ющей среды в условиях жёсткой ценовой конкуренции и постоянно растущих требований к комфортабельности автомобилей и обеспечению безопасности водителей и пассажиров.

В настоящее время довольно трудно предугадать, в каком направлении пойдёт дальнейшее развитие автомобильной электроники. Можно только предположить, что стоимость электрооборудования, сегодня составляющая около 20% от общей стоимости автомобиля, в течение ближайших 10...15 лет возрастёт до 30...40%, а, может быть, и до 50...60%. При этом за тот же период времени доля полупроводниковых электронных систем в составе автомобильного электрооборудования увеличится с нынешних менее 50% до 70%.

9.2. Кузовная электроника и системы обеспечения комфорта

Неотъемлемым атрибутом современных автомобилей практически всех классов являются такие системы, как, например, электропривод боковых зеркал, системы кондиционирования воздуха или обогрева сидений. Среди автомобильных электронных устройств подобного назначения наибольшее распространение получили:

- блоки управления кузовной электроникой и осветительными приборами — в настоящее время составляют до 50% рынка в данной сфере;
- модули управления стеклоподъёмниками и регулировки положения сидений — примерно 15% рынка;
- системы кондиционирования воздуха — примерно 11% рынка.

Основная техническая проблема, возникающая при проектировании подобных устройств, состоит в необходимости обеспечить как можно меньший потребляемый ток, поскольку их питание, как правило, осуществляется непосредственно от аккумуляторной батареи автомобиля даже при выключенном зажигании. С другой стороны, температурные условия их работы (–40...+105°C) значительно менее жёсткие, чем условия работы электронных устройств управления двигателем или коробкой передач.

9.2.1. Системы управления электропитанием и осветительным оборудованием автомобиля

Контроллеры электропитания и модули управления осветительным оборудованием автомобиля являются наиболее значимыми устройствами кузовной электроники. Список этих приборов и диапазон выполняемых ими функций очень широк.

В первую очередь, речь идёт об электронных модулях управления осветительным оборудованием автомобиля, к которому относятся как внутренние (освещение салона), так наружные электроосветительные приборы — фары ближнего и дальнего головного света, указатели поворота, стоп-сигналы, габаритные фонари и т.п. Помимо основных, управляющих, функций, эти контроллеры, как правило, осуществляют ещё и системную диагностику, т.е. отслеживают отказ ламп, обрыв электропроводки или ошибки в работе того или иного осветительного оборудования. Данные тестирования заносятся в память контроллера, а водитель информируется о возникшей неисправности. Некоторые типы контроллеров способны не только собирать информацию о состоянии системы, но и обеспечивать дублирование вышедшего из строя узла за счёт передачи части его функций другим узлам автомобиля. Так, например, в случае неисправности фонаря заднего хода, его функцию берёт на себя задний противотуманный фонарь, яркость свечения которого соответствующим образом понижается. Понижение яркости реализует схема широтно-импульсной модуляции (ШИМ), работающая на частоте, примерно равной 100 Гц, обеспечить которую невозможно при использовании электромеханических реле.

Как правило, современные электронные модули обеспечивают управление осветительными приборами мощностью до 600 Вт. За счёт применения более эффективных полупроводниковых компонентов потери мощности могут быть снижены до 7...10 Вт, благодаря чему можно обойтись без дорогих и тяжёлых теплоотводящих радиаторов. Кроме того, всё шире используются много-

канальные решения, например модули, имеющие 4 независимых канала управления лампами. Это позволяет достичь миниатюризации компонентов, снизить их стоимость и габариты. В результате, контроллеры, становясь всё меньше по размеру, обеспечивают при этом лучшую функциональность и большее удобство использования. Светотехнические модули последнего поколения (см. **Рис. 9.1**) не содержат предохранителей. Силовые полупроводниковые компоненты теперь недоступны — они «спрятаны» непосредственно позади переключателя указателей поворотов на приборном щитке автомобиля, при этом не нужны никакие соединительные провода между выключателем и силовым модулем.



Рис. 9.1. Этапы развития контроллеров осветительного оборудования автомобиля.

Одним из ведущих производителей кузовной электроники является компания Infineon Technologies, которая предлагает очень широкий ассортимент различной продукции, начиная от нижних¹⁾ ключей (N1TFET), схем управления реле и светодиодными индикаторами (многоканальные N1TFET), вплоть до интеллектуальных верхних²⁾ ключей (PROFET, HiC-PROFET) и сложных приёмопередающих устройств, использующих протоколы CAN или LIN. Вечают этот список (см. **Рис. 9.2**) высокопроизводительные микроконтроллеры с 16-битным или 32-битным ядром.

Применение ключей серии PROFET (структурная схема данного ключа приведена на **Рис. 9.3**) имеет целый ряд преимуществ, важнейшее из которых вытекает из самой концепции верхнего ключа, когда положительное питающее напряжение пос-

¹⁾ Нижние ключи предназначены для коммутации нагрузки, подключённой к шине питания, на землю. — *Примеч. ред.*

²⁾ Верхние ключи предназначены для коммутации нагрузки, подключённой к земле, на шину питания. — *Примеч. ред.*

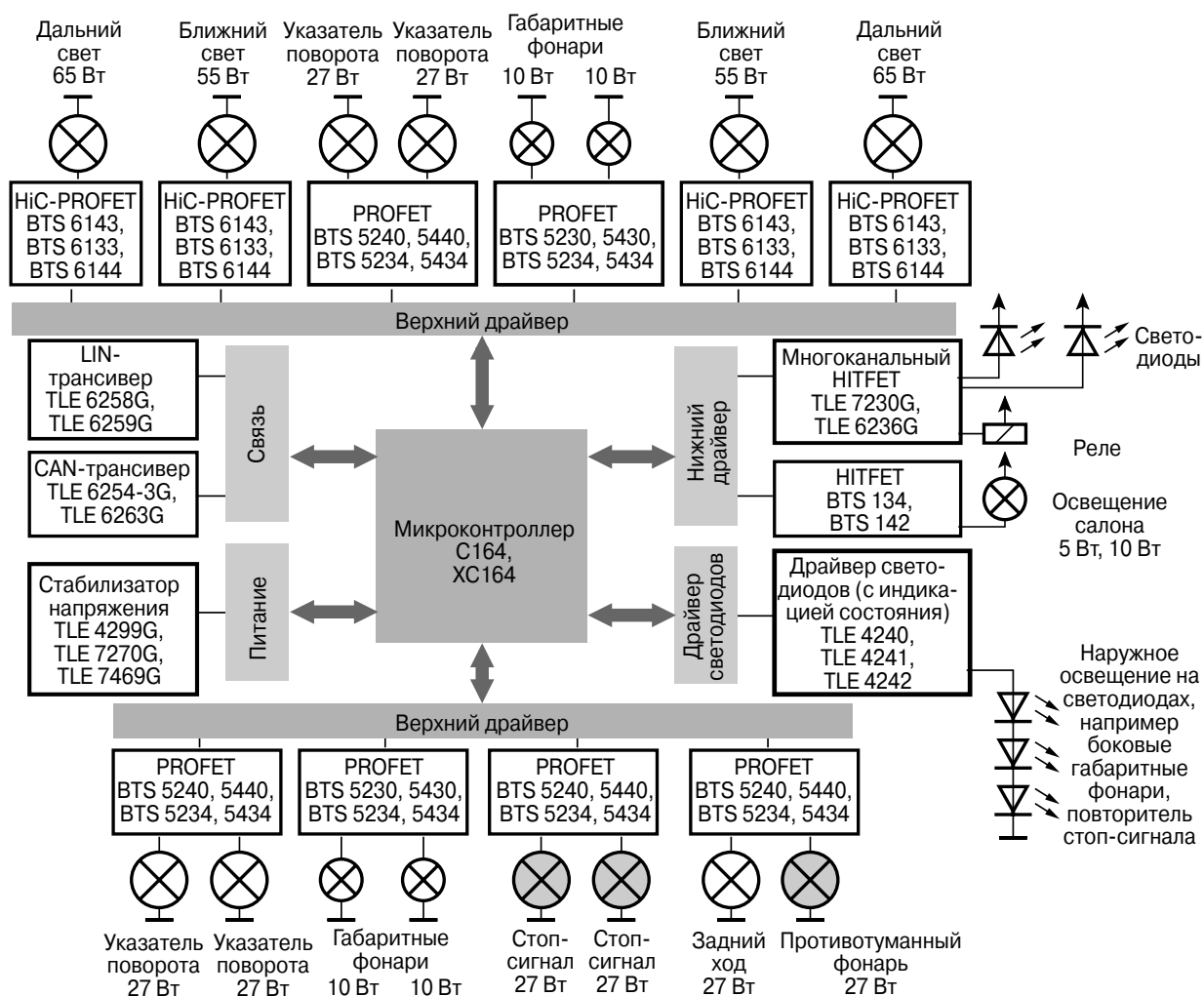


Рис. 9.2. Семейство полупроводниковых приборов компании Infineon для модулей управления осветительными приборами автомобиля.

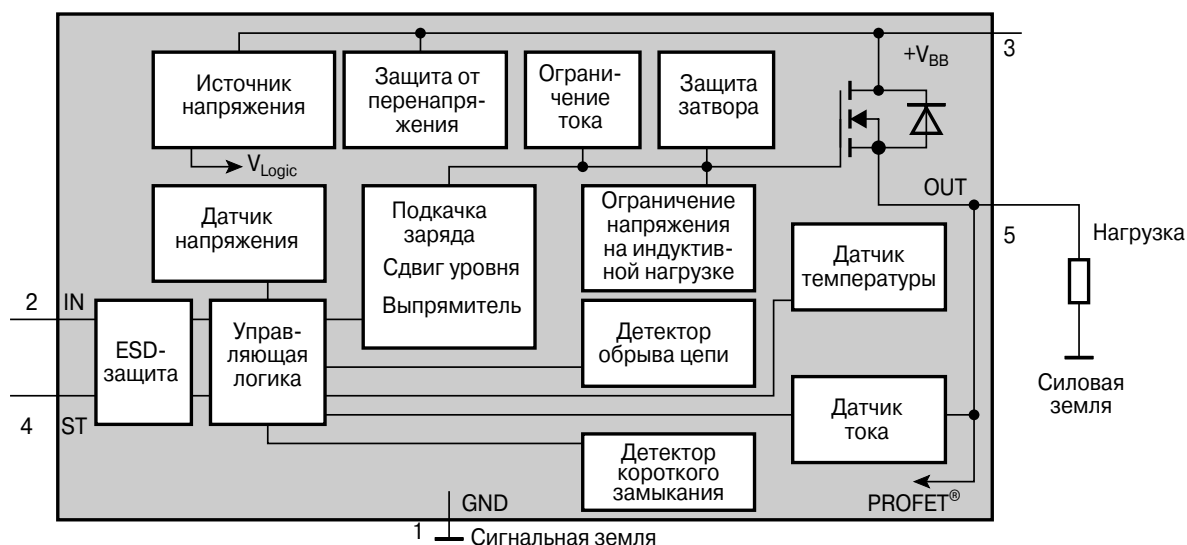


Рис. 9.3. Структурная схема интеллектуального силового ключа семейства PROFET.

тупает на нагрузку через ключ, а второй вывод нагрузки соединён с землей. Если в качестве земли выступает шасси автомобиля, то для питания нагрузки потребуется всего лишь один провод, благодаря чему стоимость системы существенно снижается.

Поскольку в фарах ближнего и дальнего света и противотуманных фонарях применяются мощные (55...65 Вт) лампы накаливания или даже ксеноновые лампы, для их коммутации могут использоваться только верхние ключи (типа HiC PROFET) с очень низким выходным сопротивлением. Таким образом, решение на базе HiC PROFET является наиболее эффективным и позволяет оптимизировать габариты модулей.

Ключи серии PROFET имеют встроенные схемы защиты от перенапряжения и перегрева. Если, например, возникает короткое замыкание в шине питания или в нагрузке, то ключ PROFET безопасно отключается; при этом не требуется применение дополнительного плавкого предохранителя, а максимальный ток короткого замыкания ограничивается. Поэтому можно использовать соединительные провода меньшего сечения, т.е. более лёгкие и дешёвые.

Система диагностики ключей PROFET позволяет не только отслеживать случаи превышения допустимой рабочей температуры или величины питающего напряжения, но и обнаруживать обрывы цепи. Некоторые модели имеют дополнительный выход Intelli-Sence, напряжение сигнала на котором пропорционально току нагрузки. Это позволяет обойтись без токоизмерительного резистора и схемы обработки. К преимуществам можно также отнести то, что входы и выходы состояния являются КМОП/ТТЛ-совместимыми. Таким образом, интеллектуальный ключ PROFET мо-

жет подключаться непосредственно к порту микроконтроллера, в то время как для управления, например, реле потребуется дополнительный драйвер. Кроме того, ключи PROFET позволяют без проблем коммутировать индуктивную нагрузку: встроенные стабилитроны ограничивают выбросы напряжения, обеспечивая эффективную защиту; при использовании же реле потребуется дополнительно подключить (встречно-параллельно) внешний защитный диод.

Упомянутые выше приборы типа HiC PROFET реализованы на основе технологии «кристалл на кристалле» (chip-on-chip), когда на основной кристалл «сажается» дополнительный кристалл, и вместе они помещаются в один корпус. Описанные выше логические и защитные схемы интегрированы в дополнительный кристалл, выполненный по SMART-технологии компании Infineon. Эта технология позволяет получать КМОП- и ДМОП-компоненты на одном кристалле.

В основном кристалле используются МОП-транзисторы. Они имеют не самое низкое сопротивление в открытом состоянии на единицу площади, но, благодаря меньшей сложности, данная технология оказывается рентабельнее, чем технология SMART. Линейка продукции Infineon включает в себя модули, рассчитанные на напряжение 12 В, 24 В и 42 В (см. **Табл. 9.1**).

Для управления другим осветительным оборудованием автомобиля (сюда относятся, например, лампы указателей поворота мощностью 21 Вт, 10- и 5-ваттные лампы для габаритных фонарей, и т.д.) компания Infineon предлагает исключительно широкий и полнофункциональный ассортимент продукции на базе семейства PROFET (см. **Табл. 9.2**).

Таблица 9.1. Основные параметры некоторых приборов семейства HiC PROFET

Тип	$V_{DS(AZ)}$ [В]	R_{ON} (max) [мОм]	I_{L-SC} (typ) [А]	Корпус
BTS 443 P	42	16.0	50	DPAK5
BTS 6143D	42	10.0	50	DPAK5
BTS 6144P	42	8.0	65	TO220/7
BTS 650 P	42	6.0	130	TO220/7
BTS 6510	42	6.0	130	TO220/7
BTS 550 P	42	3.6	180	TO218/5
BTS 555	42	2.5	300	TO218/5
BTS 6163D	60	21.0	45	DPAK5
BTS 660 P	60	9.0	145	TO220/7

Таблица 9.2. Основные параметры некоторых приборов семейства PROFET

Тип	R_{ON} [мОм]	I_{NOM} [А]	Автодиагностика	Корпус
BTS 5240L	2 × 25	5.7	Intelli Sense	Power SO-12
BTS 5240G	2 × 25	5.7	Intelli Sense	P-DSO-20
BTS 5440G	4 × 25	5.7	Intelli Sense	P-DSO-28
BTS 5234L	2 × 60	2.8	Intelli Sense	Power SO-12
BTS 5234G	2 × 60	2.8	Intelli Sense	P-DSO-20
BTS 5434G	4 × 60	2.8	Intelli Sense	P-DSO-28

В будущем можно ожидать более широкого применения светодиодов в автомобильном осветительном оборудовании. Уже в настоящее время светодиоды, несмотря на их относительно высокую по сравнению с обычными лампами стоимость, используются в повторителях стоп-сигнала. Преимущество светодиодных фонарей состоит в меньшем времени включения. Когда речь идёт о тормозных фонарях, выигрыш в десятые доли секунды может оказаться чрезвычайно важным. Кроме того, применение светодиодов предоставляет дизайнерам большую свободу творчества (поскольку такие фонари могут иметь различную форму и малую толщину). Наконец, надёжность светодиодных фонарей значительно выше, чем надёжность галогенных ламп. Для оптимального управления светодиодами следует использовать специализированную микросхему-драйвер, например TLE 4240G.

Эта ИС работает как источник стабильного тока до 60 мА и, таким образом, защищает светодиоды от перенапряжения. Кроме того, TLE 4240G имеет встроенную защиту от перегрузки по току, короткого замыкания выхода на землю или шины питания, обратной полярности и перегрева, а также диагностику отключения нагрузки, которая сообщает о неисправности светодиода или обрыве проводки.

Микросхема TLE 4241 является дальнейшей модификацией TLE 4240. Она обеспечивает регулировку выходного тока в диапазоне 8...75 мА. Кроме того, можно устанавливать два заранее заданных значения выходного тока. Благодаря этому можно использовать одну и ту же цепочку светодиодов и в качестве заднего габаритного огня (при меньшем токе), и в качестве сигнала экстренного торможения (при большем токе, следовательно, и яркость свечения светодиодов во втором случае будет гораздо

выше). Такое решение позволяет снизить стоимость осветительных приборов и их габариты.

9.2.2. Дверные модули

В современных автомобилях, буквально «напичканных» электроникой, двери не являются исключением. Достаточно упомянуть центральный замок, управляемый дистанционно посредством радиосвязи; в настоящее время подобными устройствами оснащены практически все автомобили, также как и электрическими стеклоподъёмниками, электроприводами зеркал и системами их обогрева.

Нетрудно себе представить, какова была бы толщина жгута соединительных проводов, если бы все эти устройства подключались непосредственно к центральному контроллеру системы питания автомобиля. Именно по этой причине тенденция, направленная на повышение комфортабельности и всё большую электрификацию автомобиля, привела к размещению электронных узлов в дверях автомобиля. Расположенные здесь интеллектуальные субмодули называются контроллерами дверей. Их связь с другими контроллерами автомобиля осуществляется посредством обмена данными по шине. Как правило, для этого используется протокол CAN (см. Рис. 9.4).

Функции, выполняемые контроллером двери, могут варьироваться в зависимости от сложности оборудования, установленного в автомобиле (см. Рис. 9.5). Интеллектуальные силовые полупроводниковые компоненты обеспечивают управление оборудованием (к которому относятся электроприводы дверных замков, электрорегуляторы положения боковых зеркал и системы их обогрева, лампы подсветки и электрические стеклоподъёмники), осуществляют его защиту и диагностику.

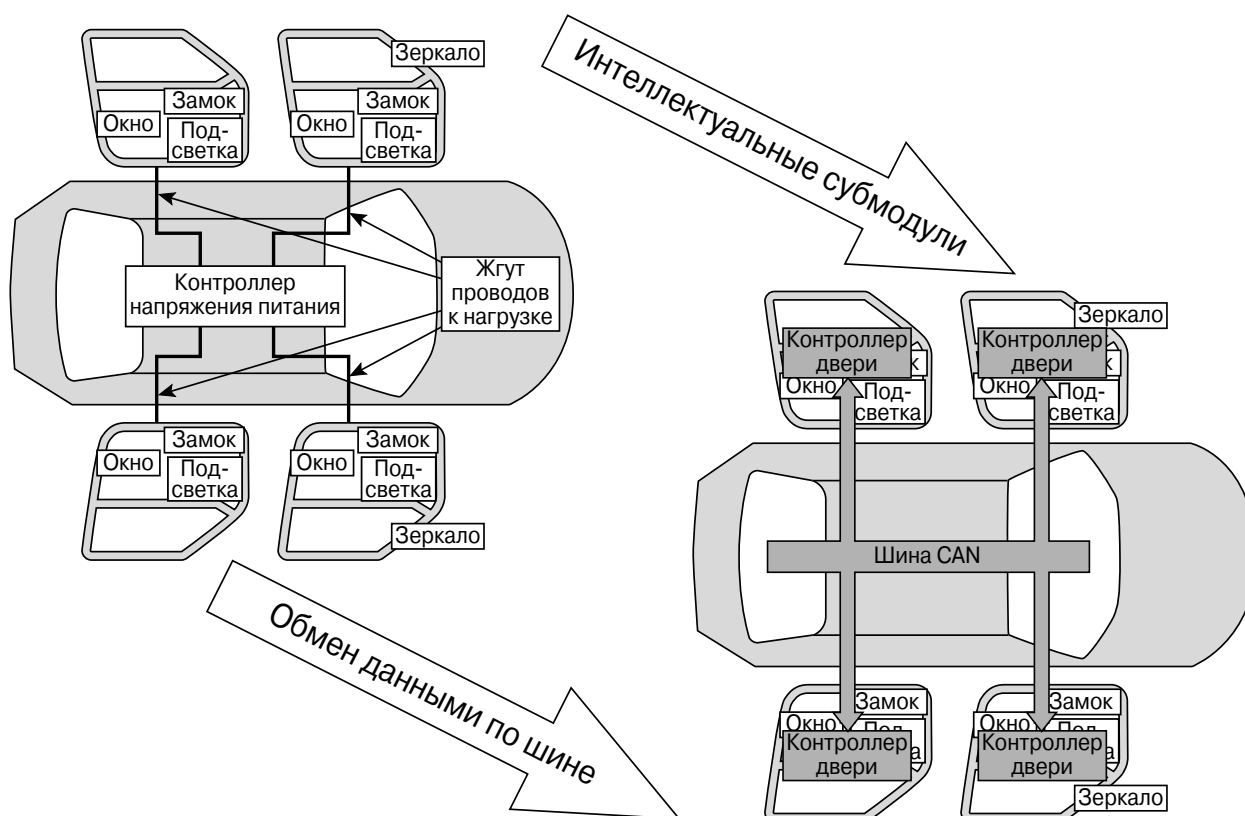


Рис. 9.4. Современные тенденции в автомобильной кузовной электронике направлены на разработку контроллеров дверей и осуществление связи между контроллерами по шине.



Рис. 9.5. Блок-схема контроллера двери.

Как правило, многие системные периферийные функции рациональнее реализовывать не в микроконтроллере, а путём их интеграции в микросхемы систем питания. К числу таких функций относятся: формирование напряжения питания для самого микроконтроллера и всевозможных датчи-

ков, построение драйверов для управления шинным интерфейсом на физическом уровне; опрос панели управления и контроль работы микроконтроллера посредством сторожевых таймеров и сброса.

Для реализации каждой из указанных функций компания Infineon Technologies

Таблица 9.3. Набор микросхем Infineon для построения дверных модулей

Функция	Микросхемы	
Дверной замок	BTS 7740G, BTS 7741G, BTS 7750G, BTS 7751G	или TLE 7201R
Регулировка положения зеркала	TLE 6208-3G	или TLE 7201R
Обогрев зеркала	BSP 772	или TLE 7201R
Складывание зеркала	BTS 7740G, BTS 7741G, TLE 6208-3G	или TLE 7201R
Драйвер подсветки	BTS 5210G, BTS 5215L	или TLE 7201R
Стеклоподъёмник	BTS 781GP	
Управление светодиодами	TLE 4240G, TLE 4241G	
LIN-трансивер	TLE 6258G, TLE 6259G	
CAN-трансивер	TLE 6254G	или SBC: TLE 6263G, TLE 6266G
Стабилизатор напряжения	TLE 4299G, TLE 4278G	или SBC: TLE 6263G, TLE 6266G
Опрос панели управления	TLE 6263G, TLE 6266G с микроконтроллером	
Микроконтроллер	XC 164	
Датчик Холла	TLE 49x5, TLE 49x6, TLE 4966	

предлагает оптимизированные наборы микросхем.

ИС TLE 6263 и TLE 6266 являются наиболее популярными представителями семейства так называемых базовых чипов (System Base Chip — SBC). Эти микросхемы, работающие под управлением интерфейса SPI, обеспечивают полномасштабную диагностику, в том числе всех видов ошибок шины. Предусмотрены различные режимы работы: нормальный, пониженного энергопотребления, спящий и ждущий. Таким образом, достигается соответствие самым жёстким требованиям, когда собственный ток потребления каждого из контроллеров не должен превышать 100 мкА. Использование этих микросхем (см. Табл. 9.3) позволяет значительно уменьшить количество компонентов по сравнению с реализацией тех же функций на дискретных компонентах.

Для построения мощных выходных драйверов компания Infineon выпускает широкий спектр приборов — от специализированных микросхем драйверов для решения конкретных задач до multifunctional устройств высокой степени интеграции. Например, в TLE 7201R, струк-

турная схема которой изображена на Рис. 9.6, собраны драйверы привода дверного замка, регулятора положения бокового зеркала, привода его складывания, обогрева зеркала, а также формирователи выходного напряжения для четырёх ламп мощностью 5 Вт каждая. Все ключи имеют встроенную защиту от перегрева, перенапряжения и короткого замыкания по выходу. Кроме того, ИС позволяет диагностировать короткое замыкание в цепи нагрузки или на землю, а также обрыв проводки. В TLE 7201R встроен также аналоговый датчик тока, который может быть использован, например, при определении конечного положения при складывании зеркала или при закрывании дверного замка.

Необходимо подчеркнуть, что в ходе совершенствования ИС контроллеров особое внимание уделялось снижению их тока потребления. Здесь TLE 7201R со средним током потребления всего лишь 6 мкА значительно выделяется на фоне конкурирующих приборов. И, наконец, если напряжение питания подключено к ИС не в той полярности, то схема защиты выключает MOSFET, через который питающее напряжение подаётся на микросхему.

9.2.3. Системы кондиционирования воздуха

Системы кондиционирования воздуха проделали большой путь от чисто механических кондиционеров к полу- или полностью автоматизированным системам (см. **Рис. 9.7**), при этом всегда была актуальна задача снижения веса и габаритов.

В механических кондиционерах в качестве привода клапанов использовались рычаги или трос Боудена¹⁾. Сегодня эту функцию выполняют небольшие электромоторы — шаговые двигатели с биполярным и униполярным питанием или двигатели постоянного тока. Компания Infineon Automotive Power (подразделение компании Infineon) разработала и предлагает потребителям две микросхемы, предназначенные для управления электродвигателями постоянного тока — TLE 6208-6 и TLE 6208-3.

Эти ИС выполнены по технологии SPT, позволяющей совместить на одном кристалле биполярные транзисторы аналоговых схем, логические КМОП-схемы и выходные каскады на ДМОП-транзисторах. Так, ИС TLE 6208-6 содержит шесть нижних и шесть верхних ключей, которые, при полумостовом включении могут управлять цепочкой из пяти электромоторов. Выходные каскады характеризуются сопротивлением в открытом состоянии $R_{DS(on)}$ не более 800 мОм, а их максимальный рабочий ток составляет 1.2 А. Если необходимо получить большую мощность, можно без каких-либо проблем включать выходные каскады параллельно. Кроме того, микросхема уже содержит встроенные обратные (freewheeling) диоды, поэтому нет необходимости в использовании дополнительных внешних компонентов. Выходные ДМОП-каскады имеют встроенную защиту от перегрузки и короткого замыкания, а также термодатчики, что в совокупности позволяет предотвратить повреждения не только модуля управления, но и исполнительного устройства. Таким образом, электродвигатель уже оказывается защищён от перегрузки и можно обойтись без обычно используемых в этих целях позистора или биметаллического размыкателя.

Управление нижними и верхними ключами ИС осуществляется через современ-

ный интерфейс SPI (прямое управление ключами требует слишком много портов ввода/вывода микроконтроллера). Использование SPI-интерфейса предпочтительнее и с точки зрения диагностики системы. Передаваемое в микроконтроллер проверочное слово длиной 16 бит содержит информацию о состоянии каждого из ключей, что позволяет отслеживать все случаи их перегрузки или перегрева и вовремя предпринимать соответствующие меры. Это существенно упрощает проведение диагностики оборудования в сервисных центрах.

ИС TLE 6208-6 может работать в широком диапазоне напряжений питания (7...40 В), характеризуется исключительно малым, не превышающим 10 мкА, током потребления и выпускается в компактном корпусе P-DSO-28. Таким образом, данная силовая микросхема очень хорошо подходит для использования не только в автомобильной, но и в промышленной электронике. Её облегчённая модификация, ИС TLE 6208-3, содержит три полумоста, выпускается в малогабаритном корпусе P-DSO-14 и функционально полностью совместима с TLE 6208-6.

Для управления шаговым двигателем с униполярным питанием компания Infineon Technologies предлагает новый интегральный контроллер BTS 3408G — двухканальный нижний ключ серии HITFET. Помимо стандартной защиты от перегрузки, перегрева, а также ограничения максимального тока, данный контроллер осуществляет диагностику коротких замыканий и обрывов в цепи нагрузки. BTS 3408G (функциональная схема приведена на **Рис. 9.8**) предназначен для управления шаговыми двигателями. В системах с двухзонным кондиционированием обычно используются 5 шаговых электродвигателей. Для управления каждым из них требуется 4 нижних ключа, т.е. 2 микросхемы BTS 3408G.

Дополнительная задача современных автомобильных систем кондиционирования воздуха — обеспечить необходимую температуру салона автомобиля за как можно более короткое время. Эффективность современных двигателей внутреннего сгорания возросла настолько, что выделяемого ими тепла уже не хватает для эффективного обогрева салона, особенно зимой. Быстро,

¹⁾ Трос Боудена — стальной гибкий трос внутри витой, обычно пластиковой, оболочки. — *Примеч. пер.*

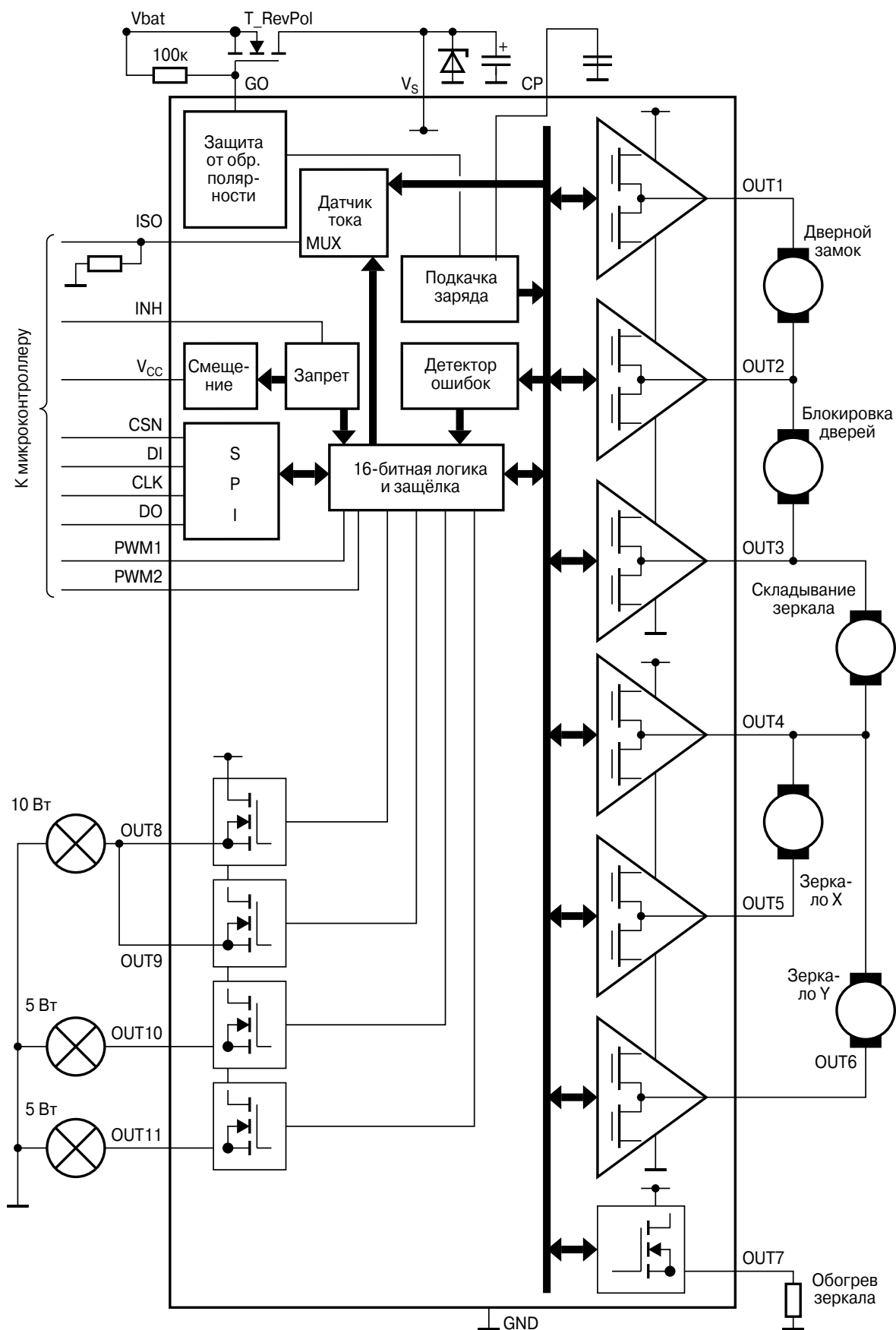


Рис. 9.6. Структурная схема и типичная схема включения TLE 7201R.

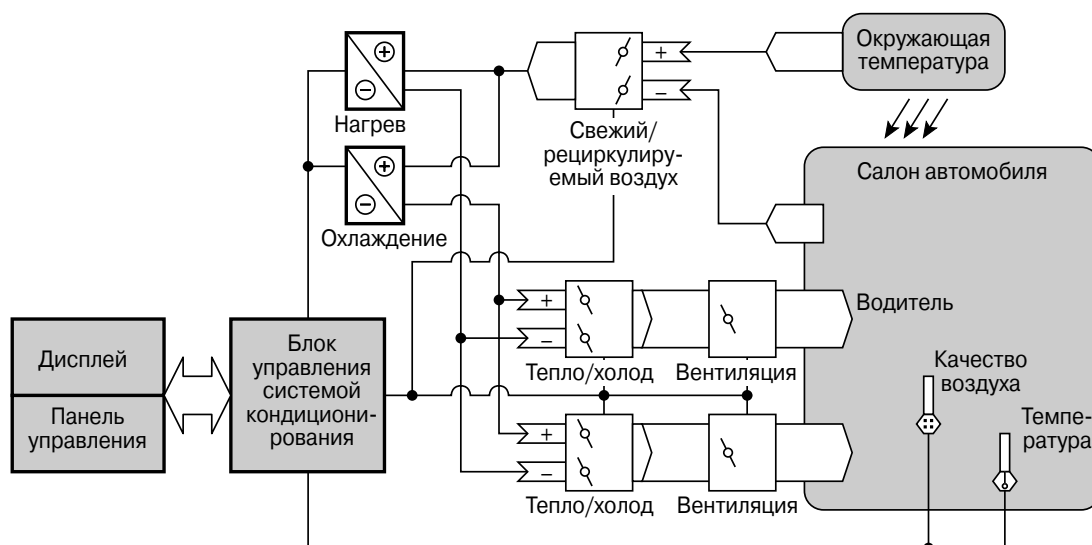


Рис. 9.7. Блок-схема автомобильной системы кондиционирования воздуха.

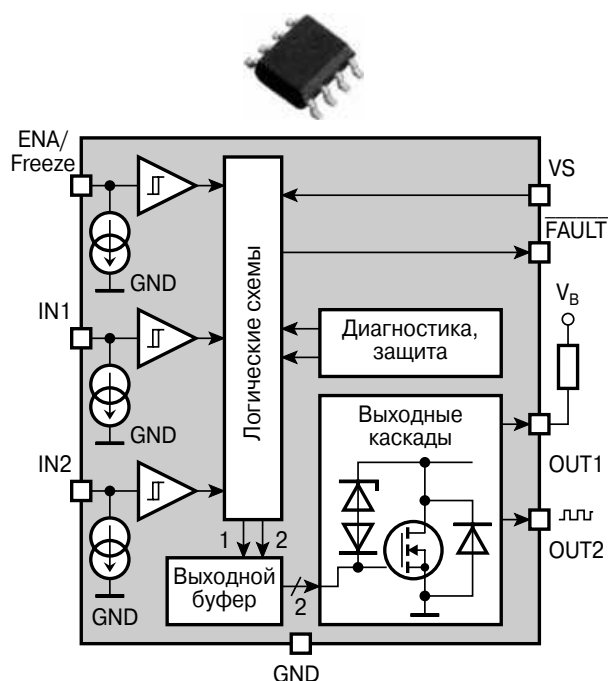


Рис. 9.8. Блок-схема контроллера BTS 3408G в корпусе P-DSO-8.

буквально за несколько секунд, поднять температуру в салоне можно при помощи дополнительных электрических нагревателей и систем обогрева сидений. Подобные нагреватели потребляют мощность в сотни ватт, что, с учётом напряжения бортовой сети 12 В, даёт довольно большой ток.

Следует различать два основных типа вспомогательных обогревателей — водяные и воздушные. Достоинство систем, в которых используется жидкий теплоноситель

(вода), состоит в том, что двигатель прогревается быстрее. Однако при этом пассажирам приходится дольше мёрзнуть внутри салона, ожидая, пока жидкость, проходя через теплообменник, в достаточной степени нагреет воздух. Поэтому всё большее распространение приобретают дополнительные электрические обогреватели (калориферы). Преимущество таких устройств ещё и в том, что они легче, дешевле и надёжнее в работе, чем системы, использующие двигатель автомобиля. На Рис. 9.9 проиллюстрировано, как вспомогательный электрический обогреватель подключается к автомобильной системе кондиционирования воздуха.

В качестве вспомогательного обогревателя может применяться позистор, управляемый с помощью сильноточного ключа. Эффективная регулировка температуры достигается за счёт использования широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Из-за больших токов частота ШИМ выбирается не ниже 100 Гц, в этом случае обогреватель представляет собой квазистатическую нагрузку для бортовой электрической сети и электрогенератора. Компания Infineon Technologies разработала линейку модулей серии HiC PROFET (см. также Табл. 9.1), которые хорошо подходят для построения таких схем, имея выходное сопротивление от 16 до 2.5 мОм.

Вспомогательный обогреватель воздуха может быть реализован и на полупроводниковом транзисторе, работающем в линейном режиме. Чем сильнее разогревается полупроводниковый кристалл, тем больше тепла

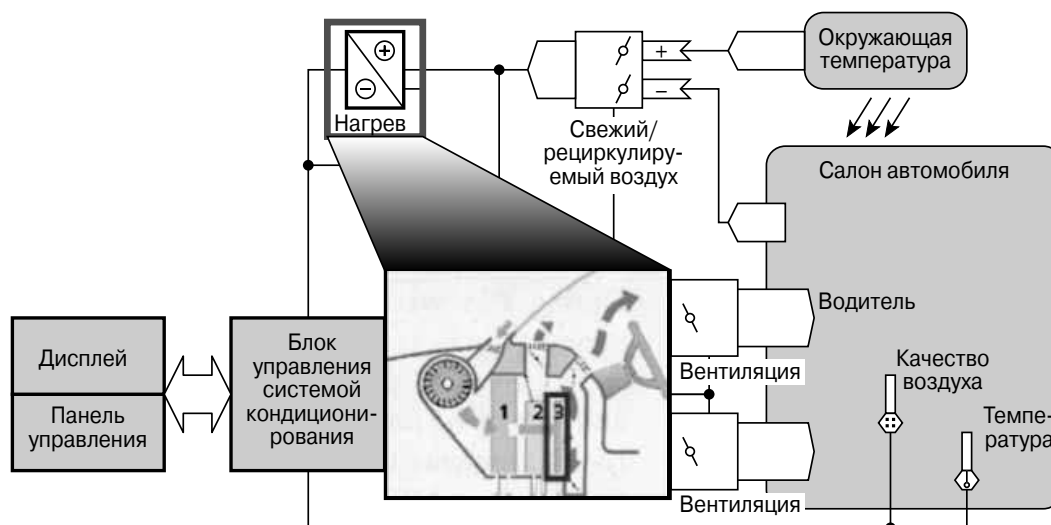


Рис. 9.9. Место установки вспомогательного электрического обогревателя.

он отдаёт в окружающую среду. Однако в данном режиме существует опасность выхода полупроводникового компонента из строя вследствие перегрева. Для того чтобы гарантированно обеспечить работу при температуре кристалла ниже критической, необходимо использовать датчик температуры. Это реализовано в приборах серии Speed-TempFET, каждый из которых представляет собой сборку МОП-транзисторов с размещённым непосредственно на кристалле датчиком температуры. Приборы Speed-TempFET, как и HiC PROFET, построены на базе нового поколения МОП-транзисторов, известного под торговой маркой OptiMOS™ (см. Рис. 9.10). При разработке указанных транзисторов основные усилия были сконцентрированы на решении двух задач. Во-первых, это получение как можно меньших значений сопротивления транзистора в открытом состоянии ($R_{DS(on)}$) для рабочих напряжений 30, 40, 55 и 75 В, что достигается за счёт использования новой технологии — ДМОП-транзисторов с ячеистой структурой. Так, при напряжении 55 В у транзистора в корпусе D²PAK (TO220) величина $R_{DS(on)}$ не превышает 4.2 мОм.

Во-вторых, требовалось обеспечить максимальный уровень надёжности интегральных управляющих модулей, чтобы они могли без проблем выдерживать жёсткие условия работы в автомобиле. Так, энергетический порог лавинного пробоя в полупроводнике (E_{AS}) составляет 810 мДж. Задача состояла в таком улучшении характеристик новых приборов, чтобы они могли в течение

	SOT23	SOT223	SO8	DPAK	TO220/263
30 В			7.8	7.1...10	2.5...12.4
40 В					2.8...4.0
55 В	650	30...90	2x35	12.6...80	4.2...12
75 В				20.5...21.5	6.5...7.4

Рис. 9.10. Максимальные значения $R_{DS(on)}$ (мОм) приборов семейства OptiMOS™ при $V_{GS} = 10$ В.

длительного времени работать при высоких температурах. В результате, технология OptiMOS™ гарантирует работоспособность транзистора при температуре кристалла +175°C в течение всего срока службы. С целью обеспечения лучшего рассеивания тепла, толщина кристалла уменьшена до 175 мкм, благодаря чему тепловое сопротивление между кристаллом и корпусом прибора ($R_{thJC(max)}$) также существенно снизилось — до 0.5 К/Вт для корпуса D²PAK.

Системы кондиционирования воздуха, контроллеры дверей и осветительное оборудование — вот всего лишь три примера использования электроники в автомобилях. В свою очередь, компания Infineon для этих приложений предлагает широкий ассортимент продукции, разработанной специально под конкретные требования заказчика.

9.3. Системы безопасности автомобиля

С течением времени задачи, на решении которых было акцентировано внимание разработчиков устройств автомобильной электроники, существенно изменялись. В результате можно выделить пять основных этапов развития этих устройств.

Первоначально, сложные электронные системы управления предназначались, главным образом, для управления работой двигателя, и разработка и совершенствование соответствующих технологий производились в рамках решения именно указанной основной задачи. На этом этапе широкое распространение приобрели шины обмена данными (CAN и ей подобные). Затем, по мере того, как количество автомобилей на дорогах увеличивалось, а мощность их двигателей неуклонно возрастала, всё большее внимание стало уделяться требованиям безопасности; в результате были разработаны такие устройства, как антиблокировочная система тормозов (ABS) и подушки безопасности.

Стремление повысить комфортабельность автомобилей привело к росту популярности электроприводов, предназначенных для открывания дверей, управления боковыми зеркалами и регулировки положения водительского сидения, что послужило причиной объединения электронных узлов в единую сеть.

На следующем этапе развития основное внимание было уделено телекоммуникационной и информационной электронике, телематике¹⁾ (ITS), а также всевозможным мультимедийным устройствам.

Наконец, последний, пятый этап технологических новинок ориентирован на поиск комплексных решений по улучшению динамики автомобиля в целом. Такие решения подразумевают наличие быстродействующей и полнофункциональной сети, объединяющей все системы управления движением автомобиля, разработку и совершенствование новых защищённых информационных шин с повышенной пропускной способностью, размещение всех органов управления в едином блоке и, в дальнейшем, переход от локального к гло-

бальному управлению, при этом всё в большей степени будут использоваться современные технологии x-by-wire. Диаграмма, приведённая на **Рис. 9.11**, даёт некоторое представление о хронологических рамках каждого из вышеупомянутых пяти этапов развития автомобильной электроники.

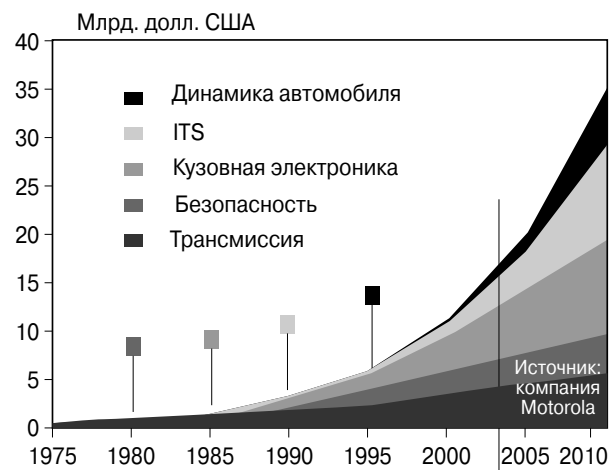


Рис. 9.11. Пять основных этапов развития автомобильной электроники.

Структура рынка электронных систем безопасности автомобилей в период с 1999 по 2008 годы представлена на **Рис. 9.12**. Как видно, в настоящее время на этом рынке доминируют подушки безопасности и тормозные системы (суммарно более 75% рынка), следом идут системы рулевого управления, которые демонстрируют быстрый рост. Активно развиваются и новые устройства, например система контроля давления в шинах.

Автомобильные электронные системы безопасности делятся на две группы: системы активной безопасности (динамика автомобиля) и системы пассивной безопасности (помощь водителю). На **Рис. 9.13** представлена диаграмма, отражающая развитие и взаимодействие различных аспектов систем безопасности с течением времени.

В то время как активные системы безопасности призваны предотвратить ДТП, пассивные системы предназначены для того, чтобы свести последствия ДТП к минимуму. Следовательно, первые имеют дело с тормозной системой, рулевым управлением, подвеской и амортизаторами и т.п. Ко вторым относятся подушки и ремни безо-

¹⁾ Телематика — область техники, объединяющая средства телекоммуникации и автоматизированной обработки данных. — *Примеч. ред.*

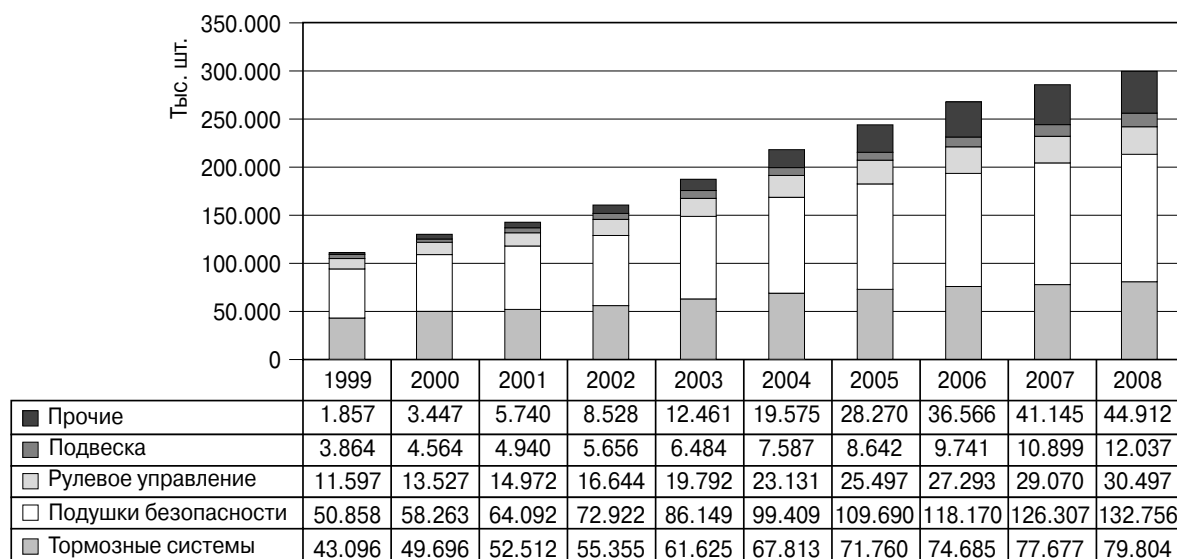


Рис. 9.12. Структура рынка электронных систем безопасности автомобилей (в тыс. шт.).

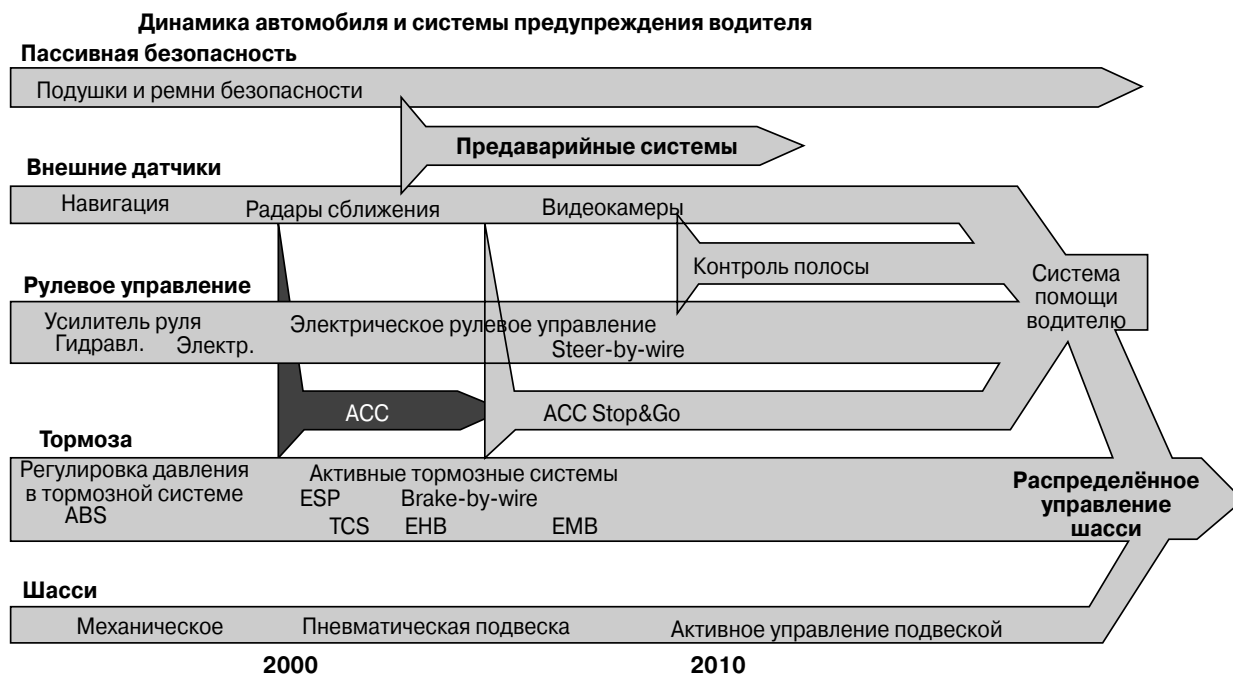


Рис. 9.13. Структура и тенденции развития систем управления динамикой автомобиля и систем помощи водителю.

пасности. Помимо перечисленных систем, можно выделить систему помощи водителю (DAS — Driver Assistance System), которая включает в себя как пассивные элементы (например, парковочные датчики или датчики обнаружения присутствия пешехода), так и активные элементы (такие как системы экстренного торможения или автоматического предотвращения столкновений).

Границы между этими системами весьма зыбки и меняются с течением времени. Например, сегодня парковочные системы, в

сущности, представляют собой датчики, определяющие расстояние до препятствия в непосредственной близости от автомобиля плюс устройство звукового или визуального оповещения водителя. Более современные разработки позволяют, например, определять габариты парковочного места и даже давать указания водителю, как лучше рулить, чтобы «вписаться» в эти габариты. В будущем же активное использование электроники вполне возможно приведёт к тому, что при опасности столкновения тор-

мозная система автомобиля будет включаться автоматически, а выкруливание на парковке будет осуществлять автопилот. В настоящее время, однако, использование подобных систем сильно ограничено из-за правовых ограничений, высокой цены и нерешённых вопросов гражданской ответственности.

Оставив попытки разграничить области применения систем активной и пассивной безопасности, не лишним будет оценить, как соотносятся понятия безопасности и комфорта и насколько они взаимосвязаны. Например, системы адаптивного управления скоростью в зависимости от дорожной обстановки (так называемый круиз-контроль с функцией «stop-and-go») ныне позиционируются как повышающие уровень комфорта автомобиля, а системы предупреждения столкновений (автоматического экстренного торможения), напротив, оказались отнесены к опциям безопасности. Для обеспечения безопасности пешеходов должны использоваться как активные, так и пассивные системы. С помощью первых можно, например, реализовать автоматический сброс скорости автомобиля в случае обнаружения пешехода на проезжей части; ко вторым можно отнести подушку безопасности для пешехода или автоматическое открывание капота в момент столкновения, чтобы погасить энергию соударения.

Следует отметить, что термин «безопасность» имеет, как минимум, два значения: с одной стороны, это безопасность движения, которую характеризует риск получения тех или иных повреждений в результате ДТП и степень тяжести этих возможных повреждений; с другой стороны, это безопасность с точки зрения функционирования автомобиля, устранения неисправностей, надёжности работы его систем и узлов. Существует ещё один аспект этого понятия — защита от угона, но в определённой степени он относится к функциям кузовной электроники, и в данном разделе такие системы не рассматриваются.

В следующем подразделе на примере тормозных устройств рассматриваются типичные тенденции развития систем активной безопасности автомобиля и приводятся общие соображения, лежащие в основе их эволюции. Вслед за этим мы поговорим о пассивных системах, таких как подушки безопасности и системы контроля давления в шинах.

9.3.1. Системы активной безопасности автомобиля

Устройства, относящиеся к сфере активной безопасности, играют ключевую роль в управлении динамикой автомобиля. Практически все функции и системы, которые напрямую влияют на динамику автомобиля (исключение здесь составляет разве что управление работой двигателя) являются критическими с точки зрения обеспечения безопасности движения, т.е. неисправность любой из этих систем может привести к чрезвычайно серьёзным последствиям. Именно из-за наличия такой тесной связи, понятие «системы безопасности» часто трактуют как «динамика автомобиля и системы безопасности».

На **Рис. 9.14** приведена диаграмма развития тормозных устройств, от простых гидравлических тормозов к электронным системам, таким как антиблокировочная система тормозов (ABS), дифференциал ограниченного проскальзывания (LSD) или система курсовой устойчивости (ESP/VSC), и вплоть до новейших систем распределения тормозных усилий и экстренного автоматического торможения. Вслед за появлением гидравлических тормозов были разработаны первые вспомогательные электронные устройства, определяющие силу торможения в экстренных ситуациях независимо от желания водителя.

Следующее поколение тормозных систем создавалось с использованием ряда новых оригинальных разработок в области электронного управления (так называемая концепция управления x-by-wire).

Антиблокировочная система тормозов (ABS) предназначена для того, чтобы быстро снимать тормозное усилие с колеса, которое оказалось заблокировано. Поэтому машина сохраняет управляемость даже при недостаточном сцеплении с дорогой, поскольку колесо продолжает вращаться, а не проскальзывает, как это было бы в случае его блокировки вследствие чрезмерного тормозного усилия. Устройство гидравлического тормоза с системой ABS изображено на **Рис. 9.15**.

На **Рис. 9.16** иллюстрируется принцип работы системы ABS. При нажатии на педаль тормоза в гидравлической системе генерируется тормозное усилие, которое через открытый (в первый момент времени)

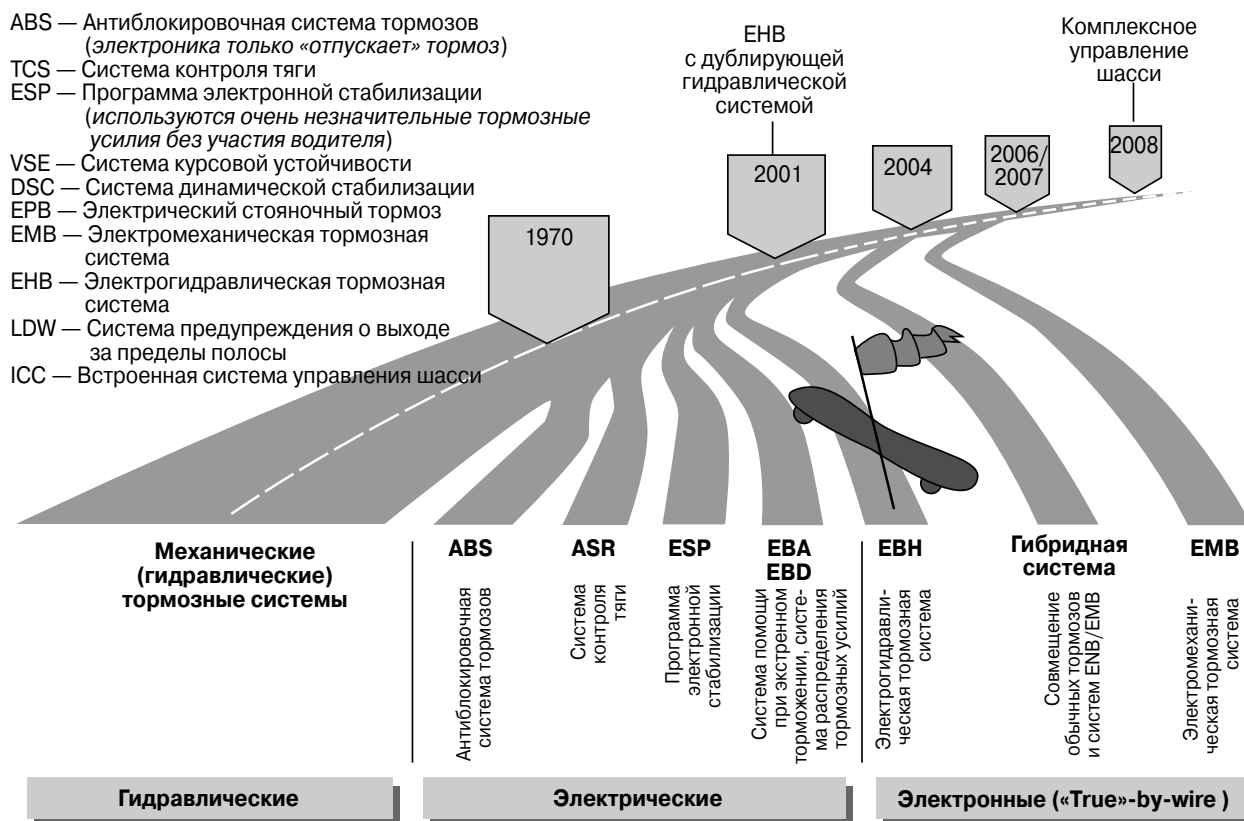
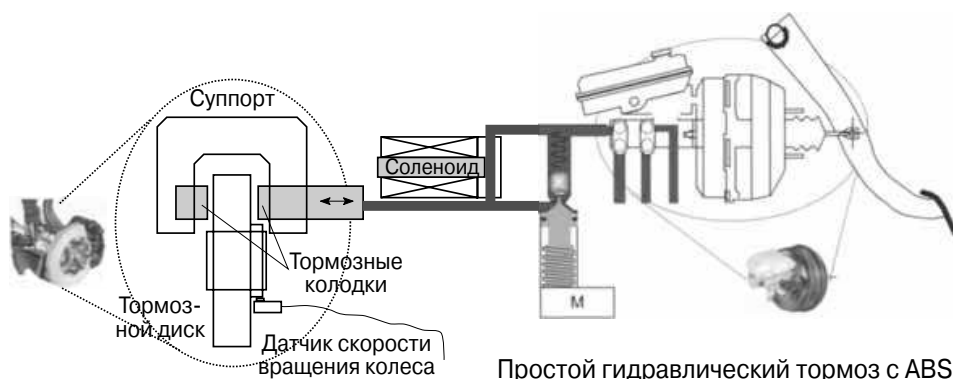


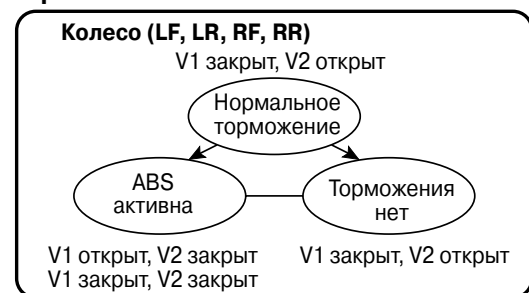
Рис. 9.14. Этапы развития тормозных систем автомобилей.



Простой гидравлический тормоз с ABS

Рис. 9.15. Автомобильный гидравлический тормоз с функцией ABS.

Управление



Система ABS

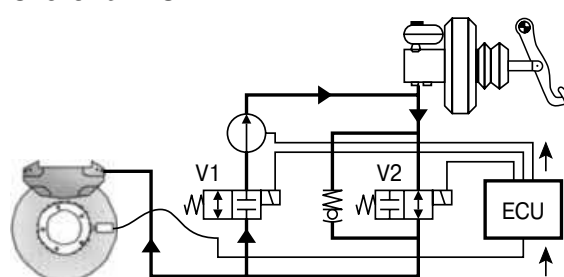


Рис. 9.16. Функциональная схема системы ABS (показано одно колесо).

магнитный клапан V2 прикладывается к тормозным колодкам, прижимая их к тормозному диску. Угловая скорость вращения колеса, измеряемая специальным датчиком, вычисляется электронным блоком управления (ECU). Если система обнаруживает, что колесо заблокировано (т.е. перестаёт вращаться), то давление в тормозном цилиндре понижается за счёт открывания «возвратного» клапана V1 и закрывания клапана V2. Таким образом, электроника способна скорректировать команду водителя на торможение и быстро уменьшить тормозное усилие, однако не может создать или увеличить такое усилие.

Обратную функцию выполняет антипробуксовочная система (Anti-Slip Regulation — ASR), или система регулирования тяги (Traction Control System — TCS). Она снижает момент вращения колеса в случае, когда плохое сцепление с дорогой не позволяет эффективно использовать всю мощность двигателя автомобиля, и колесо начинает пробуксовывать. Для противодействия этому система ASR/TCS вырабатывает сигнал обратной связи, поступающий в блок управления двигателем либо блок электронного управления тормозами, и инициирует тормозное усилие заданной величины.

Функционально схема ASR похожа на схему ABS, отличаясь от неё лишь наличием дополнительного клапана, через который тормозное усилие, инициированное системой ASR, поступает на тормозные колодки (эта система включена параллельно основной гидравлической системе тормозов). Кроме того, необходим канал связи системы ASR с электронным блоком управления двигателем — обычно для этого используется шина CAN. Для работы же системы ABS требуются лишь датчики вращения колёс.

После того, как наличие ABS практически стало стандартной опцией для большинства европейских автомобилей, была разработана система курсовой устойчивости (ESP), которая имеет хорошие перспективы к завоеванию рынка уже в ближайшие несколько лет. Эта весьма сложная и дорогая новинка (иногда её называют электронной системой стабилизации) объединяет в себе функции ABS и ASR. Функциональная схема ESP приведена на **Рис. 9.17**. В ней используется ряд дополнительных датчиков, в первую очередь контролирующих динамику автомобиля, а именно — датчики продоль-

ного (осевого) ускорения и скорости поворота вокруг вертикальной оси (рыскания). В некоторых системах ESR имеется также встроенный датчик угла поворота передних колёс. На основании данных, полученных от датчиков, электронный блок управления ESP рассчитывает, соответствует ли траектория движения автомобиля положению колёс и, при необходимости, пытается исправить ситуацию путём автоматического подруливания в ту или иную сторону и селективного подтормаживания.

На **Рис. 9.18** приведена типичная блок-схема контроллера для систем ABS/ESP. Как видно, практически все основные функции ESP могут быть реализованы с помощью полупроводниковых компонентов, производимых компанией Infineon Technologies.

Дальнейшее совершенствование тормозных устройств обусловлено требованиями улучшения устойчивости автомобиля, увеличения эффективности торможения (уменьшению длины тормозного пути), минимизации использования высокотоксичной тормозной жидкости в гидравлических системах и снижению издержек при эксплуатации автомобиля. Статистика ДТП, со своей стороны, подтверждает, что каждый выигранный метр тормозного пути, каждая выигранная миллисекунда при срабатывании тормозной системы (особенно в сочетании со средствами предупреждения об опасном сближении) резко увеличивают безопасность движения на дорогах.

В соответствии с современными стандартами, само по себе большое тормозное усилие уже недостаточно для достижения минимального времени торможения. Тормозное усилие должно меняться в зависимости от качества дорожного покрытия, особенно на плохих дорогах. Наилучших результатов можно добиться, учитывая в комплексе возможности тормозов, амортизаторов, рулевого управления и трансмиссии, что требует дальнейшего совершенствования взаимосвязи всех этих компонентов. Гармонично оптимизированная стратегия управления предполагает управление динамикой автомобиля на уровне шасси, при этом алгоритмы локального контроля отдельных устройств и узлов заменяются общим анализом состояния автомобиля в целом. Требования, вытекающие из концепции оптимального управления, адаптируются затем для управления локальными устройствами и система-

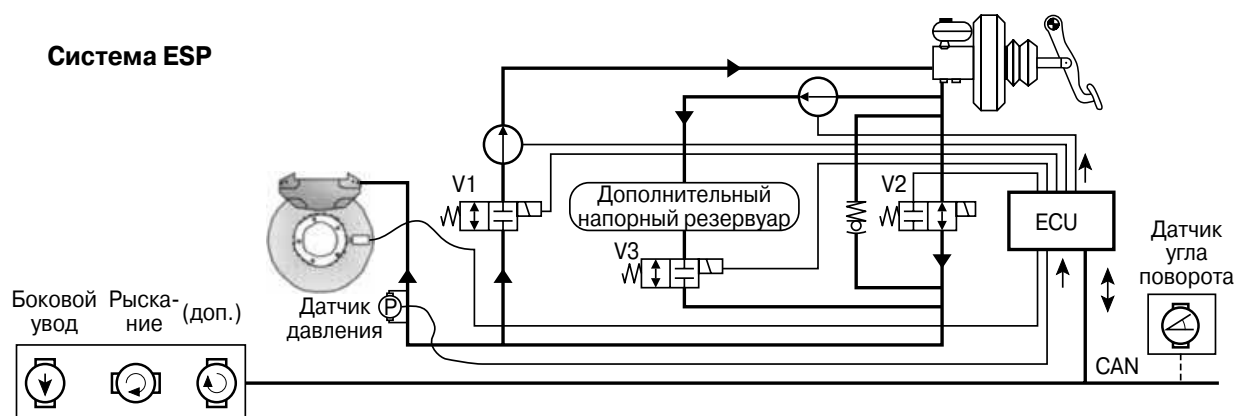


Рис. 9.17. Функциональная схема ESP (гидравлический тормоз; показано одно колесо).

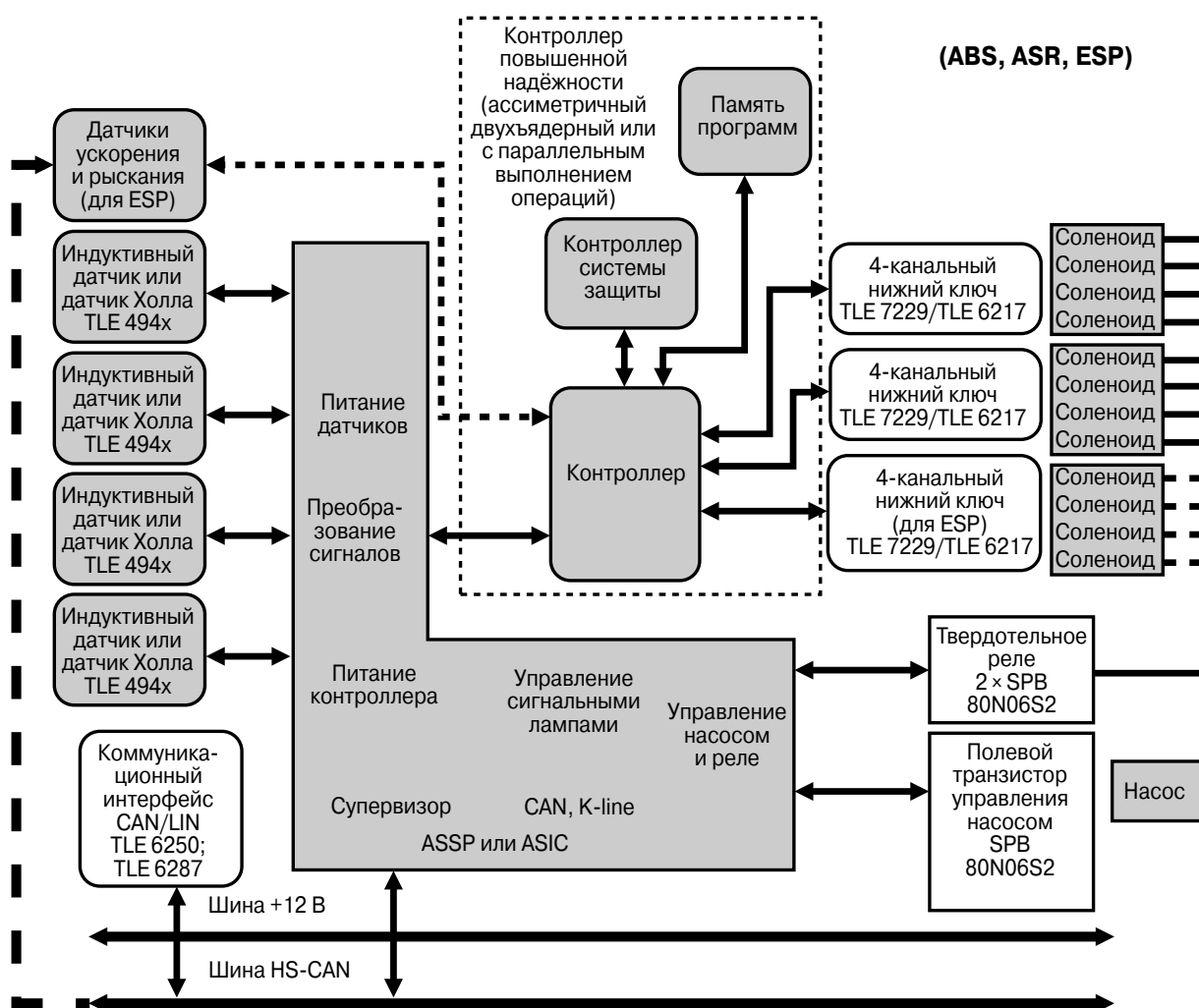


Рис. 9.18. Типичная архитектура контроллера для систем ABS, ASR, ESP.

ми. Общий взгляд на то, каким образом происходит развитие тех или иных локальных систем и, в перспективе, их интеграция в так называемую комплексную систему управления шасси, даёт диаграмма, приведённая на Рис. 9.19.

Существует немало и других направлений дальнейшего совершенствования тормозных систем. В частности, нельзя не упомянуть об использовании технологии управления по проводам (by-wire).



Рис. 9.19. Возможный сценарий создания комплексной системы управления шасси.

Первые образцы электрогидравлических тормозов были представлены в 2001 году компанией Daimler-Chrysler, которая, в свою очередь, использовала систему SensoTronic, разработанную в компании Bosch. Второе поколение этих устройств обладает значительно меньшим временем срабатывания. Активно развиваются, находя всё более широкое применение в автомобилях, и тормозные системы, разрабатываемые в рамках «гибридной» концепции. Смысл данной концепции состоит в том, что колёса автомобиля, расположенные на одной из его осей, оснащаются тормозной системой с электронным управлением (ABS, ASR и т.п.), в то время как на колёса, расположенные на другой оси, устанавливаются обычные гидравлические или электрогидравлические тормоза. Это решение позволяет снизить затраты, поскольку такие операции, как заливка тормозной жидкости и удаление воздуха из гидравлической системы, могут быть произведены ещё до окончательной сборки соответствующего моста. При этом благодаря полной независимости подсистем гибридное тормозное устройство характеризуется высоким уровнем безопасности и надёжности, поскольку при сбое электроники можно использовать гидравлический тормоз. В перс-

пективе все четыре колеса будут оснащены электронной системой торможения (как это показано на Рис. 9.20).

Однако в таком случае потребуется гарантировать абсолютную надёжность работы электроники, в том числе и источника питания. Кроме того, для функционирования подобных систем требуется наличие высокого напряжения питания (например, +42 В), что позволит снизить пиковые токи и уменьшить сечение проводов, а тем самым их вес. Ещё одно существенное требование — необходимость разработки нового, более детерминированного и отказоустойчивого стандарта шины передачи данных. В настоящее время разрабатываются различные шинные протоколы, соответствующие указанным требованиям, например FlexRay или так называемый протокол с временным разделением доступа (Time Triggered Protocol — TTP/C). Однако реализация доступного с ценовой точки зрения протокола немыслима без выработки унифицированного стандарта, общего для всех производителей.

Заканчивая обсуждение гибридных электронных тормозных систем, следует подчеркнуть, что их внедрение влечёт за собой развитие новых, основанных на модели методов разработки, призванных обеспечить коррект-

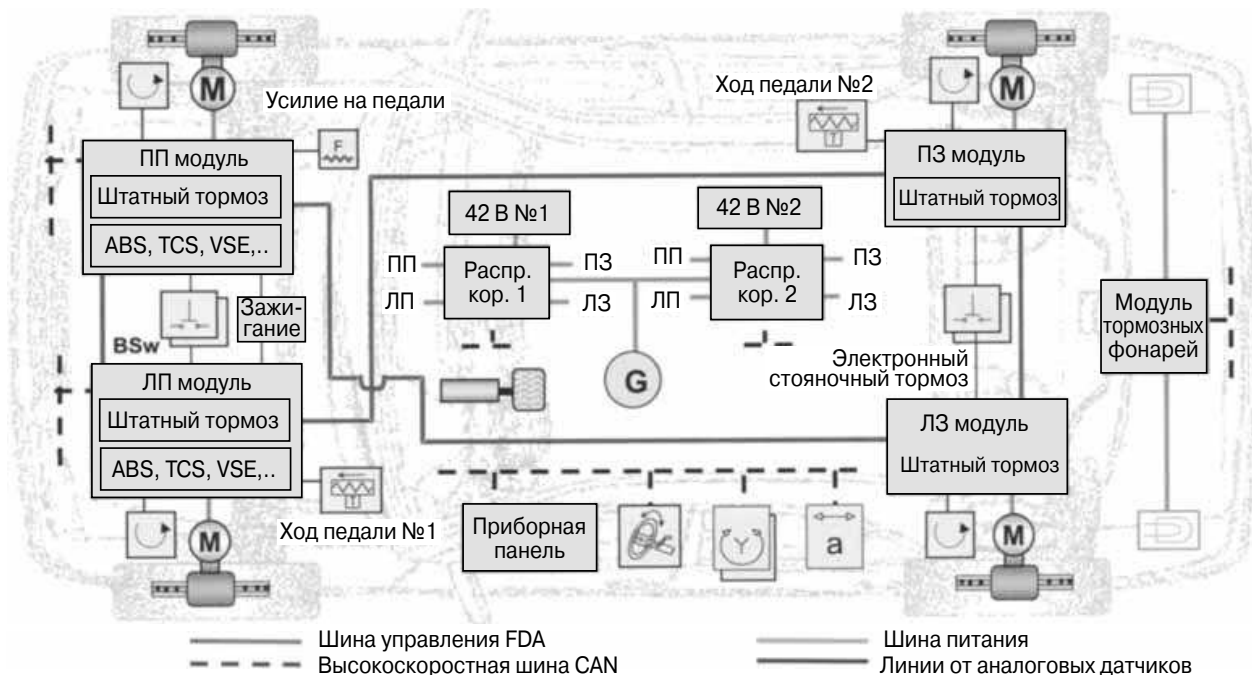


Рис. 9.20. Пример электронной тормозной системы с распределением тормозных усилий.

ность совместной работы всех систем в комплексе. Подобные автомобили уже разрабатываются многими автопроизводителями.

Примером таких разработок является совместный исследовательский проект «BRAKE», инициированный Евросоюзом в партнерстве с компаниями Delphi Systems, Infineon Technologies, Volvo Cars и Wind River. Проводятся исследования, направленные на развитие упомянутых выше новых технологий, и рассматриваются различные аспекты проектирования автомобильных систем безопасности. Разработанный в рамках проекта «BRAKE» прототип перспективной автомобильной тормозной системы рассчитан на питание повышенным напряжением +42 В и использует концепцию локального (распределённого) резервирования ресурсов, когда управление ими осуществляется на местах, а не с помощью центрального контроллера (который, следовательно, оказывается ненужным); подобная концепция позволяет обеспечить более высокий уровень безопасности. Таким образом, в данной тормозной системе отсутствует блок управления, а все расчёты и необходимые регулировки производятся внутри каждого из тормозных модулей, связь и взаимная синхронизация которых осуществляется с использованием детерминированной, отказоустойчивой, высоконадежной шинной архитектуры. Кроме того,

система в целом включающая управление двигателем, управление динамикой автомобиля, а также все компоненты, задействованные в тормозной системе, такие как алгоритмы и шины, были полностью смоделированы на компьютере с использованием методики искусственного ввода ошибок, позволяющей отработать корректное поведение системы даже в случае возникновения реальных ошибок.

Можно ожидать, что первые образцы полностью электронных тормозных автомобильных систем появятся на мировом рынке уже в ближайшие пять лет.

9.3.2. Системы пассивной безопасности автомобиля

Системы пассивной безопасности автомобиля помогают защитить пассажиров в случае ДТП, а также обеспечивают диагностические данные о состоянии окружающей среды и критических узлах автомобиля. Подобные системы не затрагивают такие узлы автомобиля, как трансмиссия (сцепление/коробка передач), управление работой двигателя, рулевое управление, тормоза или подвеска. К системам пассивной безопасности относятся:

- подушки и ремни безопасности;
- детекторы наличия пассажира;
- системы контроля давления в шинах (TPMS);

Таблица 9.4. Компоненты пассивных систем безопасности

Название компонента	Сокращ.	Выполняемая функция
Подушки безопасности с центральным управлением	ACFS	Фронтальные подушки безопасности водителя и/или пассажира; управление срабатыванием осуществляет блок управления (центральный контроллер) системы пассивной безопасности
Подушки безопасности с квази-центральным управлением	MCFS	Фронтальные подушки безопасности водителя и/или пассажира; управление срабатыванием осуществляется более чем одним контроллером
Система защиты от боковых ударов (передние сидения)	SIF	Боковые подушки безопасности предназначены для защиты пассажиров на передних сидениях
Система защиты от боковых ударов (задние сидения)	SIR	Боковые подушки безопасности предназначены для защиты пассажиров на задних сидениях
Подушки безопасности с распределённым управлением	ADFS	Подушки безопасности водителя и/или пассажира на переднем сидении; шинная архитектура
Прочие устройства (коленные и головные подушки безопасности, подголовники и т.п.)	Прочее	Дополнительные устройства защиты водителя и пассажиров
Детекторы наличия пассажира	OcD	Определяют наличие пассажира или детского сидения (в последнем случае происходит автоматическое отключение соответствующей подушки безопасности)

- системы предупреждения об опасном сближении;
- системы помощи водителю, например система парковки или детекторы пешехода.

Вне всякого сомнения, наибольшее распространение получили ремни и подушки безопасности. В **Табл. 9.4** приведены названия систем пассивной безопасности, их аббревиатуры и функциональное назначение. Размещение соответствующих пассивных систем в автомобиле показано на **Рис. 9.21**.

По периметру пассажирского салона располагаются различные датчики, размещённые в специальных нишах шасси. Вокруг пассажирских мест, оснащённых ремнями безопасности (с защёлками и натяжителями), расположены подушки безопасности. Блок управления (ECU) системами пассивной безопасности размещается в средней части шасси и максимально защищён от внешних воздействий (в том числе, от электромагнитных помех). Этот блок осуществляет большинство функций, связанных с управлением пассивными системами безопасности.

Блоки управления данного типа в настоящее время внедрены в производство и выпускаются в массовых количествах. Подробное описание этих приборов было дано выше, в главе 3. Структура такого электронного блока и его основные функции представлены на **Рис. 9.22**.

Блок управления подушками безопасности содержит функциональные узлы, краткое описание которых приведено ниже.

Источник питания

Обеспечивает питание всех подсистем требуемым постоянным напряжением. В случае аварии возможно отключение аккумуляторной батареи автомобиля, поэтому блок питания должен содержать резервный (аварийный) источник энергии. С этой целью используются конденсаторы большой ёмкости, которые заряжаются до максимально возможного напряжения через схему повышающего преобразователя (запасённая в них энергия рассчитывается по формуле $W = 0.5CV^2$). Этой энергии должно хватить, во-первых, для срабатывания пиропатронов (газогенераторов подушек безопасности) и, во-вторых, для питания датчиков, микроконтроллера и проведения диагностики (ведения протокола срабатывания подушек безопасности). Кроме того, блок источника питания осуществляет ещё и функции контроля. Так, схема управления сбросом следит за работой источника питания и, при необходимости, производит перезагрузку системы. Двухпороговый сторожевой таймер контролирует работу процессора и осуществляет его программный сброс, если, например, выполняется бесконечный программный цикл (dead-loop).

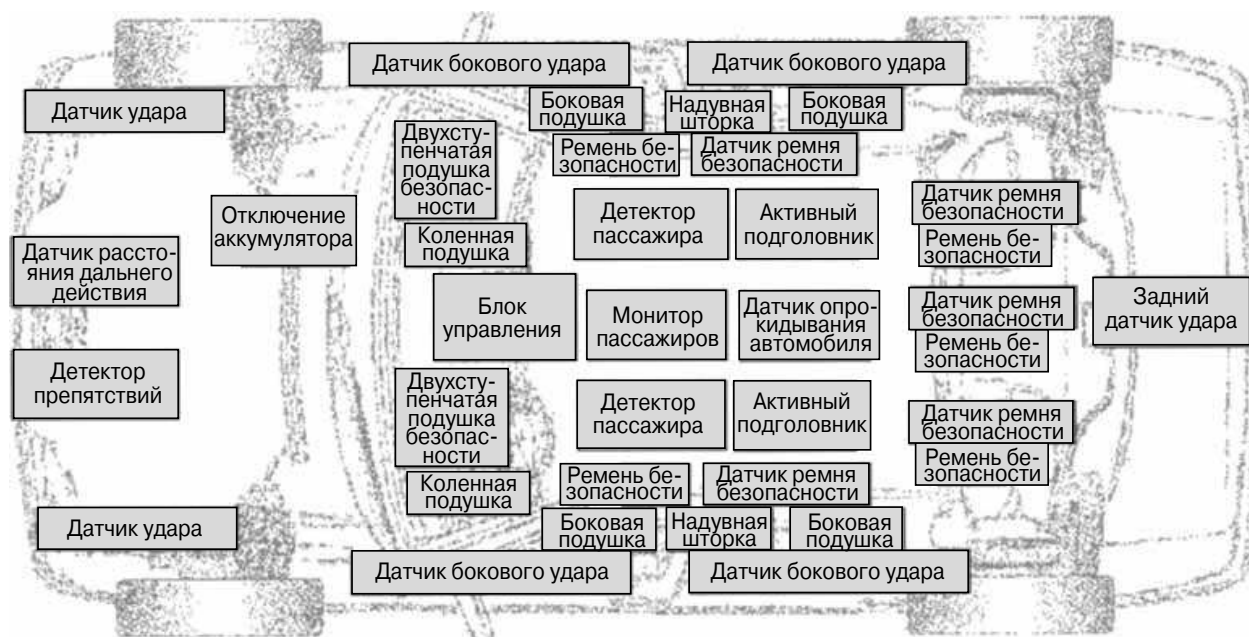


Рис. 9.21. Размещение пассивных систем безопасности и соответствующих датчиков в автомобиле.

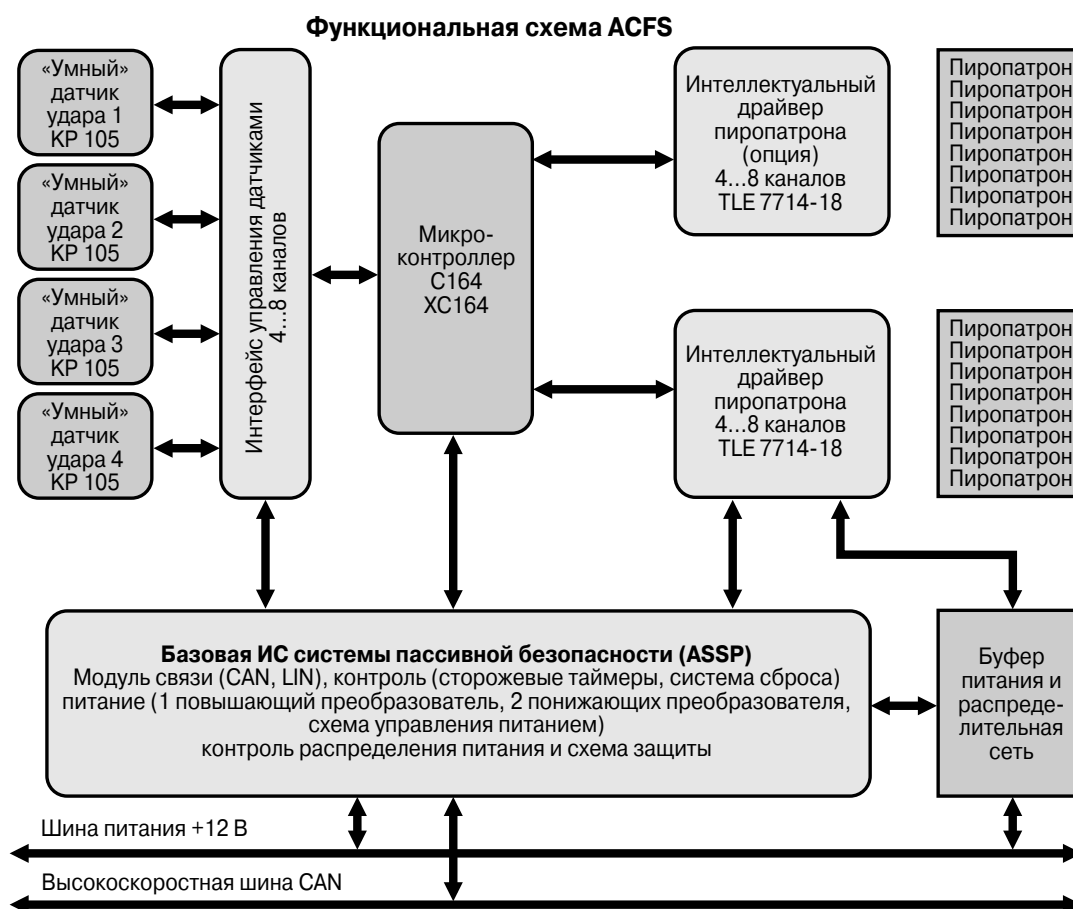


Рис. 9.22. Функциональная схема и основные системные компоненты стандартного блока управления подушками безопасности (ACFS) нового поколения.

В ECU следующего поколения все перечисленные функции, а также CAN-трансивер и схема защиты могут быть интегрированы в так называемой системной базовой ИС (SBC). Это уже обсуждалось при рассмотрении дверного модуля (см. **Рис. 9.5**).

Модуль связи

Включает в себя интерфейс высокоскоростной шины CAN и дополнительные интерфейсные узлы управления внешними датчиками (обычно используются последовательные интерфейсы с токовым управлением). Некоторые из датчиков интегрированы в блок управления (ECU) и управление ими осуществляется непосредственно микроконтроллером.

Микроконтроллер

Как правило, это 16-битный микроконтроллер с расширенными аналоговыми (наличие АЦП) и цифровыми (модуль памяти) периферийными функциями. Микроконтроллер должен обладать достаточно высокой производительностью, так как его работа осуществляется в режиме реального времени, и обеспечивать выполнение всех диагностических процедур, обусловленных современными требованиями к автомобильным системам безопасности. Поэтому в новых блоках управления применяются 32-битные микроконтроллеры. Повысить уровень безопасности можно за счёт использования небольшого дублирующего микроконтроллера. В ближайшей перспективе эта функция будет возложена на базовую системную ИС.

Устройства управления пиропатронами

Это быстродействующие силовые ИС, которые управляют воспламенением пиропатронов (газогенераторов) подушек безопасности, обеспечивая протекание через них тока 1...2 А в течение 10 мс. В результате нагрева температура пиропатрона повышается и происходит «взрыв»¹⁾. Посредством тщательной системной диагностики, осуществляемой контроллером пиропатронов, обеспечивается исключительно высокий уровень надёжности и безопасности системы, что практически исключает неисправ-

ности и ошибочные срабатывания подушек безопасности. В настоящее время стандартные блоки управления уже поддерживают 8...12 подобных устройств. В будущем количество каналов управления ещё больше возрастёт.

Компания Infineon разработала и предоставляет многим производителям автомобильной электроники готовый набор микросхем (чипсет), предназначенный для построения блоков управления подушками безопасности (подобные чипсеты разработаны и для других автомобильных систем).

Поскольку в пассивных системах безопасности задействовано большое количество периферийных устройств (датчиков и воспламенителей), логично было бы осуществлять связь со вспомогательными контроллерами этих устройств по шине обмена данными. Что касается управления датчиками, то в современных автомобилях оно уже реализовано именно таким способом. Устройство и специфические особенности функционирования этих контроллеров будут рассмотрены ниже на примере системы управления боковыми подушками безопасности.

Системы управления боковыми подушками безопасности с датчиками давления

Наличие боковых подушек безопасности, размещённых в передних и задних боковых дверях автомобиля, постепенно становится стандартом, которого придерживается большинство автопроизводителей. До недавнего времени в качестве боковых датчиков удара применялись, главным образом, датчики ускорения. Однако некоторые автопроизводители в последние годы придерживаются новой концепции детектирования бокового удара — они используют импульсные датчики давления, возникающего в момент бокового удара. По сравнению с системами на базе датчиков ускорения, системы с датчиками давления имеют много преимуществ. В первую очередь, это более высокая скорость и надёжность срабатывания подушек. Кроме того, их применение предоставляет значительно больше данных, на основании которых при боковом ударе блок управления принимает решение о немедленном воспламенении пи-

¹⁾ При этом выделяется большой объём газа, быстро заполняющего подушку безопасности. — *Примеч. пер.*

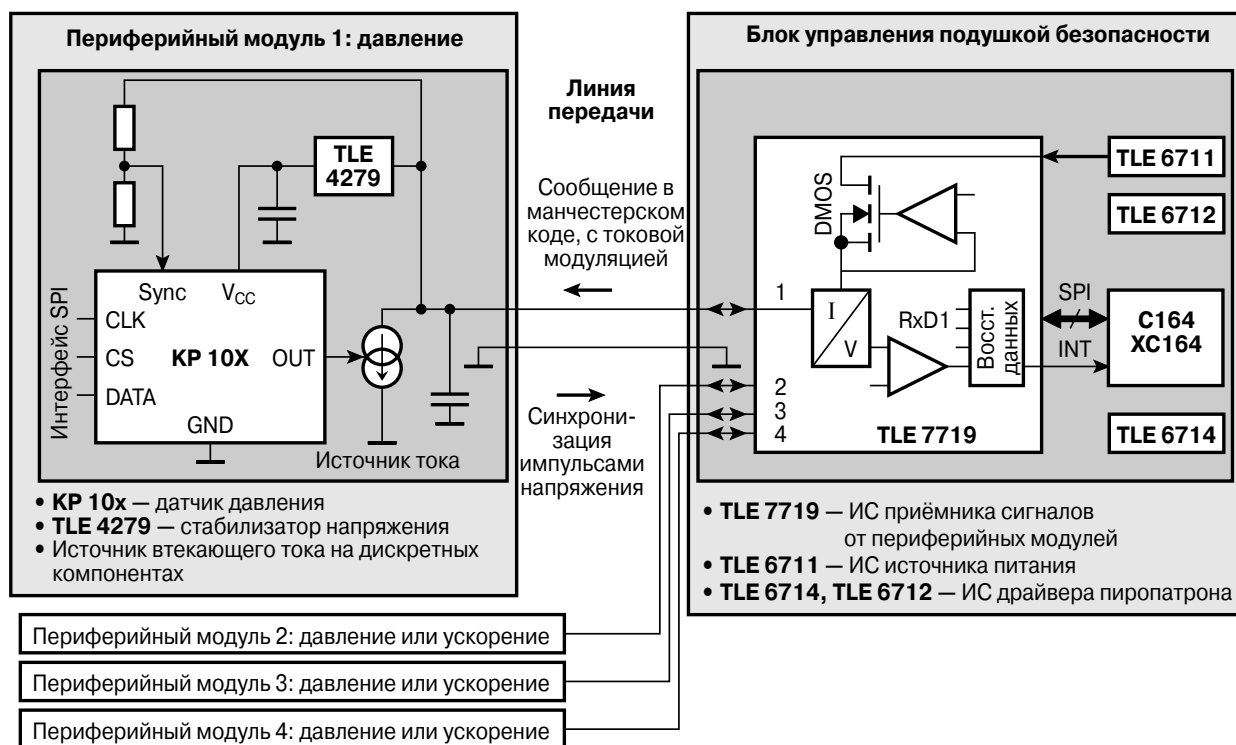


Рис. 9.23. Типичная структура системы управления боковыми подушками безопасности.

ропатрона подушки безопасности или о том, что такой необходимости нет.

Компания Infineon предлагает потребителям полный комплект соответствующих микросхем, в том числе датчики давления, интерфейсные ИС и интегральные источники питания, адаптированные для применения в данных устройствах.

Система пассивной безопасности с боковыми подушками безопасности

На Рис. 9.23 изображена структурная схема системы управления боковыми подушками безопасности. Модуль боковой подушки безопасности состоит из ИС датчика давления, ИС стабилизатора напряжения и нескольких дискретных компонентов, например транзистора для модуляции тока. Внешний кварцевый резонатор не требуется, поскольку ИС датчика имеет встроенный тактовый генератор с цифровым управлением. Вырабатываемый им синхросигнал по своим временным характеристикам соответствует требованиям, предъявляемым к передаче данных в манчестерском коде.

Собственно блок управления подушкой безопасности содержит интерфейсную микросхему датчика, ИС источника питания, микроконтроллер и ИС драйвера, уп-

равляющего срабатыванием пиропатрона подушки безопасности.

Решение о том, следует ли воспламенить пиропатрон, принимается микроконтроллером по специальному алгоритму. Этот алгоритм основан на анализе данных, полученных от датчика давления. Важными критериями здесь являются уровень импульса давления и скорость его изменения. В системах следующего поколения будут учитываться не только данные датчика давления, но и другие данные, например от датчика ускорения, размещённого на боковой стойке кузова. За счёт комбинирования информации, полученной от датчиков давления и ускорения, эффективность управления боковой подушкой безопасности значительно возрастет, при этом появится возможность принимать более взвешенное решение о необходимости срабатывания подушки.

В подобной комбинированной системе датчик ускорения может подключаться к микроконтроллеру через каналы приёма интерфейсной ИС датчика.

Функции самодиагностики

Для систем обеспечения безопасности автомобиля и пассажиров совершенно необходимо наличие функций самодиагностики. По этой причине в интегральный дат-

чик встроена поддержка различных диагностических процедур, призванных обнаружить возможные неисправности или факт деактивации подушки безопасности и оповестить об этом водителя.

Для обеспечения оперативного контроля системы управления подушками безопасности, интегральные датчики давления нового поколения имеют уникальный идентификационный номер. Этот номер передаётся в стартовом сообщении датчика, которое он передаёт при инициализации системы. Кроме того, каждый раз при включении датчик также передаёт в блок управления диагностическое значение, свидетельствующее о корректной работе датчика или, напротив, его неисправности. Другие функции самодиагностики предназначены для постоянного контроля работоспособности электронных цепей, входящих в состав модуля датчика. При обнаружении ошибки её код передаётся в блок управления.

Связь с центральным блоком управления подушками безопасности осуществляется посредством специализированных ИС. Эти микросхемы предназначены для приёма пакетных сообщений (в манчестерском коде, с токовой модуляцией), которые ИС датчиков давления передают в блок управления по двухпроводной линии. Например, микросхема управления периферийным интерфейсом TLE 7719 может одновременно обслуживать до четырёх двухпроводных линий. Полученные данные передаются в микроконтроллер через последовательный интерфейс SPI. Такая структура позволяет существенно разгрузить микроконтроллер.

Ключевым звеном системы управления подушкой безопасности является модуль датчика, более детальное обсуждение работы которого приведено ниже.

Модуль датчика давления

Ядром интегрального датчика давления являются ёмкостные сенсорные ячейки. Фактически, датчик представляет собой так называемую микроэлектромеханическую систему¹⁾, выполненную в корпусе для поверхностного монтажа, которая также включает в себя интегральный АЦП и схемы цифровой обработки сигнала. Датчик имеет цифровой интерфейс (SPI), совме-

тимый со стандартным микроконтроллером. Помимо этого, он поддерживает ряд функций самодиагностики, что абсолютно необходимо для систем обеспечения безопасности.

Существует два основных типа датчиков давления: простые, способные передавать непосредственно измеренные абсолютные значения давления через интерфейс SPI, и более сложные, которые передают предварительно обработанный встроенным процессором сигнал (соответствующий относительной величине изменения давления) в манчестерском коде. Применение датчиков второго типа позволяет значительно сократить количество компонентов и устройств в модуле и, следовательно, снизить стоимость дверного модуля в целом. Оба типа интегральных датчиков давления выпускаются в малогабаритном корпусе для поверхностного монтажа, что полностью соответствует требованиям, предъявляемым к электронным компонентам современных автомобилей.

Технология производства интегральных датчиков давления

Не секрет, что на рынке автомобильных систем безопасности особо востребованы недорогие и узко специализированные полупроводниковые модули, удовлетворяющие высшим стандартам качества.

В настоящее время при производстве интегральных датчиков давления наиболее распространённым является 0.8-мкм технологический процесс BiCMOS (БиКМОП), который при использовании стандартного технологического оборудования обеспечивает высокую стабильность параметров готовой продукции.

Базовым элементом ИС датчика является чувствительная к давлению ячейка. В отличие от обычно используемой технологии объёмной микрообработки, когда чувствительная к давлению мембрана образуется с обратной стороны кремниевой пластины (подложки) за счёт анизотропных свойств кристалла при его травлении, здесь используется так называемая поверхностная микроэлектромеханическая обработка. Эта технология позволяет получать чувствительные ячейки заданной топологии путём многократного

¹⁾ Микроэлектромеханические системы (МЭМС, или MEMS) — устройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микроэлектромеханические компоненты. — *Примеч. ред.*

нанесения (осаждения) и удаления (травления) тонких слоёв различных материалов.

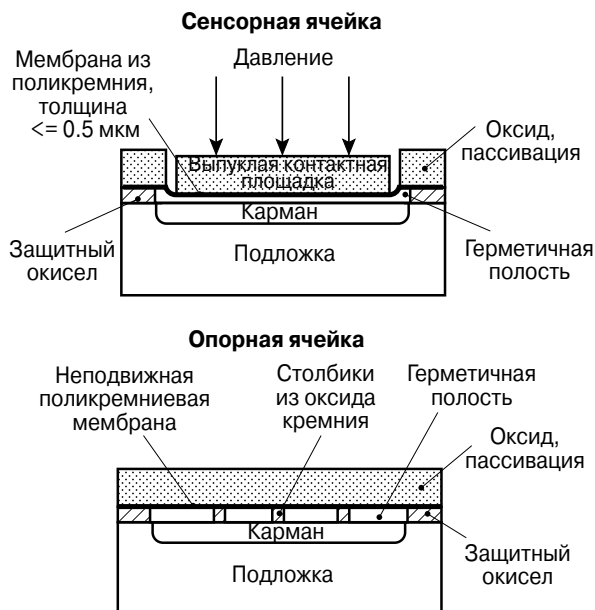


Рис. 9.24. Структура сенсорной ёмкостной и опорной ячеек, изготовленных путём поверхностной микромеханической обработки (масштаб не соблюден).

На **Рис. 9.24** показан поперечный разрез типичной сенсорной ячейки, которая содержит эластичную мембрану, выполненную из поликристаллического кремния (поликремния), герметичную полость и проводящий электрод (сток), нанесённый на поверхность подложки.

Герметичная полость формируется с помощью специального промежуточного оксидирования. Затем предварительно нанесённый на подложку оксидный слой удаляется через небольшие отверстия в поликремниевой мембране. Образующаяся полость герметизируется путём нанесения нового оксидного слоя. Чтобы повысить чувствительность ячейки к изменениям давления, в этом вновь нанесённом оксидном слое вытравливается желоб до поликремния (мембраны). Таким образом, образуется квадратная сенсорная площадка в центре мембраны.

В рамках того же технологического процесса изготавливаются также опорные (контрольные) ячейки, которые почти идентичны сенсорным. Однако они внутри полости содержат небольшие столбики из оксида кремния, которые жёстко фиксируют мембрану. Кроме того, не протравлива-

ется желоб. Поэтому опорная ячейка не чувствительна к перепаду давления, но её ёмкость и температурные характеристики близки к соответствующим характеристикам сенсорной ячейки. Опорные ячейки применяются совместно с сенсорными в качестве компенсирующих элементов, например, в мостовых схемах.

Корпуса ИС датчиков давления

Поверхность микросхемы датчика должна быть открыта внешнему давлению, поэтому требуется специально спроектированный корпус. В качестве такового выбран миниатюрный корпус для поверхностного монтажа, благодаря чему можно разрабатывать сенсорные модули малых габаритов. Полупроводниковый кристалл защищён не традиционным жёстким компаундом, а эластичным гелем. Этот гель обладает высокой стойкостью к воздействию активных химических веществ (которых в автомобиле немало), а также предохраняет поверхность кристалла от образования конденсата.

Микросхемы комплектуются защитными колпачками, которые удаляются после припаивания на печатную плату модуля. На **Рис. 9.25** показана ИС в SMD-корпусе со снятым защитным колпачком.

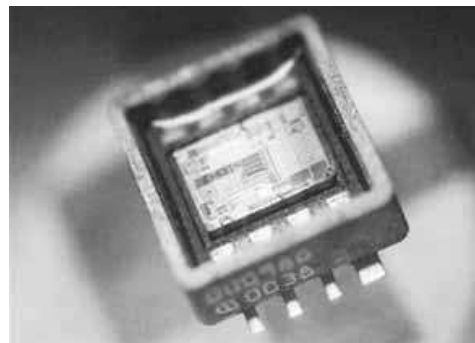


Рис. 9.25. ИС датчика давления в корпусе для поверхностного монтажа.

Дальнейшее развитие систем управления подушками безопасности: шина управления

Очевидной представляется идея разместить электронные компоненты, управляющие срабатыванием подушки безопасности, рядом с ней. Такая структура существенно проще используемой до сих пор звездообразной структуры «центрального» управления. Кроме того, она позволит свести к

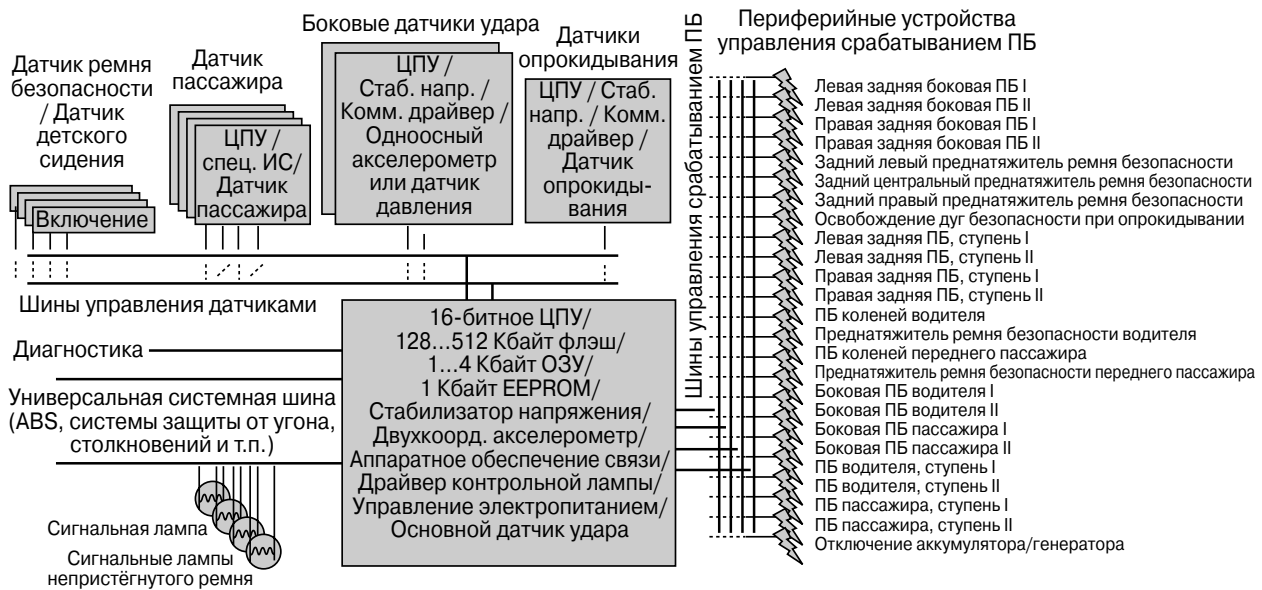


Рис. 9.26. Структура пассивной системы безопасности с шиной управления срабатыванием подушек безопасности и периферийными датчиками, которая позволяет упростить схему электропроводки автомобиля.

минимуму наводки и паразитные сигналы, вызванные взаимовлиянием длинных линий управления. Таким образом, на повестке дня стоит вопрос о размещении драйверов пиропатронов в непосредственной близости от подушек безопасности и доступе к этим драйверам по специальной шине управления (firing bus), концепция которой в настоящее время находится в стадии активной разработки. Прежде чем приступить к серийному производству подобной продукции, необходимо обеспечить её полное соответствие требованиям надёжности. В этой связи немало головной боли разработчикам доставляет проблема гарантированной защиты шины от повреждений и сбоев в случае аварии автомобиля. Возможная архитектура подобной системы управления подушками безопасности (ПБ) приведена на **Рис. 9.26**.

Из рисунка видно, что существует возможность построения многошинной системы с использованием всего лишь нескольких управляющих и сигнальных линий и интеллектуальных периферийных устройств управления срабатыванием подушек безопасности. Такая структура позволяет существенно сэкономить на проводке. Однако наверняка пройдёт ещё несколько лет, прежде чем подобные системы появятся на рынке в заметных количествах.

Зато такие компоненты систем автомобильной безопасности, как устройства контроля давления в шинах, появились уже достаточно давно. Следующий подраздел посвящён их подробному обсуждению.

Системы контроля давления в шинах, использующие микромеханические датчики давления

Поводом для разработки подобных систем стали статистические данные о большом количестве серьёзных ДТП, вызванных потерей давления в шинах автомобилей. Например, в США даже пришлось принимать специальные законодательные акты на эту тему. С точки зрения безопасности движения, падение давления в шинах наиболее опасно при езде на высоких скоростях и в условиях плотного дорожного трафика. По этим причинам имеет смысл уделить особое внимание применению интегрального датчика давления КР 500 производства компании Infineon. Ниже мы рассмотрим принципы взаимодействия электрических и механических компонентов данной ИС, вместе составляющих микроэлектромеханическую систему (MEMS).

Общие замечания

Как правило, система контроля давления в шинах (Tire Pressure Monitoring System — TPMS) состоит из 4 или 5 барометрических сенсорных модулей (в соответствии с коли-

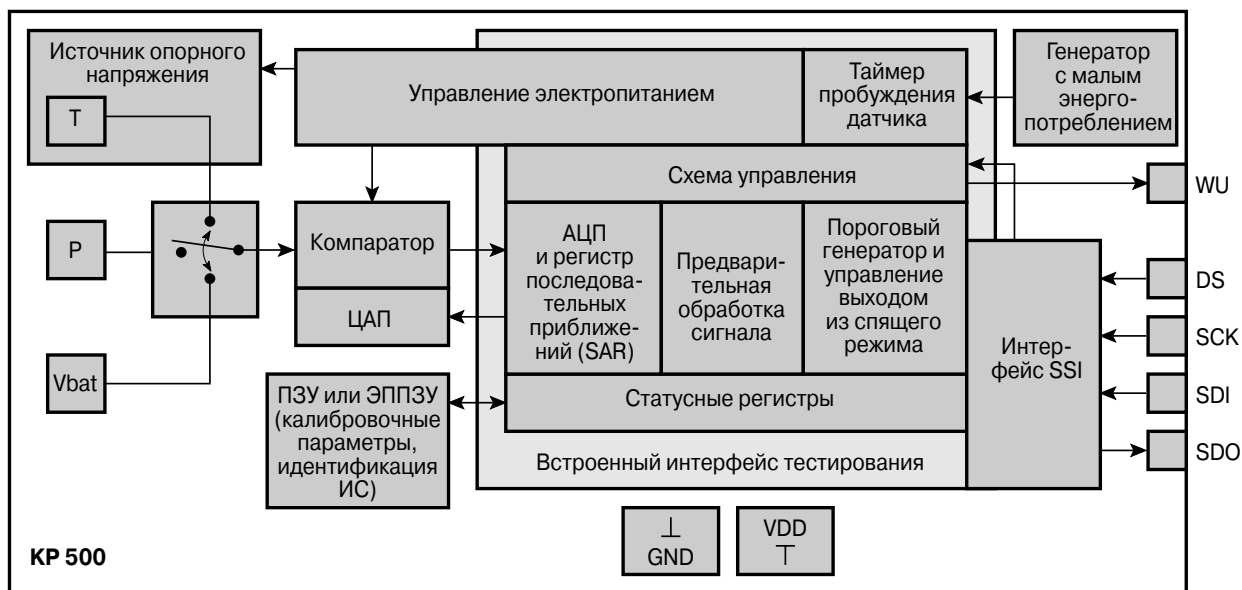


Рис. 9.27. Структурная схема интегрального датчика серии KP 500.

чеством колёс транспортного средства) и блока управления. Сенсорные модули измеряют давление и температуру воздуха в шине. Они имеют автономное (батарейное) питание и передают данные в блок управления по ВЧ. Для того чтобы снизить ток потребления, данные передаются в пакетном виде, а временной интервал между пакетами зависит от текущей ситуации.

Таким образом, сенсорный модуль выполняет три основные функции:

- измерение;
- контроль;
- передача данных.

Реализация указанных функций может осуществляться различными аппаратными средствами и на основе различных конструкторских решений, связанных с распределением ресурсов между этими задачами. Например, новая ИС передатчика PMA 5100 компании Infineon имеет встроенный микроконтроллер и идеально подходит для совместной работы с микросхемой KP 505, относящейся к серии KP 500 интегральных датчиков давления в шине. В микросхему датчика могут быть интегрированы и дополнительные функции микроконтроллера. Примером такого интеллектуального датчика является ИС KP 510, которую можно подключать непосредственно к входу стандартного ВЧ передатчика (ИС TDA 5100 и т.п.). Этот передатчик способен работать в режиме амплитудной (ASK) или фазовой (FSK) манипуляции на частотах 434 или 869 МГц.

Таким образом, серия KP 500 представляет собой часть семейства интегральных датчиков, созданных на единой платформе и с различными функциональными возможностями, что обеспечивает необходимую гибкость при адаптации к самым различным системным требованиям.

KP 500: серия интегральных датчиков для систем контроля давления в шинах

Интеллектуальные датчики серии KP 500 поддерживают все функции, требуемые для работы сенсорных шинных модулей, что позволяет обойтись без использования дополнительных компонентов. Датчики предназначены для измерения таких физических параметров, как давление, температура и напряжение батареи.

На Рис. 9.27 приведена структурная схема ИС серии KP 500. В её состав, помимо собственно сенсорных ячеек, входят АЦП, схема процессора цифровой обработки сигналов, ПЗУ калибровочных параметров, схема управления питанием и встроенный контроллер последовательного интерфейса SSI. Обладая такими функциональными возможностями, ИС KP 500 обеспечивают простую и гибкую системную интеграцию.

Срок службы прибора во многом зависит от наличия продуманной системы контроля и управления электропитанием. Датчики KP 500 спроектированы таким образом, что срок их работы от одного комплекта батарей превышает 10 лет (это достигается за

счёт оптимизации энергопотребления встроенных передатчика и микроконтроллера). Большинство электрических цепей и узлов микросхемы активируются лишь на короткое время, когда необходимо произвести измерения. Контроллер на жёсткой логике управляет длительностью цикла измерения, посылая соответствующие сигналы в блок управления электропитанием. Цикл измерения может быть инициирован внешней управляющей командой или при помощи встроенного алгоритма пробуждения. Обычно измерения проводятся 1 или 2 раза в секунду. Этого вполне достаточно, поскольку измеряемая величина (давление в шине) изменяется гораздо медленнее.

Технология производства датчиков давления серии KP 500

Датчики давления представляют собой ёмкостные ячейки, выполненные методом поверхностной микрообработки (Surface MicroMachining — SMM). Они рассчитаны на измерение давления в диапазоне до 650 ГПа (6.5 атм.). Два набора сенсорных ячеек и два набора опорных ячеек формируют схему ёмкостного моста. При любом изменении окружающего давления изменяется ёмкость сенсорных ячеек, вследствие чего смещается баланс моста. Напряжение, пропорциональное величине измеряемого давления, с выхода мостовой схемы поступает на АЦП с дифференциальным входом. Преобразование осуществляется по методу последовательных приближений.

Технология поверхностной микрообработки в настоящее время получила широкое распространение и постоянно совершенствуется. Компания Infineon при производстве сенсорных ячеек датчиков давления использует технологию SMM совместно со стандартной БиКМОП-технологией, которая позволяет создавать на одном полупроводниковом кристалле как биполярные, так и КМОП-транзисторы. Таким образом, внедрённая компанией Infineon комплексная технология микрообработки является на сегодняшний день наиболее совершенной. Компания Infineon начала массовое производство датчиков давления по новой технологии в 1998 году, и сегодня датчики как с аналоговым, так и цифровым выходом выпускаются в больших количествах. Название «поверхностная» микрообработка связано с тем, что все технологические про-

цессы осуществляются на той же поверхности полупроводниковой пластины, на которой формируются элементы ИС.

Технология производства SMM-датчиков давления основана на использовании стандартного полупроводникового 0.8-мкм технологического процесса БиКМОП. В настоящее время ведутся разработки, направленные на уменьшение топологических норм до 0.5 мкм, что позволит ещё более расширить возможности данной технологии.

Базовым элементом конструкции интегрального датчика давления является сенсорная ячейка, структура которой показана на **Рис. 9.28**. Она состоит из кремниевой

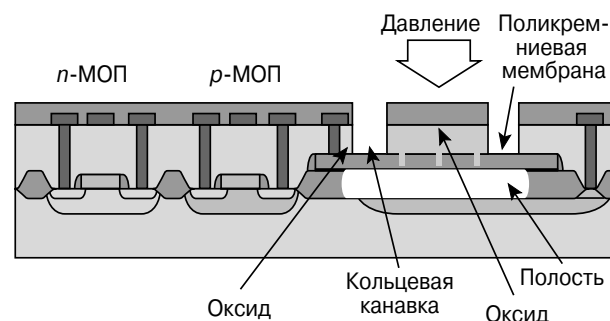


Рис. 9.28. Поперечный разрез датчика давления.

подложки и выполненной в ней герметичной полости, закрытой тонкой гибкой мембраной. Мембрана и подложка представляют собой две обкладки конденсатора. Под воздействием внешнего давления мембрана прогибается, вследствие чего ёмкость сенсорной ячейки изменяется.

Мембрана выполнена из поликремния. Этот слой формируется с помощью стандартного БиКМОП технологического процесса и используется в качестве проводящего слоя и как составная часть линейного конденсатора. Слой оксида кремния (выполняющий функцию изолятора), при поверхностной микрообработке играет роль промежуточного слоя, который (и это одно из немногих отличий технологии SMM от БиКМОП) затем удаляется путём химического вытравливания вплоть до поликремниевой мембраны (сама мембрана при этом остаётся неповреждённой). Травление осуществляется через отверстия в мембране диаметром 1 мкм. Размеры образующейся полости определяются анизотропными характеристиками кристалла (химическое

травление вдоль различных осей кристалла идёт с различной скоростью).

Использование подобной уникальной технологии позволяет реализовать экономичные решения, когда производительность всей системы оптимизирована за счёт немедленной цифровой обработки сигналов, величина которых пропорциональна измеряемому давлению. В то же время интеграция новой технологии в стандартный БиКМОП технологический процесс обеспечивает экономически эффективный способ создания чрезвычайно надёжных интеллектуальных датчиков для автомобильной электроники. Технология поверхностной микрообработки особенно хорошо подходит для систем контроля давления в шинах (TPMS), поскольку в таких системах требуются низкое энергопотребление и высокий уровень точности.

Итоговые замечания

Развитие улучшенных технологий микрообработки обеспечивает возможность создания интеллектуальных датчиков. Устройства с батарейным питанием, благодаря простоте и надёжности их конструкции, в течение нескольких ближайших лет будут ещё доминировать в системах контроля давления в шинах. Тем не менее, в настоящее время разрабатываются устройства без батарейных датчиков, непосредственно интегрированных в шину. Таким образом, существует немало стимулов к совершенствованию датчиков и соответствующих электронных схем, поэтому можно полагать, что развитие систем микрообработки ещё не достигло своего апогея.

Автомобиль будущего будет обладать дополнительными функциями обеспечения безопасности, объединёнными в единую, удовлетворяющую всем требованиям надёжности систему с компьютеризованным управлением. Такая система будет основана на принципе избыточности функций, необходимость которого очевидна, например, для электронных систем торможения или рулевого управления. Таким образом, следует ожидать появления более сложных автомобильных контроллеров, подобных тем, что в настоящее время применяются в авиации.

Дальнейшее совершенствование этих электронных устройств возможно лишь в сотрудничестве автопроизводителей, пос-

тавщиков комплектующих и производителей полупроводниковых компонентов. Необходимость подобного сотрудничества особенно очевидна, когда речь идёт о разработке такого сложного оборудования, как электронные системы управления двигателем и трансмиссией.

9.4. Трансмиссия автомобиля

Введение жёстких стандартов в отношении токсичности выхлопных газов и неуклонный рост цен на топливо означают, что в современных автомобилях невозможно обойтись без электронных систем управления двигателем внутреннего сгорания. Электронные контроллеры измеряют целый ряд различных физических величин, вычисляют количество впрыскиваемого топлива и временные характеристики системы зажигания и управляют работой соответствующих исполнительных устройств, например дроссельной заслонки, с помощью мощных выходных каскадов (полупроводниковых схем). Таким образом, полупроводниковые компоненты играют главную роль в электронных блоках управления. Основная задача автопроизводителей ныне состоит не только в разработке наиболее совершенных двигателей, но и в проектировании соответствующей электроники и программных средств, а также в правильном выборе полупроводниковых компонентов. Именно к устройствам управления двигателем предъявляются самые строгие требования при работе в наиболее жёстких условиях эксплуатации. Необходимой предпосылкой для того, чтобы разработчики автомобильных систем имели возможность выбора оптимального решения с точки зрения производительности и стоимости, является наличие соответствующих технологий и приборов.

9.4.1. Полупроводниковые технологии для систем управления трансмиссией автомобиля

Современные полупроводниковые приборы используются во всех системах управления трансмиссией (Рис. 9.29.)

Управление трансмиссией автомобиля предполагает использование целого ряда датчиков, измеряющих различные физические величины и преобразующих их в электрические сигналы. Сюда относятся

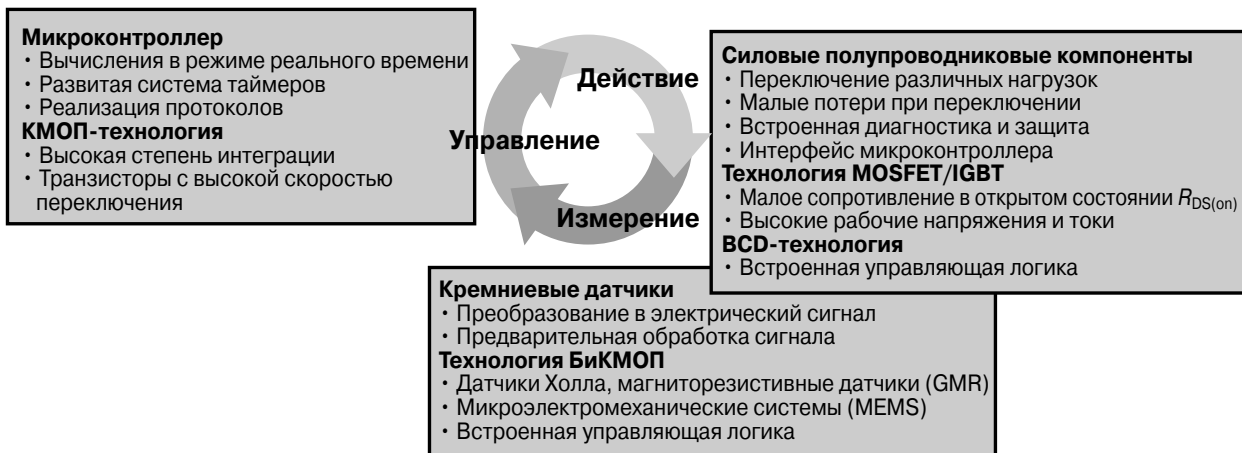


Рис. 9.29. Полупроводниковые компоненты и технологии, используемые в схемах управления трансмиссией автомобиля.

полупроводниковые датчики угловой скорости вращения, направления, температуры и давления. Как упоминалось в предыдущем разделе, современная тенденция состоит в переходе от пассивных датчиков к активным, когда собственно сенсорный элемент дополняется электронной схемой цифровой обработки сигнала.

Возросший уровень интеграции, обеспечиваемый современными КМОП-технологиями, позволяет создавать микроконтроллеры с высокопроизводительными процессорами и мощным набором периферийных функций. Использование компьютерных архитектур в системах управления трансмиссией автомобиля должно отвечать потребностям в вычислениях в режиме реального времени, без чего невозможно осуществлять точное управление работой двигателя внутреннего сгорания. Этим применяемая в системах управления двигателем компьютерная архитектура отличается, например, от архитектуры персональных компьютеров. Тенденция к увеличению плотности размещения полупроводниковых элементов интегральных схем обеспечивает также условия для реализации в микроконтроллерах функций цифровой обработки сигналов (DSP). Таким образом, появляется возможность реализовывать данные функции программным, а не аппаратным способом (как это делалось ранее при помощи специализированных ИС).

В последнее время развитие полупроводниковых технологий было, в основном, связано с оптимизацией уже существующих ре-

шений в отношении их стоимости и функциональных возможностей. Результатом указанного подхода стало появление комплексных технологий (например, BCD), позволяющих объединять силовые выходные каскады на ДМОП-транзисторах, аналоговые и цифровые логические схемы в одном полупроводниковом приборе с высокой степенью интеграции. Использование таких полупроводниковых компонентов позволяет существенно снизить стоимость контроллеров. MOSFET-технология продолжает тенденцию, направленную на снижение стоимости компонентов при сохранении их функциональности. Компания Infineon разработала семейство силовых приборов OptiMOS™, представляющих собой дальнейшее развитие MOSFET-технологии. Их основное преимущество состоит в том, что они имеют значительно меньшие потери при переключении и обеспечивают требуемый уровень надёжности (см. также главу 3).

9.4.2. Применение полупроводниковых приборов в трансмиссии автомобиля — системный обзор

Основой современных контроллеров для управления двигателем и трансмиссией автомобиля являются активные полупроводниковые компоненты, к числу которых относятся микроконтроллеры, силовые полупроводниковые приборы, а также датчики. Типичная блок-схема контроллера, предназначенного для управления бензиновым двигателем, приведена на **Рис. 9.30**.

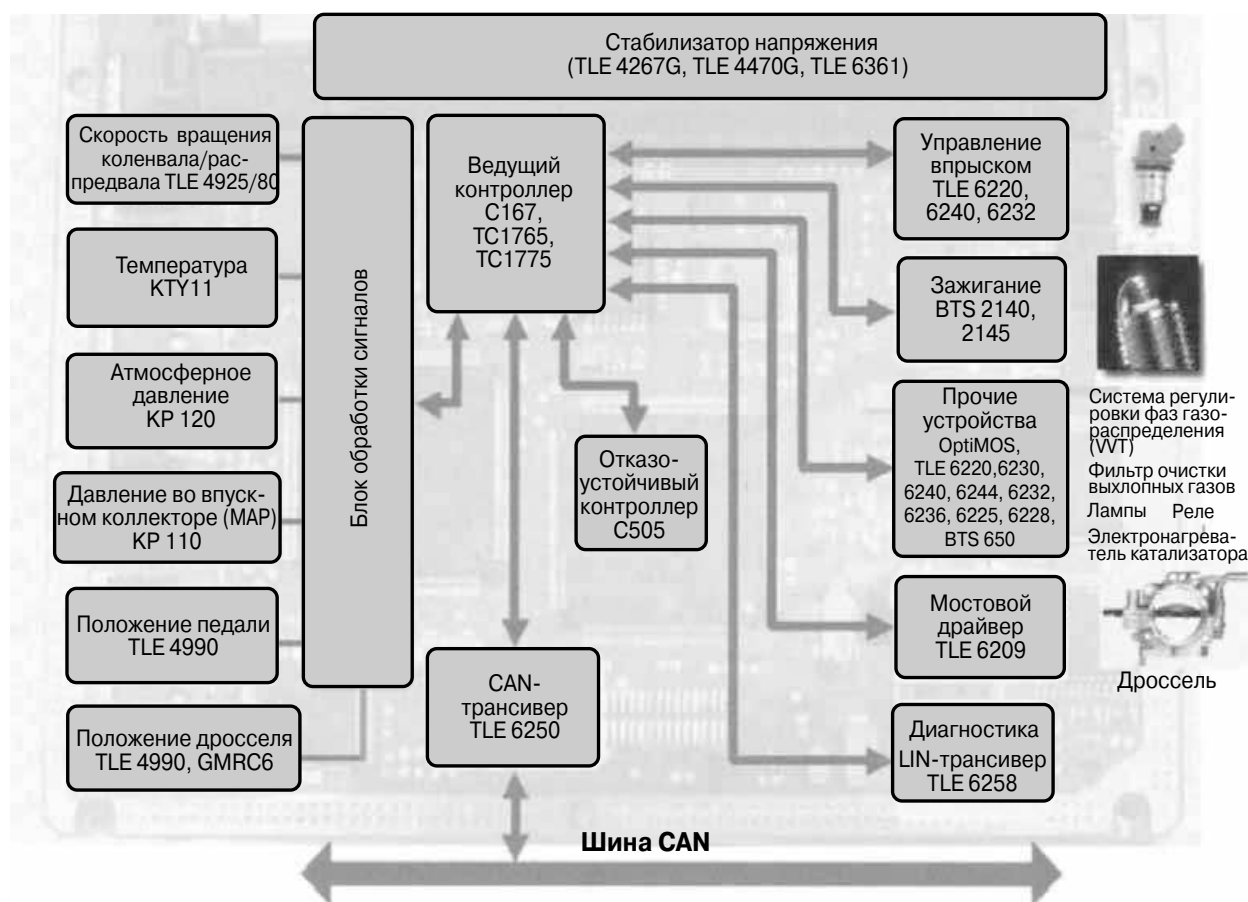


Рис. 9.30. Структурная схема контроллера для бензинового двигателя.

Полупроводниковые датчики

Динамические дифференциальные датчики Холла, такие как TLE 4925 и TLE 4980, могут применяться для измерения угловой скорости вращения коленчатого или распределительного вала, элементов трансмиссии или колёс автомобиля. Объединив датчик Холла в одном корпусе с таким аналоговым компонентом, как конденсатор (см. Рис. 9.31), можно получить прибор, не требующий подключения каких-либо дополнительных цепей или компонентов.

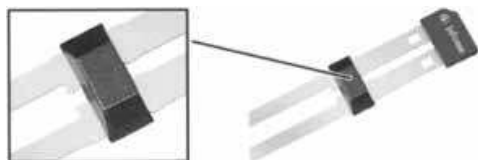


Рис. 9.31. Объединение в одном корпусе датчика Холла и конденсатора.

Применение современных MEMS-технологий открывает возможность создания совершенно новых датчиков давления, перегрузки и угловой скорости вращения.

Реализация аналоговых датчиков, предназначенных для измерения абсолютного давления во впускном коллекторе или атмосферного давления, по хорошо отработанной БиКМОП-технологии (пример такой реализации приведён на Рис. 9.32) позволяет дополнительно интегрировать в ИС датчика логические функции.

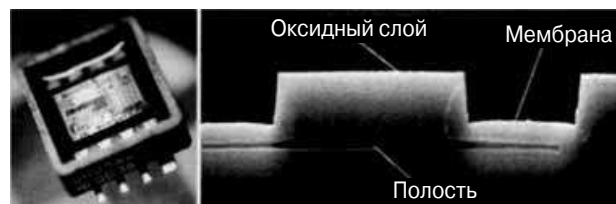


Рис. 9.32. Структура сенсорной ячейки ИС КР 120 (датчик абсолютного барометрического давления).

Полупроводниковые силовые компоненты

Интеллектуальные мощные выходные каскады

Электронное управление двигателем и трансмиссией автомобиля предполагает управление переключением таких энергоёмких узлов, как инжекторные форсунки системы впрыска топлива, нагревательные элементы для лямбда-зондов, катушки зажигания, вентиляторы и различные реле. Для этих целей компания Infineon разработала семейство многоканальных (от 2 до 18 каналов) аналоговых ключей, способных коммутировать токи от 50 мА до 10 А. Диаграмма, приведённая на **Рис. 9.33**, даёт некоторое представление о характеристиках этого семейства. Современные многоканальные коммутаторы содержат также управляющие схемы, что позволяет использовать данные ключи автономно, без применения внешних устройств. Типичная структурная схема многоканального аналогового коммутатора показана на **Рис. 9.34**.

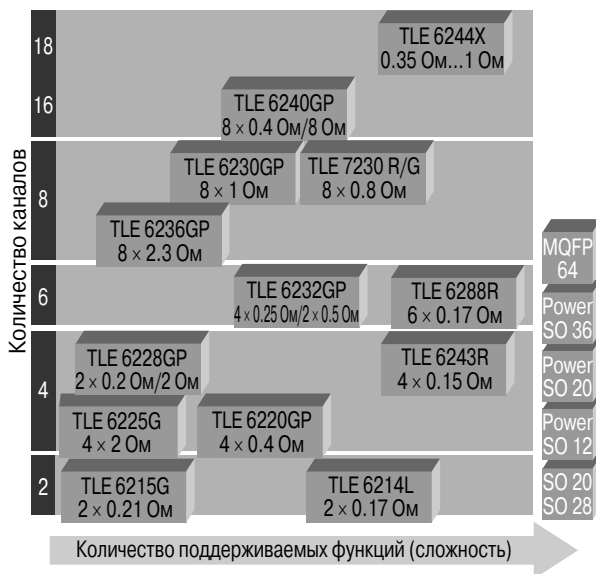


Рис. 9.33. Многоканальные аналоговые ключи Infineon.

Помимо логических функций, связанных с управлением ключами, данные устройства поддерживают процедуры самодиагностики и защиты, служащие для обнаружения коротких замыканий, перегрузок по току, недопустимого превышения температуры или обрыва проводников в цепи нагрузки. Некоторые из коммутаторов поддерживают и такие защитные функции, как отключение при перегрузке или возмож-

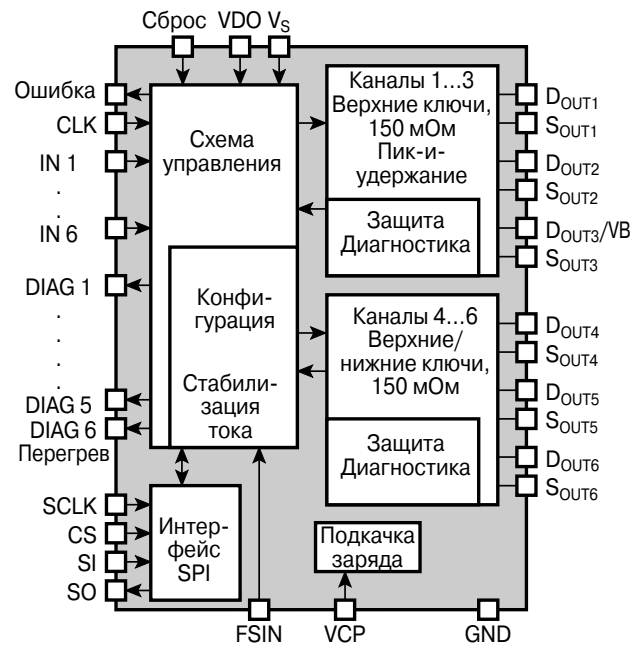


Рис. 9.34. Структурная схема многоканального ключа TLE 6288R, используемого в схемах управления автоматической коробкой передач автомобиля.

ность работы в аварийном режиме Limp Home (буквально «доковылять до дома»). В самом ближайшем будущем следует ожидать появления в составе этих устройств быстрого последовательного интерфейса, что позволит использовать их в управляющих системах реального времени (например, в стабилизаторах тока с ШИМ). Кроме того, с помощью подобного интерфейса данные самодиагностики могут передаваться в микроконтроллер.

Мостовые схемы управления электродвигателями

Контроллеры силового оборудования автомобиля, прежде всего с помощью мостовых схем, управляют электродвигателями постоянного тока, которые регулируют положение дросселей и клапанов, расположенных во впускных коллекторах бензиновых двигателей, или клапанов системы рециркуляции выхлопных газов дизельных двигателей. Современные мостовые драйверы (например, TLE 6209 Infineon) поддерживают все функции, необходимые для управления электродвигателями постоянного тока. Сигнал управления представляет собой ШИМ-последовательность с тактовой частотой свыше 20 кГц. Наличие встроенной логики позволяет точно управлять

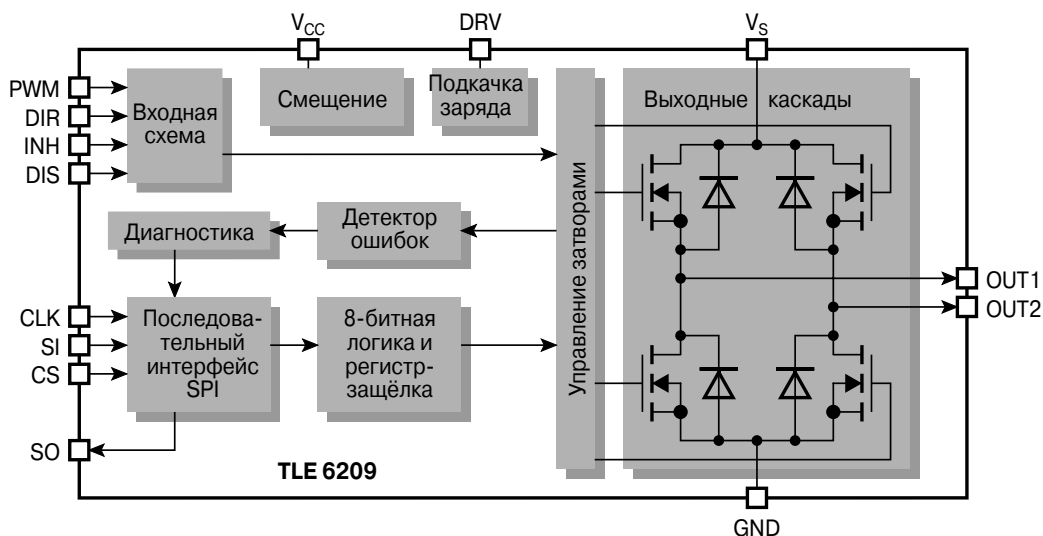


Рис. 9.35. TLE 6209 — мостовая схема, используемая в электронных системах управления дроссельной заслонкой (e-gas).

данной мостовой схемой (H-мост), а также реализовать в ней функции защиты и самодиагностики (Рис. 9.35).

Данные самодиагностики и сообщения об ошибках, например о коротком замыкании, могут быть переданы в микроконтроллер через встроенный последовательный интерфейс. Система трёхступенчатого (оповещение, предупреждение и отключение) температурного мониторинга относится к функциям безопасности, обеспечивающим нормальную работу дроссельной заслонки.

MOSFET и IGBT

В настоящее время полевые транзисторы (MOSFET) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) производятся в широком ассортименте, что позволяет осуществлять выбор этих приборов в соответствии с требованиями конкретного применения. В основном, они используются в бензиновых или дизельных двигателях для управления форсунками, топливными насосами, электромагнитными клапанами в системах управления автоматической коробкой передач.

Мощные IGBT идеально подходят для систем управления зажиганием, работающих в экстремальных условиях (высокие температуры, вибрации, электромагнитные помехи). Преимущества IGBT заключаются в возможности управления ими с помощью сигналов логических уровней, в малом напряжении насыщения, наличии

встроенной защиты от электростатического разряда и активной схемы ограничения сигнала (на стабилитронах). Современные системы управления зажиганием должны удовлетворять всем перечисленным выше требованиям, а также поддерживать целый ряд дополнительных диагностических и защитных функций. Это реализовано в новом семействе SMART IGBT, которое базируется на технологии chip-on-chip (кристалл на кристалле) (см. Рис. 9.36). Кристалл IGBT используется в качестве основания, на котором располагается вспомогательный кристалл, выполненный по технологии BCD и обеспечивающий выполнение таких функций, как ограничение тока нагрузки, измерение уровней тока и напряжения или программное отключение драйвера.

Другой перспективной областью применения приборов IGBT является управление пьезоэлектрическими форсунками системы впрыска топлива. Уже сегодня компания Infineon предлагает потребителям IGBT с малым временем переключения, так называемые быстрые IGBT (Fast IGBT).

Применение приборов семейства Infineon PROFET™ для работы с большими токовыми нагрузками (до 1000 А) позволяет кардинально упростить схемотехнику и повысить производительность систем управления трансмиссией автомобиля. В отличие от устаревших устройств, в которых задействованы электромагнитные реле, ИС семейства PROFET™ обеспечивают поддержку многих защитных и диагностических функций, та-

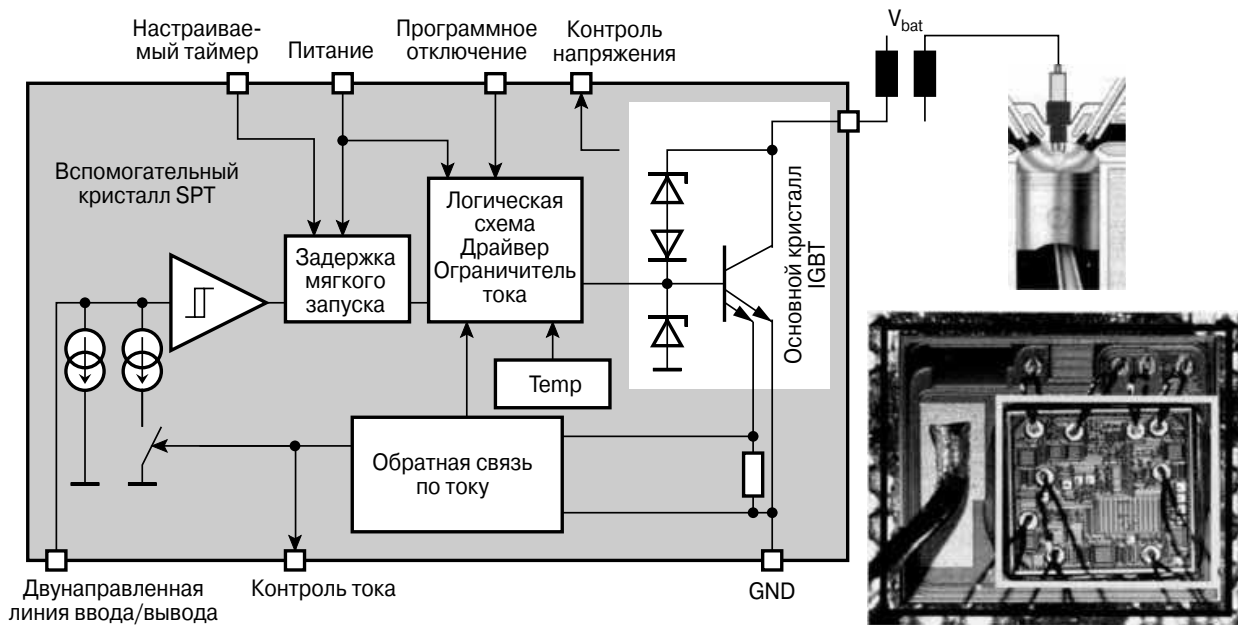


Рис. 9.36. IGBT с вспомогательным кристаллом для защитно-диагностических функций.

ких как ограничение тока нагрузки, защита от перенапряжений и перегрева, детектирование обрыва цепи, а также измерение тока. Как правило, эти приборы применяются в схемах управления стартером двигателя, вентилятором радиатора охлаждения, насосами высокого давления и запальными свечами в дизельных двигателях.

Трансиверы

Трансиверы (приёмопередатчики) предназначены для передачи сигналов от микроконтроллера по бортовым коммуникационным линиям автомобиля. Для систем управления трансмиссией стандартным является высокоскоростной протокол CAN. Компания Infineon производит ИС высокоскоростного трансивера шины CAN (TLE 6250G), который обладает наилучшими характеристиками с точки зрения электромагнитной совместимости. Кроме того, данная ИС поддерживает ряд функций, обеспечивающих бесперебойную передачу данных между контроллерами различных типов.

Устройства электропитания

Архитектура устройств, предназначенных для электропитания автомобильных полупроводниковых приборов, кардинально отличается от традиционной архитектуры линейных стабилизаторов напряжения. Если ещё в недавнем прошлом вполне до-

статочно было использовать отдельные линейные стабилизаторы для каждого напряжения питания, то в настоящее время чаще всего необходимо иметь блок питания с несколькими выходными напряжениями. Такие устройства позволяют оперировать меньшими рабочими напряжениями, обеспечивают больший выходной ток и удовлетворяют специальным требованиям к длительности переходных процессов при включении и выключении.

Исходя из этого, компания Infineon разработала новый тип ИС, предназначенный для систем питания. Микросхема содержит импульсный понижающий (buck) преобразователь, с выхода которого предварительно стабилизированное напряжение поступает на три линейных стабилизатора с малым падением напряжения. Подобная концепция импульсно-линейного стабилизатора напряжения обеспечивает значительно более высокую, по сравнению с традиционной архитектурой, эффективность. Так, если речь идёт о построении 12-вольтовой системы электропитания трансмиссии автомобиля с током потребления более 1 А, то преимущества новой концепции уже очевидны; в будущем же, при переходе автомобильных систем электропитания на напряжение 42 В, она и вовсе не будет иметь альтернативы. Поэтому в дополнение к широкому ассортименту интегральных линейных стабилизаторов напряжения компания

Infineon выпустила ИС TLE 6361 — источник питания, построенный по описанному принципу (см. главу 3).

Микроконтроллеры в системах управления трансмиссией автомобиля

Микроконтроллеры играют определяющую роль в работе автомобильных систем управления, особенно когда речь идёт о снижении расхода топлива и уровня токсичности выхлопных газов (Рис. 9.37).

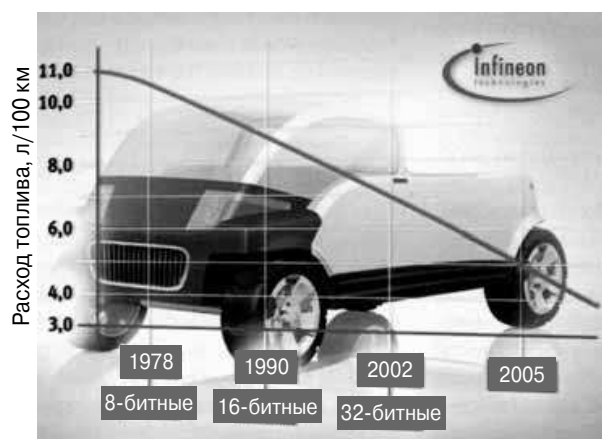


Рис. 9.37. Снижение расхода топлива и хронология развития микроконтроллерных архитектур, используемых в автомобилях.

Для того чтобы гарантировать точность управления двигателем и трансмиссией автомобиля, вычисление сложных алгоритмов необходимо осуществлять в режиме реального времени. При этом производительность вычислительной системы определяется не только производительностью процессора, но и системной архитектурой в целом. Последняя должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечивать работу в условиях агрессивной окружающей среды моторного отсека автомобиля.

8-битная архитектура

8-битные микроконтроллеры (такие как C505) в настоящее время используются в основном в базовых моделях автомашин, а также в такой постепенно обретающей популярность сфере, как системы управления двигателями мотоциклов. Однако по мере того как электрические двигатели завоёвывают всё более прочные позиции в моторных отсеках современных автомобилей, область применения 8-битных микроконт-

роллеров расширяется. Компания Infineon выпустила на рынок новый микроконтроллер C868, специально предназначенный для управления электродвигателями, которые будут использоваться, например, в турбокомпрессорах дизельных двигателей.

16-битная архитектура

Несмотря на то что экспансия 32-битных микроконтроллеров на рынок автомобильной электроники неуклонно возрастает, 16-битные микроконтроллеры по-прежнему применяются очень широко. Так, 16-битное семейство C167, специально спроектированное, чтобы получить высокую производительность, требуемую для построения встроенных систем управления, и при этом обеспечить возможность работы в режиме реального времени, сегодня воспринимается как промышленный стандарт для контроллеров трансмиссии автомобиля. Секрет успеха семейства C167 заключается в функциональности периферийных устройств, идеально адаптированных для использования в данной области.

Так, помимо асинхронного, синхронного и CAN-интерфейса, микроконтроллеры семейства C167 поддерживают целый ряд специальных периферийных функций, наличие которых позволяет повысить производительность устройств управления трансмиссией.

Процессорное ядро C166v2, представляющее собой усовершенствованное процессорное ядро C166, обеспечивает удвоенную скорость вычислений за счёт использования алгоритма синхронного выполнения команд. Благодаря наличию встроенного высокоэффективного модуля умножения с накоплением (MAC) резко возросла производительность при выполнении операций цифровой обработки сигналов. Микроконтроллеры, построенные на новом процессорном ядре (например, XC164), в настоящее время всё шире используются в электронных системах управления турбонаддувом, в стартерах и контроллерах автоматической коробки передач.

32-битная архитектура

В настоящее время наиболее производительные микроконтроллеры построены на базе 32-битных ядер. Некоторые из них непосредственно, без каких-либо изменений,

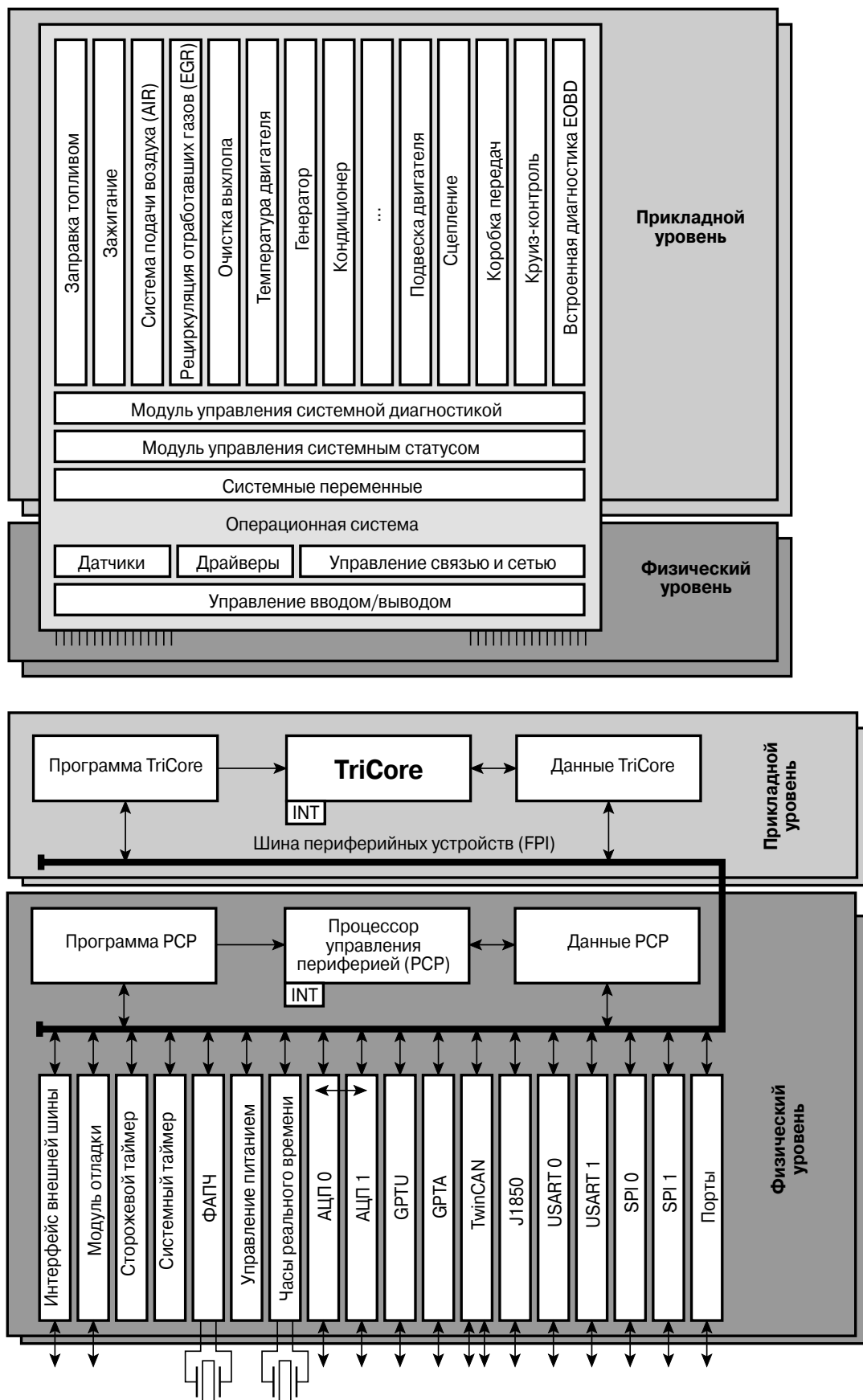


Рис. 9.38. Программная модель микроконтроллера, построенного на базе архитектуры AUDO с использованием операционной системы OSEK.

заимствуют микропроцессорную архитектуру. Другие же (например, Infineon TriCore), напротив, специально разработаны для встроенных систем управления с возможностью работы в режиме реального времени и потому идеально подходят для использования в трансмиссии автомобиля. Микроконтроллеры семейства AUDO построены на базе ядра TriCore и включают в себя ряд специализированных периферийных устройств, предназначенных для применения в системах управления трансмиссией автомобиля.

Ядро TriCore выполнено по RISC-архитектуре и содержит специальные команды, предназначенные для выполнения основных DSP-операций, что повышает эффективность анализа сигналов. Развитая система прерываний обеспечивает малое время реакции микроконтроллера на внешние события в сочетании с необходимым уровнем гибкости в принятии решений. Поддерживаются как 32-битный, так и 16-битный форматы команд. За счёт этого уменьшается объём программного кода и повышается пропускная способность системной шины при его передаче, что, в свою очередь, позволяет обойтись меньшим объёмом памяти программ и снизить общую стоимость устройства.

Не менее важным элементом архитектуры микроконтроллеров семейства AUDO является процессор управления периферией (PCP). Он полностью берёт на себя обслуживание программных драйверов периферийных устройств, благодаря чему основное ЦПУ ядра TriCore освобождается для работы исключительно с прикладными программами. Взаимосвязь программных модулей осуществляется путём использования стандартной операционной системы, например OSEK (Рис. 9.38).

Так называемая матрица таймеров общего назначения (GPTA) используется как для выполнения автономных операций, так и с целью программной реализации сложных функций (путём комбинации нескольких элементарных, как это показано на Рис. 9.39). Таким образом, данная архитектура позволяет на уровне пользовательских программ реализовывать такие функции, как управление впрыском топлива, системами зажигания (с контролем детонации) или управление системой обходного впуска воздуха в выпускной коллектор (air-bypass).

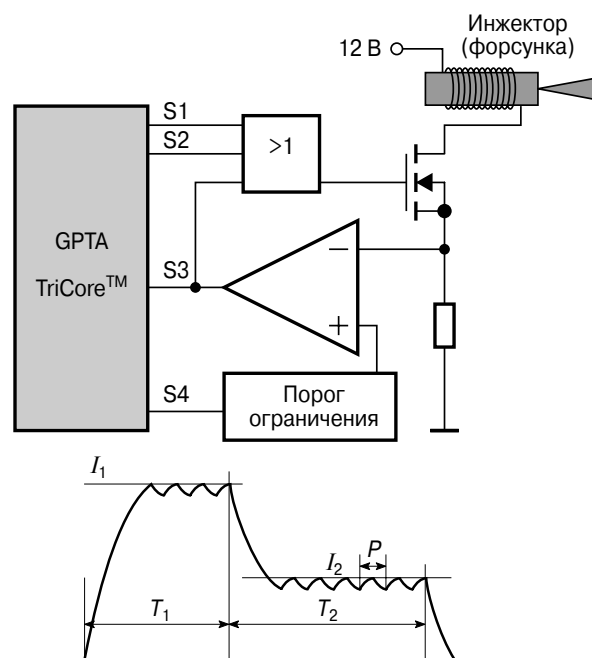


Рис. 9.39. Схема применения модуля GPTA для организации управления форсункой впрыска и генерируемый модулем сигнал «пик-и-удержание».

Встроенный в микроконтроллеры семейства AUDO модуль АЦП также частично разгружает центральный процессор, реализуя в автономном режиме такие функции, как обнаружение коротких замыканий или обрыва соединительных проводников.

В настоящее время архитектура AUDO представлена на рынке двумя микроконтроллерами: TC1765 и TC1775. В процессе разработки находятся и микроконтроллеры нового поколения (AUDO NG) TC1766 и TC1796, которые будут иметь до 2 Мбайт встроенной флэш-памяти и модуль TTCAN (интерфейс CAN с временным разделением). Это позволит снизить стоимость систем управления трансмиссией (например, электромагнитными клапанами), построенных на базе новых микроконтроллеров AUDO NG.

Более подробная информация о микроконтроллерах содержится в соответствующих главах данной книги.

9.4.3. Перспективы развития систем управления трансмиссией автомобиля

Характеристики перспективных контроллеров для управления трансмиссией автомобилей будут определяться как возрас-

тающими требованиями к их мощности, так и необходимостью снижения стоимости. Уже сегодня компания Infineon готова предложить потребителям готовые наборы микросхем (чипсеты), а в будущем — осуществить их оптимизацию с точки зрения уменьшения цены и повышения системной производительности.

Одной из причин подобного оптимизма является тот факт, что с увеличением плотности элементов (за счёт совершенствования технологий) появляются дополнительные возможности интеграции логических функций управления в силовые полупроводниковые приборы. Другая причина заключается в том, что использование технологии БиКМОП предоставляет ещё больше возможностей по интеграции непосредственно в сенсорные ИС разнообразных функций цифровой обработки и передачи сигналов. Кроме того, могут быть реализованы и многокристальные решения, связанные с использованием технологий *chip-by-chip* (кристалл рядом с кристаллом) или *chip-on-chip* (кристалл на кристалле), например интеллектуальные модули IGBT.

Итак, перспективные полупроводниковые устройства должны удовлетворять требованиям качества, надёжности, производительности и иметь приемлемую стоимость. За счёт более широкого внедрения интеллектуальных функций вполне можно достичь оптимального соотношения стоимости и производительности полупроводниковых систем управления трансмиссией, однако эта задача потребует тесной кооперации полупроводниковой и автомобильной промышленности.

9.5. Электроника для автомобильных информационно-развлекательных систем

В сфере автомобильной электроники термин «информационно-развлекательные системы» традиционно относится к устройствам, предназначенным для визуального вывода информации о функционировании автомобиля, либо для развлечения пассажиров. Такие системы, помимо устройств отображения, расположенных в приборной панели, включают в себя встроенное аудио, а также более современные и быстро развивающиеся телематические, навигационные и мультимедийные приложения.

Несмотря на то что многие из этих приложений, особенно в сфере телематики, навигации и мультимедиа, строятся на базе систем бытовой электроники, они, тем не менее, интегрированы в конструкцию автомобиля, поэтому требования к качеству их исполнения должны отвечать требованиям, предъявляемым к автомобильной электронике.

9.5.1. Приборная панель

Приборная панель представляет собой основное контрольно-измерительное оборудование автомобиля, на ней расположены механические, электромеханические или электронные индикаторы, отображающие специфические данные о состоянии автомобиля, например о его скорости или количестве оборотов двигателя. Вспомогательное контрольно-измерительное оборудование включает в себя такие устройства, как, например, путевой компьютер.

Если в прошлом в приборной панели использовались исключительно механические измерительные приборы и устройства управления, сопряжение которых с соответствующими узлами автомобиля осуществлялось с помощью механических приводов, то ныне применяются 8- и 16-битные (а в последнее время всё больше 32-битные) микроконтроллеры, осуществляющие ШИМ-управление шаговыми электродвигателями тех или иных исполнительных устройств. Эти микроконтроллеры имеют встроенные драйверы для вывода информации на индикатор (дисплей).

9.5.2. Автомобильные аудиосистемы

К автомобильным аудиосистемам относятся готовые музыкальные центры и отдельные составляющие этих систем: простые АМ/FM-радиоприёмники, усилители, кассетные магнитолы и гораздо более распространённые сегодня CD- и DVD-магнитолы, как правило, с поддержкой формата MP3.

Стандартные функции тюнера (такие, как поддержка RDS) позволяют принимать информацию о радиостанции и о передаваемой программе, а также производить точную настройку на выбранный канал. Служба ТМС-сервиса обеспечивает передачу информации о дорожной обстановке в стандартизованном формате. Эта информация используется также навигационной систе-

мой автомобиля при определении наиболее выгодного маршрута движения.

Многие автомобильные аудиосистемы содержат сразу два тюнера с поддержкой функции RDS. Пока один из них используется для воспроизведения сигнала выбранной радиостанции, второй сканирует эфир в поиске частот более уверенного приёма этой же радиостанции, благодаря чему в любой момент времени гарантируется наилучшее качество принимаемого сигнала.

В последнее время получили распространение новые системные архитектуры, функциональная гибкость которых обеспечивается программными средствами. В связи с этим к процессорам, применяемым в автомобильных аудиосистемах, предъявляются определённые требования: они должны не только работать в качестве микроконтроллеров, управляющих аудиосистемой, но и обеспечивать функции DSP (цифровой обработки аудиосигналов), чтобы можно было реализовать, например, цифровой эквалайзер или поддержку формата MP3. Кроме того, часто требуется иметь такие дополнительные функции, как голосовое управление или голосовое оповещение, встроенную поддержку Bluetooth, а также режима hands-free (хэндс-фри) для мобильной связи, и т.д.

9.5.3. Системы телематики

Телематические системы представляют собой относительно новый класс информационно-развлекательных приложений. Они используют канал мобильной связи (в Европе это чаще всего модуль GSM/GPRS, а в США — модуль CDMA/AMPS) для обеспечения стандартных услуг связи и дополнительных функций, зависящих от конкретной модели автомобиля (Рис. 9.40). Сюда относятся вызов аварийных служб (например, после срабатывания подушки безопасности), режим удалённой диагностики автомобиля с целью обнаружения неисправностей, удалённое техобслуживание, информационные услуги, основанные на определении текущего местоположения абонента (LBS — Location Based Services, POI — Point of Interest Services), а также всем привычный мобильный телефон.

Основная проблема при построении аппаратной части телематических систем заключается в необходимости системной оптимизации, а также в обеспечении рентабельности конечных устройств, предназначенных для массового применения в автомобилях.

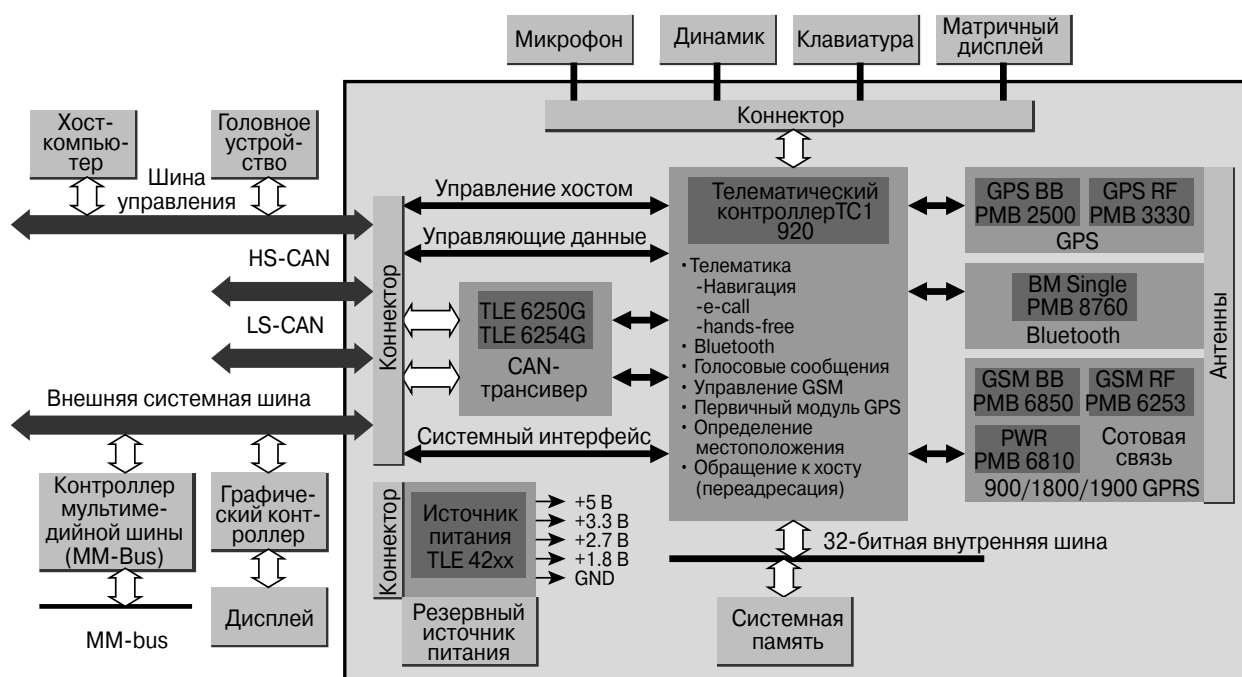


Рис. 9.40. Пример организации телематической системы на платформе полупроводниковых компонентов Infineon высокой степени интеграции.

Существенными преимуществами при использовании в этих и других информационно-развлекательных приложениях обладает процессорная архитектура TriCore, которая уже получила широкое распространение в автомобильной электронике. Данная архитектура сочетает в одном ядре функциональные возможности архитектур CISC, RISC и DSP, что позволяет проектировать различные устройства в рамках единой среды разработки. Построенные на данном ядре системы на кристалле для телематических приложений сочетают в себе микропроцессор, управляющий работой этих приложений, и специальные пользовательские функции, оптимизированные с целью управления соответствующими периферийными устройствами.

Ещё одним важным элементом телематических систем является модуль приёмника GPS. Использование сигналов от этого модуля в совокупности с другими сигналами от встроенных в автомобиль датчиков или телематических систем (например, от датчика направления движения) позволяет определить текущее местонахождение автомобиля.

Для того чтобы обеспечить поддержку тех или иных услуг, специфических для конкретных моделей автомобилей, телематические системы должны подключаться к бортовой сети управления через шины обмена данными. В Европе чаще всего используется шина CAN, а в США — шина J1850.

9.5.4. Навигационные автомобильные системы

Существует два основных класса навигационных систем, отличающихся друг от друга, главным образом, способом хранения картографических данных. В бортовых (on-board) автомобильных навигаторах географические данные размещены на CD- или DVD-дисках и с помощью соответствующих драйверов в любой момент могут быть загружены непосредственно в локальное устройство навигатора.

В автономных устройствах картографические данные хранятся на удалённом сервере поставщика услуг (провайдера), а автомобильный навигатор обращается к ним по мобильной сети (например, с помощью модуля GPS/GPRS). Благодаря тому, что данные предварительно обрабатываются высокопроизводительным удалённым сервером,

можно существенно снизить требования к вычислительным ресурсам самого навигатора и, следовательно, его стоимость. К этому же классу навигационных систем примыкают и так называемые Интернет-радиостанции, которые предоставляют доступ к навигационным данным через Интернет в режиме онлайн.

Гибридные навигационные системы представляют собой комбинированные устройства, сочетающие оба описанных выше метода с целью получения наиболее свежей картографической и дорожной информации при минимальной загрузке каналов связи. С этой точки зрения полезным оказывается использование таких услуг, как ТМС, которые передают в автомобильный навигатор информацию о дорожной обстановке, позволяющую выработать оптимальный маршрут движения.

Как и в случае телематических систем, ключевым моментом навигационных систем является определение местоположения транспортного средства с помощью GPS-приёмника. Методы определения местоположения в ближайшей перспективе будут совершенствоваться за счёт использования алгоритмов навигационного счисления совместно с подсчётом импульсов тахометра, а также с применением гироскопических угловых датчиков. Алгоритмы картографической привязки позволят синхронизировать картографические данные с реальным местоположением автомобиля. Для расчёта маршрута и определения местоположения потребуются высокопроизводительные навигационные компьютеры.

Навигационные системы, как правило, используют средства связи, входящие в инфраструктуру автомобильных телематических систем, или же, напротив, телематические функции могут быть интегрированы в состав самой навигационной системы.

Передача данных в подобных системах осуществляется по высокоскоростным шинам на основе пластикового оптоволокна (POF). Эти шины (например, MOST — Media Oriented System Transport) специально разработаны для автомобильных приложений и способны обеспечить скорость передачи данных до 24.8 Мбит/с. Они имеют кольцевую структуру и могут, например, обеспечивать связь CD-чейнджера с навигационной системой.

9.5.5. Автомобильные мультимедийные системы

Мультимедийная система сочетает аудиосистему высшего класса, навигационную систему и развлекательное устройство. Помимо ТВ приёмника и DVD-плеера, такая система может включать встроенную игровую консоль, иногда использующую дисплей, встроенный в подголовник переднего сиденья.

Мультимедийные системы обычно построены на базе высокопроизводительных процессорных платформ, обеспечивающих хорошие графические возможности.

9.5.6. Технологии совместного использования

GPS (глобальная система определения местоположения)

Приёмники GPS широко используются для определения текущих координат транспортного средства. Эти устройства способны одновременно осуществлять поиск и отслеживать положение от 8 до 16 спутников.

Задача определения координат является высокоприоритетной (прерывания для обращения к подпрограмме поиска и вычисления осуществляются через каждые 1 и 20 мс соответственно), в GPS-приёмнике используется 32-битный контроллер и соответствующая память. В автономных GPS-системах микроконтроллер интегрирован непосредственно в базовую ИС приёмника, а требуемый объём памяти наращивается за счёт внешних микросхем (Рис. 9.41).

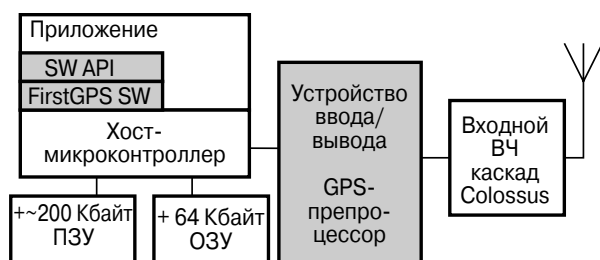


Рис. 9.41. Пример автономного GPS-приёмника.

Ещё более перспективными, особенно в случае массового производства, являются так называемые централизованные (host-based) GPS-архитектуры. Примером подобного ре-

шения служит концепция FirstGPS, разработанная совместно компаниями Infineon и Trimble. Эта концепция подразумевает, что все функции реального времени реализуются аппаратно в составе базовой ИС, в то время как выполнение менее критичных по скорости функций берёт на себя хост-контроллер, например процессор навигационной системы. Программная реализация данных функций требует не слишком большой дополнительной загрузки хост-контроллера (не более 4 MIPS¹⁾), который при этом может использовать доступные ему большие ресурсы памяти, что позволяет уменьшить количество внешних компонентов, требующихся для построения GPS-приёмника. В рамках рассматриваемой концепции возможно также распределение ресурсов для совместной работы с 32-битным микроконтроллером, интегрированным в базовую ИС автономной GPS-архитектуры.

Bluetooth

С ростом популярности пользовательских устройств, в которых применяется Bluetooth (к таковым можно отнести ноутбуки, КПК, мобильные телефоны и т.п.), и связанным с этим расширением сферы его применения, необходимость поддержки Bluetooth в автомобильных приложениях становится всё более очевидной. Bluetooth обеспечивает стандартизированный интерфейс для пользовательских устройств различных производителей и позволяет обеспечить сопряжение относительно долгоживущих информационно-развлекательных систем и недолговечных пользовательских устройств.

Bluetooth часто реализуется в виде функциональных модулей, построенных на базе современных ИС. Эти Bluetooth-микросхемы разработаны для продукции массового производства, рассчитанной на небольшой срок службы (1...2 года). С другой стороны, современные полупроводниковые технологии позволяют создавать микросхемы со встроенным ВЧ трактом и схемой обработки сигнала в основной полосе частот (BaseBand) (Рис. 9.42). Такие ИС требуют минимального количества внешних компонентов и удовлетворяют более жёстким (автомобильным) требованиям к диапазону рабочих температур.

¹⁾ Million Instructions Per Second (миллионов операций в секунду) — наиболее употребительная единица измерения производительности процессоров. — *Примеч. пер.*

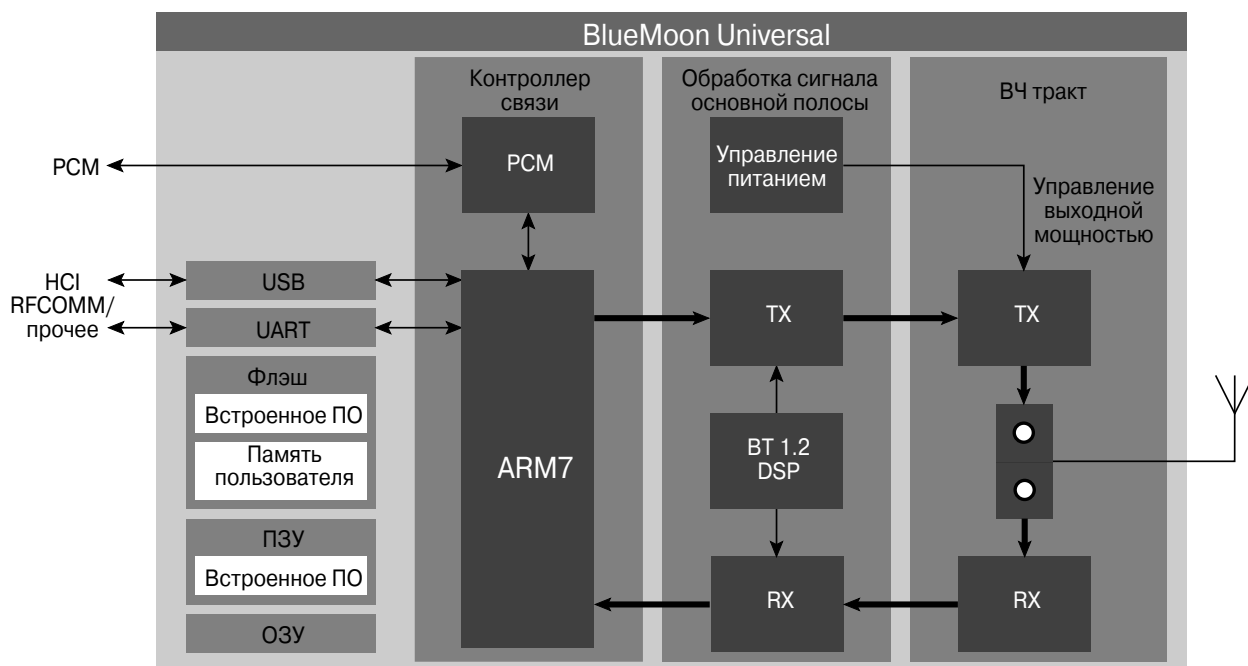


Рис. 9.42. Структурная схема однокристалльной Bluetooth ИС высокой степени интеграции BlueMoon Universal (PMB 8754) со схемой обработки сигнала основной полосы и встроенным ВЧ трактом.

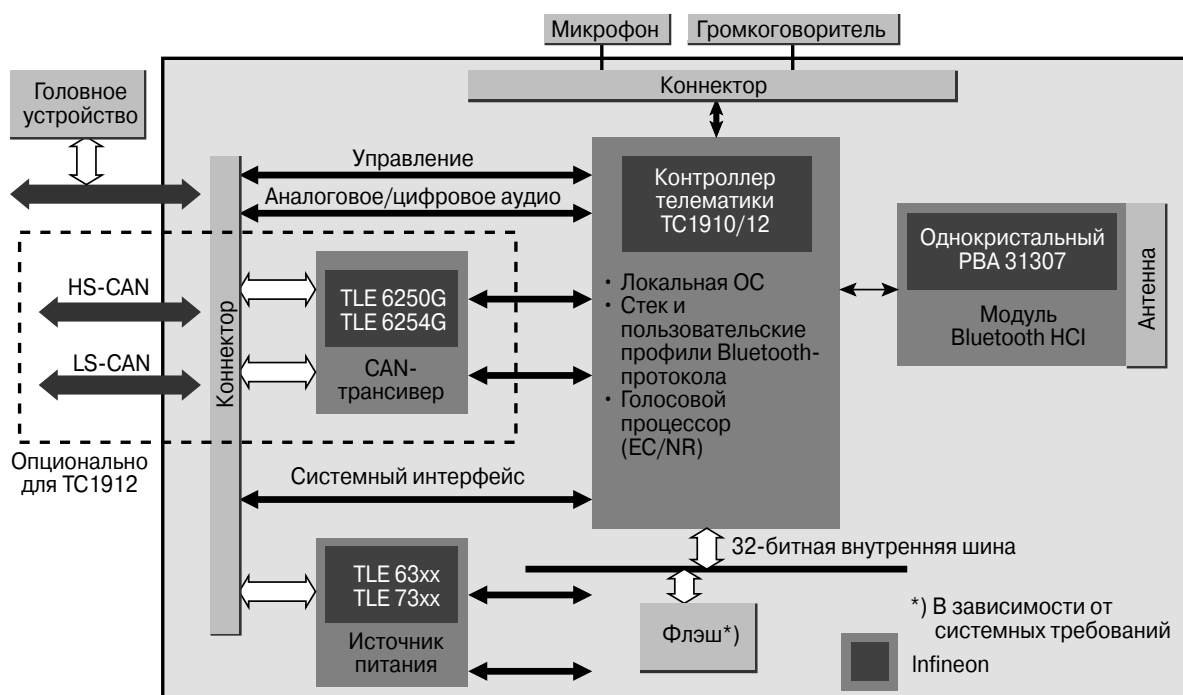


Рис. 9.43. Интеграция Bluetooth в состав информационно-развлекательной автомобильной системы.

Наличие сертифицированных Bluetooth-модулей — всего лишь полдела. Не меньше внимания следует уделить программному обеспечению Bluetooth.

Профили и наборы протоколов Bluetooth следует задавать с учётом различных ситуаций, которые могут возникнуть при работе конкретных приложений. Для того чтобы

обеспечить согласование со стандартом Bluetooth, системный интегратор должен гарантировать соответствие базовых профилей требованиям других систем.

В стандарт Bluetooth входят разработанные специально для применения в автомобильных устройствах прикладные профили (подобно тому, как это сделано и для других об-

ластей применения Bluetooth). К ним относятся профили, предназначенные для поддержки функции громкоговорящей связи (hands-free) в мобильных телефонах, а также профили доступа к SIM-карте и управления мобильным телефоном, реализующие расширенные телефонные функции (Рис. 9.43).

9.6. Новые 42-В системы электропитания автомобиля

Тема возможного перевода автомобилей на перспективное бортовое напряжение +42 В активно обсуждается на различных международных конференциях, начиная с 1995 года. В настоящее время обозначены практически все основные технические проблемы, связанные с реализацией этой идеи, что открывает возможность создания хоть и предварительных, но вполне «рабочих» и согласованных на международном уровне стандартов для таких систем. Наличие подобных стандартов, в свою очередь, позволяет компаниям-производителям с определённой степенью достоверности определить направление дальнейшего развития автомобильных систем.

Если с технической стороны всё более-менее понятно, то вопрос соотношения затрат и прибылей при переходе на новый стандарт напряжения вызвал острые дискуссии среди автопроизводителей. Первые серийные автомобильные стартер-генераторы на напряжение +42 В были представлены на рынке в 2003 году, а два года спустя появились более сложные устройства на два напряжения 42 и 12 В (для автомобиля Mercedes S-Class). Однако с тех пор реализация многих проектов подобных систем была приостановлена или прекращена.

Несколько ранее, в 2001 году, Toyota уже анонсировала выпуск концепт-кара с универсальной гибридной силовой установкой THS-M (Toyota Hybrid System Mild), которая оборудована 42-вольтовым стартер-генератором, связанным с основным бензиновым двигателем через приводной ремень и способным преобразовывать кинетическую энергию торможения в электрическую энергию, используемую для подзарядки свинцово-кислотных аккумуляторов.

Появление таких машин свидетельствует о том, что времена, когда 42-вольтовые автомобильные системы электропитания получают широкое распространение, уже не за горами.

9.6.1. Уточнение терминов: 12 В и 42 В

В современных устройствах бортового электропитания рабочее напряжение считается равным 12 В. Это значение относится к выходному напряжению ненагруженной (цепь нагрузки разомкнута) свинцово-кислотной аккумуляторной батареи. Именно такие батареи установлены практически в любом автомобиле и состоят из 6 последовательно соединённых ячеек, каждая из которых обеспечивает выходное напряжение 2 В. Процесс зарядки свинцово-кислотных аккумуляторов очень прост: при работающем двигателе внутреннего сгорания на клеммы аккумуляторной батареи подаётся постоянное напряжение. При комнатной температуре данное зарядное напряжение составляет приблизительно 13,8 В. Исходя из этого, бортовую сеть автомобиля можно назвать и 14-вольтовой. Таким образом, когда речь идёт о бортовом напряжении автомобиля, термины 12 В и 14 В относятся к одной и той же системе, но находящейся в двух различных состояниях: питание от аккумулятора (двигатель выключен) или питание от генератора (двигатель работает).

Что же касается термина 42 В, то речь идёт исключительно о величине напряжения бортовой сети транспортного средства при работающем двигателе или, другими словами, о величине зарядного напряжения при комнатной температуре. При выключенном двигателе бортовое напряжение не нормируется. Это сделано специально, чтобы оно не зависело от типа применяемых аккумуляторных батарей. Если спроектировать 42-вольтовый автомобильный источник питания с использованием свинцово-кислотных аккумуляторов, то напряжение холостого хода на них составит приблизительно 36 В, однако для других типов батарей, например никель-кадмиевых, оно будет другим. Тем не менее, независимо от типа применяемых в автомобиле аккумуляторов, можно говорить, что величина рабочего (зарядного) напряжения равна 42 В.

Итак, подведём итог. Для современных систем электропитания автомобилей устоявшимся является термин «напряжение 12 В», поэтому, говоря о старой и новой системах электропитания, употребляют термины 12 В и 42 В соответственно. Однако, исходя из величин зарядных напряжений, эти две системы часто обозначаются

как 14-В и 42-В. Сравнивая величины, мы видим, что они различаются ровно в 3 раза. Термин же «напряжение питания 36 В» в контексте автомобильных систем электропитания употреблять не следует.

9.6.2. Перспективы использования бортовой электросети 42 В (PowerNet) в рамках новых решений и концепций

Основной вопрос, вокруг которого строились и строятся все дискуссии при обсуждении 42-вольтовых систем автомобильного электропитания, — это вопрос: «Зачем они нужны?».

В Табл. 9.5 представлено несколько аргументов в пользу перехода на напряжение 42 В. Во-первых, применение повышенного напряжения позволяет снизить токи нагрузки. Благодаря этому могут быть использованы силовые полупроводниковые компоненты с меньшей площадью кристаллов (т.е. меньших габаритов), а жгуты соединительных проводов можно сделать тоньше и легче. К тому же, повышение напряжения позволит увеличить эффективность бортовых систем генерации, распределения и переключения электроэнергии.

Кроме того, именно благодаря снижению рабочих токов появилась возможность для реализации в автомобилях таких совершенно новых устройств, как управляемые электромагнитные клапаны, электрическая трансмиссия (EVT) или адаптивные гибридные системы со стартер-генератором. При-

менение всех этих новшеств совместно с двигателем внутреннего сгорания с функцией запуска/остановки и малотоксичным выбросом, а также использованием части энергии торможения транспортного средства для подзарядки аккумуляторов обеспечит хорошие предпосылки для снижения среднего уровня вредных выбросов и расхода бензина в автомобиле. По мере дальнейшей электрификации ряда вспомогательных узлов двигателя, которые сегодня являются механическими или механогидравлическими, и оснащения их ориентированными на энергосбережение системами управления, процесс снижения расхода топлива и энергии будет, несомненно, продолжаться.

Всё сказанное относится и к таким системам, как компрессор кондиционера, ABS, топливный или водяной насосы. С другой стороны, весьма перспективной является возможность снижения расхода топлива на 5% и более за счёт оптимизации теплового режима работы двигателя внутреннего сгорания. Ключом к успеху в данном случае вновь является использование вспомогательных электрических устройств, таких как вентилятор охлаждения, а также электрических клапанов вместо классического термостата с хладагентом. Основой для создания подобной системы температурной оптимизации работы двигателя является напряжение питания 42 В.

Напряжение питания 42 В будет применяться, главным образом, в классических

Таблица 9.5. Преимущества системы бортового электропитания автомобиля 42 В

Параметр	Выигрыш
Меньшие рабочие токи	в 3 раза
Снижение стоимости полупроводниковых компонентов	за счёт уменьшения площади кристалла до 20%
Уменьшение поперечного сечения соединительных проводов	выигрыш 6...12 кг по общей массе проводов
Повышение эффективности (генератор, распределение энергии, переключение)	от 40 до 85%
Снижение стоимости за счёт использования новых стандартов (по перенапряжению, переполюсовке и перезаряду аккумулятора, запуску двигателя от внешнего источника (jump-start))	с –12 В до –2 В
Возможность реализации новых перспективных систем силового оборудования	EVT, гибридные двигатели
Снижение расхода топлива и вредных выбросов	запуск/стоп, рекуперация
Возможность электрификации ряда узлов автомобиля	насосы гидравлической системы

автомобилях с двигателями внутреннего сгорания и стартер-генератором; подобные транспортные средства принято называть средними гибридами (mild-hybrid).

На первом этапе напряжение питания 42 В будет использоваться при реализации таких функций, как запуск/останов двигателя и его форсаж, а также для преобразования кинетической энергии торможения автомобиля в энергию аккумуляторов; питание остального электрооборудования автомобиля будет осуществляться напряжением 14 В. В дальнейшем всё электропитание гибридных и классических (только с двига-

телями внутреннего сгорания) транспортных средств будет осуществляться от напряжения 42 В. Потребуется, например, 42-вольтовые контроллеры для электромеханических рулевых и тормозных систем, электроклапанов, дверных модулей, регулируемых сидений, а также для управления осветительным оборудованием, и т.д. Можно предположить, что источники питания 42 В найдут применение и в других, представленных в **Табл. 9.6**, типах транспортных средств, а именно в гибридных автомобилях параллельного или последовательного типов, машинах с двигателем на

Таблица 9.6. Обзор современных типов автомобилей и данные о бортовом напряжении питания

Тип автомобиля	Стандартный	Средний гибрид	Параллельный гибридный	Последовательный гибридный	На водородных топливных элементах	Электро-мобиль
Модель автомобиля	—	Toyota Crown, 2001	Toyota Phus, '97 Honda Insight, '98 Dodge Durango 03	—	DC Necar, 2004 Honda FCX, '03 GM HydroGenl	Honda EV+
Источник энергии	Жидкое топливо	Жидкое топливо + Аккумулятор	Жидкое топливо + Аккумулятор	Жидкое топливо, пропан + Аккумулятор	Водород, метанол, жидкое топливо + Аккумулятор	Аккумулятор
Двигатель внутреннего сгорания	100 кВт	70 кВт	60 кВт	40 кВт	—	—
Электромотор	—	5 кВт	30 кВт	80 кВт	80 кВт	80 кВт
Привод	Двигатель	Двигатель + электропривод + Рекуперация	Двигатель и/или электропривод + Рекуперация	Электропривод + Рекуперация	Электропривод + Рекуперация	Электропривод + Рекуперация
2004 год						
Бортовое питание	14 В, 1.5 кВт	14 В, 1.5 кВт	14 В, 1.5 кВт	14 В, 1.5 кВт	14 В, 1.5 кВт	14 В, 1.5 кВт
Характеристики электропривода	—	42 В, 10 кВт	288 В?, 30 кВт	400 В, 80 кВт	400 В, 80 кВт	400 В, 80 кВт
К 2010 году						
Бортовое питание	(14 В), 42 В, 5 кВт	(14 В), 42 В, 5 кВт	(14 В), 42 В, 5 кВт	(14 В), 42 В, 5 кВт	(14 В), 42 В, 5 кВт	(14 В), 42 В, 5 кВт
Характеристики электропривода	—	42 В, 10 кВт	288 В, 30 кВт	400 В, 80 кВт	400 В, 80 кВт	400 В, 80 кВт

водородных топливных элементах или в электромобилях. В принципе, все эти автомобили должны обладать всеми функциями комфорта и безопасности, которые рассматривались выше в данной главе. Однако мощность электрических двигателей и прочих устройств этих автомобилей превышает 30 кВт, поэтому значения напряжения их бортовой сети выбираются существенно большими, нежели 42 В (обычно они лежат в диапазоне 200...400 В). Наличие отдельного напряжения питания 42 В в данных условиях практически никак не влияет на работу электрооборудования.

Требования по охране окружающей среды, принятые Европейской ассоциацией автопроизводителей (АСЕА), предусматривали поэтапное снижение содержания CO_2 в выхлопных газах новых автомобилей в среднем на 25% (начиная с 186 г/км пробега в 1995 году и вплоть до 140 г/км для автомобилей 2008 года выпуска). К 2012 году предполагается довести этот уровень до 120 г/км. По мнению экспертов, решить эту задачу можно лишь за счёт радикальных мер, например электрификации наиболее энергопотребляющих исполнительных устройств автомобиля и постепенный переход к питанию этих устройств от напряжения 42 В. В США аналогичная программа корпоративных мероприятий по экономии топлива (Corporate Average Fuel Economy — CAFE) действует с 1975 года. На сегодняшний день в рамках данной программы предусмотрены следующие нормы расхода бензина: 27,5 миль/галлон (или 8,5 л/100 км) для новых городских автомобилей, 20,7 миль/галлон (или 8,5 л/100 км) для внедорожников и так называемых паркетников (SUV).

В более отдалённом будущем напряжение 14 В, скорее всего, перестанут использовать в качестве бортового на всех типах автомобилей. Это кажется неминуемым следствием унификации электронного оборудования, которая, в свою очередь, является необходимым условием дальнейшего увеличения объёмов продаж отдельных его компонентов.

Всё сказанное выше можно отнести и к 24-вольтовым системам электропитания, используемым в европейских грузовых автомобилях (в США напряжение в бортовой сети грузовиков составляет 12 В). Начиная приблизительно с 2010 года, стандарт 42 В

будет использоваться в бортовых электросетях практически всех новых автомобилей массового производства.

9.6.3. Силовые полупроводниковые компоненты и напряжение питания 42 В

Силовые полупроводниковые приборы, применяемые в системах электропитания, должны выдерживать рабочие напряжения, значительно превышающие величину напряжения в бортовой сети (12 В в настоящее время). Защита от перенапряжения обычно осуществляется путём использования шунтирующих стабилитронов на напряжения в диапазоне 45...60 В. В случае перехода на бортовое напряжение питания 42 В эти защитные стабилитроны должны быть рассчитаны на напряжения 60...70 В.

В Табл. 9.7 представлены рабочие напряжения, на которые должны быть рассчитаны защитные стабилитроны, используемые в различных автомобильных и промышленных системах электропитания. Например, в промышленных сетях или в 24-вольтовой бортовой сети грузовика нужны стабилитроны на напряжение около 65 В, в то время как для устройств, демпфирующих влияние индуктивной нагрузки, — на 60...80 В.

Как видно из Табл. 9.7, требования, предъявляемые к полупроводниковым компонентам в случае перехода на 42-вольтовый стандарт питания, вполне согласуются с уже существующими приборами, что позволяет внести в эти требования необходимое единообразие.

В верхней части Рис. 9.44 представлены уровни напряжений для стандарта питания 42 В в соответствии с нормативами DIN и ISO. Номинальный рабочий диапазон составляет 30...48 В (среднеквадратичное значение напряжения V_{rms}). С учётом уровня пульсаций, пиковое значение напряжения может превышать 50 В. Кроме того, допустима импульсная перегрузка до 58 В при длительности импульса не более 400 мс.

Минимальные значения так называемого пускового напряжения составляют 18 В при длительности импульса не более 15 мс и 21 В при длительности импульса не более 20 с. Предусматривается, что схема защиты от переплюсовки должна выдерживать кратковременно (не более чем на 100 мс) приложенное отрицательное напряжение –2 В.

Таблица 9.7. Классы напряжений, используемых в различных автомобильных и промышленных устройствах

Область применения	Питание	Напряжение стабилизации, V_{AZ}
12-В автомобильная бортовая электросеть (коммутация питания)	Генератор	> 45...60 В
42-В автомобильная бортовая электросеть (коммутация питания, стартер-генератор)	Генератор	> 60...70 В
24-В бортовая электросеть грузовиков (коммутация питания)	Генератор	> 65 В
80-В локальный источник напряжения (системы непосредственного впрыска топлива)	DC/DC-преобразователь	> 80 В
60...80-В активный ограничитель напряжения на стабилизаторах (быстрое демпфирование при работе с индуктивными нагрузками)	—	> 60...80 В
Промышленные электросети 12 В/24 В/36 В (коммутация питания)	Источник питания	> 65 В

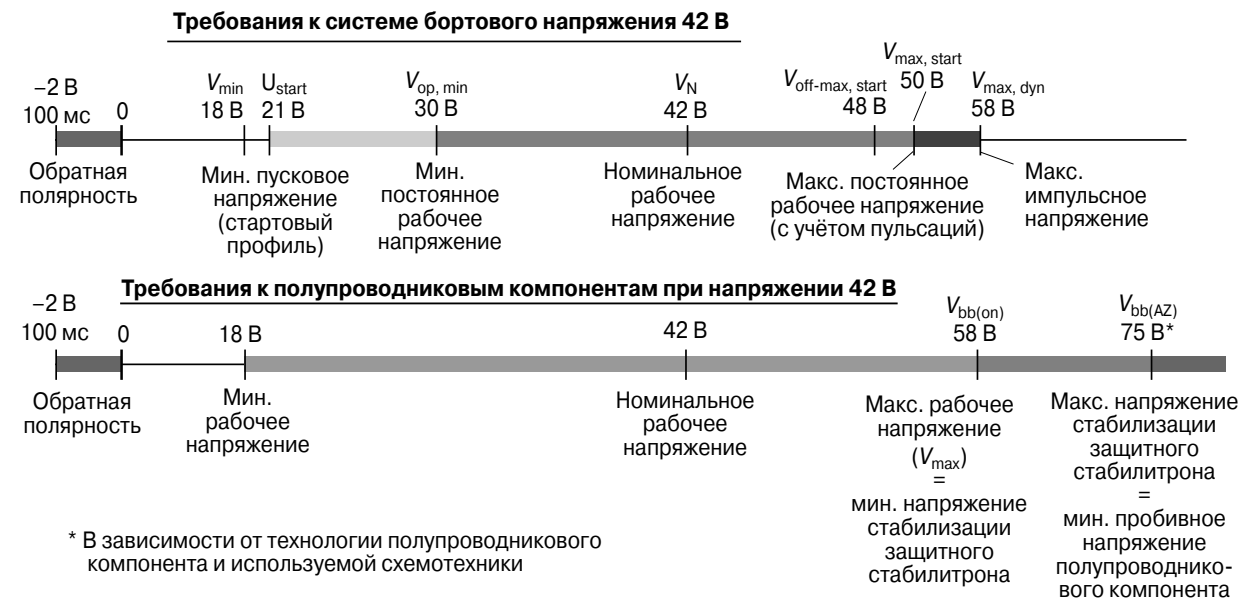


Рис. 9.44. Уровни напряжений и требования к полупроводниковым компонентам при бортовом напряжении 42 В.

Из **Рис. 9.44** видно, что диапазон номинальных рабочих напряжений интеллектуальных полупроводниковых силовых компонентов должен простирается от 18 до 58 В. Кроме того, должны быть предусмотрены защитные механизмы, ограничивающие короткие (микросекундной длительности) импульсы напряжения, амплитуда которых превышает 58 В. Для достижения требуемых характеристик компания Infineon в своих силовых приборах использует различные полупроводниковые технологии, обеспечивающие величину пробивного напряжения в

диапазоне 75...90 В (см. также **Рис. 9.49**). Что касается обратной полярности, то полупроводниковый модуль должен без использования дополнительных защитных цепей выдерживать кратковременную (на период не более 100 мс) подачу на вывод питания отрицательного напряжения –2 В.

Выше уже упоминалось, что снижение рабочих токов позволяет уменьшить площадь кристаллов полупроводниковых компонентов и, соответственно, снизить стоимость этих компонентов.

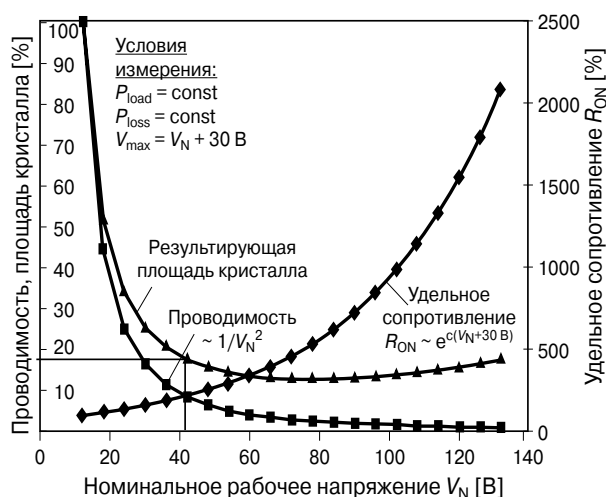


Рис. 9.45. Сокращение площади кристаллов, требующейся для реализации силовых полупроводниковых компонентов, при питании от 42-вольтовой автомобильной бортовой сети (при тех же рабочих условиях, что и в случае питания напряжением 14 В).

На **Рис. 9.45** приведена зависимость площади, занимаемой силовым транзистором на кристалле, от рабочего напряжения при условии, что мощность нагрузки и потери на переключение остаются неизменными. Площадь кристалла пропорциональна произведению проводимости полупроводникового ключа на его удельное сопротивление в открытом состоянии. Величина этого сопротивления зависит не только от приложенного рабочего напряжения, но и от максимально допустимого напряжения с учётом возможных перегрузок. На **Рис. 9.45** предусмотрена возможная перегрузка напряжением 30 В.

С ростом рабочего напряжения площадь силового компонента на кремниевом кристалле сначала резко уменьшается (вследствие повышения проводимости транзисторного ключа), после чего график выходит на пологий участок с небольшим повышением. Тем не менее, при напряжении 42 В требуемая площадь кристалла оказывается в 5 раз меньше, чем при напряжении 14 В.

Таким образом, мощные силовые ключи, работающие в системе бортового электропитания 42 В, могут иметь значительно меньшую площадь кристалла, чем ключи, работающие при тех же условиях в сети 14 В. Эти меньшие по размерам кристаллы могут, соответственно, быть размещены в меньших корпусах (см. **Рис. 9.46**).

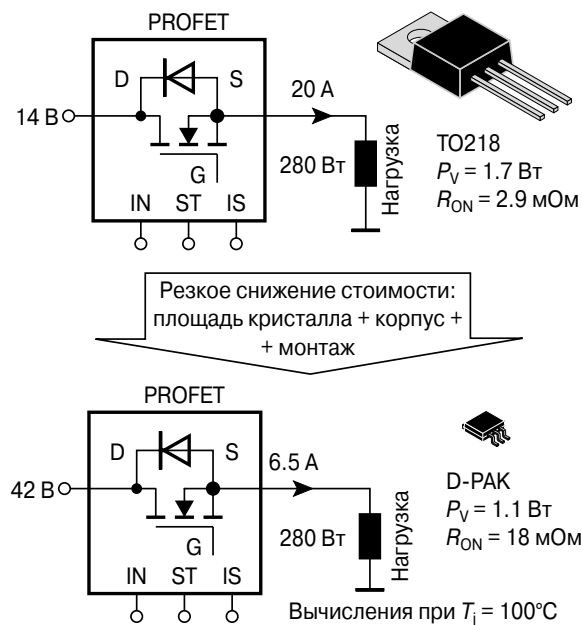


Рис. 9.46. Меньший по размеру кристалл в меньшем корпусе означает меньшую стоимость силового полупроводникового компонента.

На **Рис. 9.46** показаны транзисторные ключи, предназначенные для коммутации нагрузки мощностью 280 Вт (например, электрообогрев заднего стекла автомобиля) при напряжениях питания 14 В и 42 В. При напряжении питания 14 В эту функцию реализует ключ в корпусе TO218, имеющий сопротивление в открытом состоянии 2.9 мОм. При напряжении 42 В вполне достаточно использовать ключ с сопротивлением 18 мОм в миниатюрном корпусе D-PAK, при этом потери мощности оказываются меньше, чем в первом случае. Как нетрудно догадаться, размещение меньшего по размерам полупроводникового кристалла в меньшем корпусе при меньших потерях мощности означает возможность резкого снижения стоимости данного компонента.

На **Рис. 9.47** приведены более подробные данные, необходимые для сравнительной оценки стоимости компонентов в двух вариантах их использования (за 100% взята стоимость компонента при напряжении питания 14 В). Подобная оценка может быть осуществлена двумя различными способами. Если выбрать вариант оптимизации стоимости самого компонента, то при напряжении питания 42 В размер кристалла уменьшится до 20% от исходного (т.е. в 5 раз). При этом уровень потерь мощности в ключе остаётся постоянным, а сопротивление ключа в открытом состоянии возрастает примерно

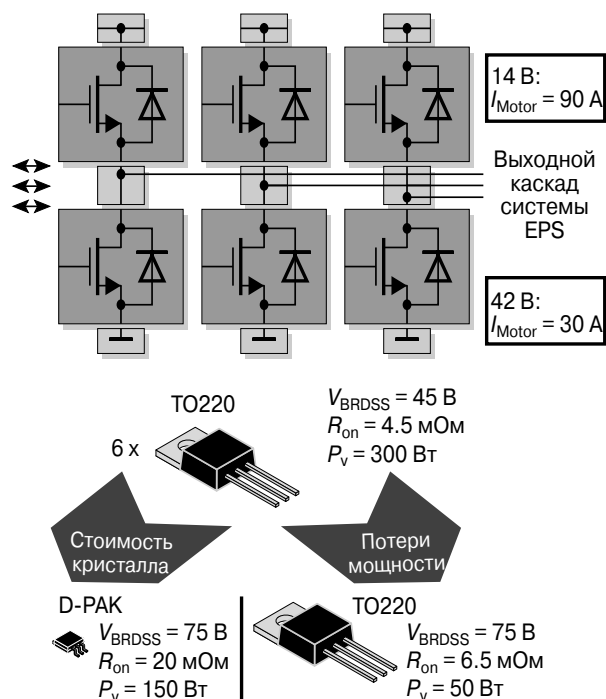


Рис. 9.47. Оценка стоимости полупроводниковых компонентов, применяемых в типичной системе электромеханического рулевого управления EPS.

в 9 раз. Выигрыш достигается за счёт уменьшения стоимости кристалла и корпуса, в котором этот кристалл размещён.

При использовании другого подхода с увеличением рабочего напряжения до 42 В размер кристалла и, в первом приближении, его стоимость остаются без изменений. Это увеличивает сопротивление ключа в открытом

состоянии примерно в 1.4 раза, зато потери мощности уменьшаются до 16% (т.е. в 6 раз). Выигрыш в стоимости здесь достигается за счёт резкого снижения требований к тепловому режиму работы компонента. Таким образом, в любом случае при повышении напряжения питания стоимость компонента снижается либо за счёт меньшей цены кристалла, либо за счёт экономии на теплоотводе. В качестве примера, на Рис. 9.47 приведены параметры мощного ключевого каскада, используемого в электромеханической системе рулевого управления (EPS). Схема, рассчитанная для напряжения питания 14 В, содержит 6 мощных МОП-транзисторов с сопротивлением $R_{ON} = 4.5 \text{ мОм}$ в корпусах TO220 с суммарной мощностью потерь 300 Вт. При напряжении питания 42 В они могут быть заменены либо на 6 транзисторов с $R_{ON} = 6.5 \text{ мОм}$ в корпусах TO220 с суммарной мощностью потерь 50 Вт, либо на 6 малогабаритных транзисторов с $R_{ON} = 20 \text{ мОм}$ в корпусах D-PAK с суммарной мощностью потерь 150 Вт.

На Рис. 9.48 представлены комплексные схемы систем электропитания автомобиля в целом. Очевидно, что при использовании напряжения 42 В выходные каскады могут быть подобраны с точки зрения требований по габаритам и потерям мощности. В то же время все остальные подсистемы, например микроконтроллеры и модули памяти, работающие при напряжении питания 5 В или менее, остаются без изменений.



Рис. 9.48. Изменения в системе электропитания автомобиля при переходе от напряжения 12 В к напряжению 42 В.

Технология	Компоненты	Исполнение	Область применения	Сроки появления на рынке/модель
SPT4/90 $V_{Br} > 90\text{ В}$	Интеллектуальные силовые ИС $V_{AZ} > 80\text{ В}$	Монолитное/ Кристалл на кристалле	Непосредственный впрыск топлива $V_{Nom} = 70/42/24\text{ В}$ Электрооборудование грузовиков Стабилизатор напряжения, CAN, LIN	Разр. TLE customized GDI 8/01 TLE 6389G регул., 15 Вт 12/01 TLE 6372 5 В, 1 А 6/02 TLE 6366 5...15 В, 10 Вт 8/01 TLE 6361 9 выходов
S-SMART/80 $V_{Br} > 80\text{ В}$	Интеллектуальные мощные ключи $V_{AZ} > 65\text{ В}$		ABS/TRC/VDC грузовиков $V_{Nom} = 42/24\text{ В}$ Сильноточные ключи	10/01 BTS 4140N 1 Ом Разр. BSP 752R 200 мОм Разр. BTS 723 2*95 мОм 9/01 BTS 6163D 21 мОм Разр. BTS 660P 9 мОм 7/02 BTS 6166 3.5 мОм 5/02 BTS 4842 HBR 140 мОм
OptiMOS/75 $V_{Br} > 75\text{ В}$	FET/TEMPFET $V_{Br} > 75\text{ В}$		Стартер-генератор $V_{Nom} = 42/24\text{ В}$ Быстродействующая ШИМ DC/DC-преобразователь	1/02 BTS 3408G 2*500 мОм 11/01 BSO 807NS2 2*80 мОм 11/01 SPD 26N08S2L-43 40 мОм 11/01 BTS 3150D 22 мОм Разр. SPP 80N08S2 6.8 мОм 3/01 SIPC 42S2N08 3.8 мОм

Рис. 9.49. Силовые полупроводниковые приборы для работы в 42-вольтовых автомобильных системах электропитания и технологии их производства.

Фактически, потребуется изменить только схему стабилизатора напряжения 5 В. От линейных стабилизаторов напряжения придётся отказаться, поскольку их применение в 42-вольтовых системах связано с большими потерями мощности. Вместо этого применяются импульсные преобразователи, обеспечивающие очевидный выигрыш в КПД (и, соответственно, гораздо меньшие потери мощности), хоть и ценой использования относительно дорогих индуктивностей и дополнительных схем фильтрации выходного напряжения (см. также **Рис. 9.51**). Кроме того, следует учесть, что все входные и выходные каналы связи с внешними датчиками, а также линии передачи данных, например CAN или LIN, должны быть реализованы с учётом защиты от пробоя (и коротких замыканий) напряжением 42 В. Это технически несложно и не оказывает существенного влияния на общую стоимость системы, поскольку модернизации для работы с повышенным напряжением подлежат лишь выходные каскады перечисленных выше устройств. Усовершенствованные под новое рабочее напряжение коммуникационные модули могут, тем не менее, использоваться и в составе ещё оставшихся 12-вольтовых систем.

На **Рис. 9.49** представлены технологии, которые компания Infineon планирует применять при реализации 42-вольтовых автомобильных систем бортового электропитания. МОП-компоненты (MOSFET), вы-

бранные для работы в стартер-генераторах или в DC/DC-преобразователях, выполнены по технологии OptiMOS и имеют напряжение пробоя 75 В. В правой части рисунка перечислены некоторые компоненты Infineon и даты начала их выпуска.

Компания Infineon является первым в мире производителем полупроводниковых компонентов, который уже предлагает потребителям широкий ассортимент продукции, ориентированной на использование в 42-вольтовых сетях.

С другой стороны, уже выпускаются интеллектуальные силовые ключи с напряжением пробоя 80 В, созданные на основе технологии S-Smart. Эта технология вот уже более 10 лет используется при производстве полупроводниковых компонентов для 24-вольтовых устройств электропитания грузовиков.

Наконец, технология SPT4/90V BCD позволяет реализовать устройства с большим набором встроенных функций. Примерами таких устройств могут служить ИС контроллеров систем непосредственного впрыска топлива для бензиновых двигателей, коммуникационные модули и интегральные стабилизаторы напряжения.

С помощью трёх упомянутых базовых технологий можно создавать любые компоненты для 42 В автомобильных систем электропитания. В целях снижения стоимости продукции эти технологии часто комбинируются при создании многокристалльных (кристалл на кристалле) интегральных модулей.

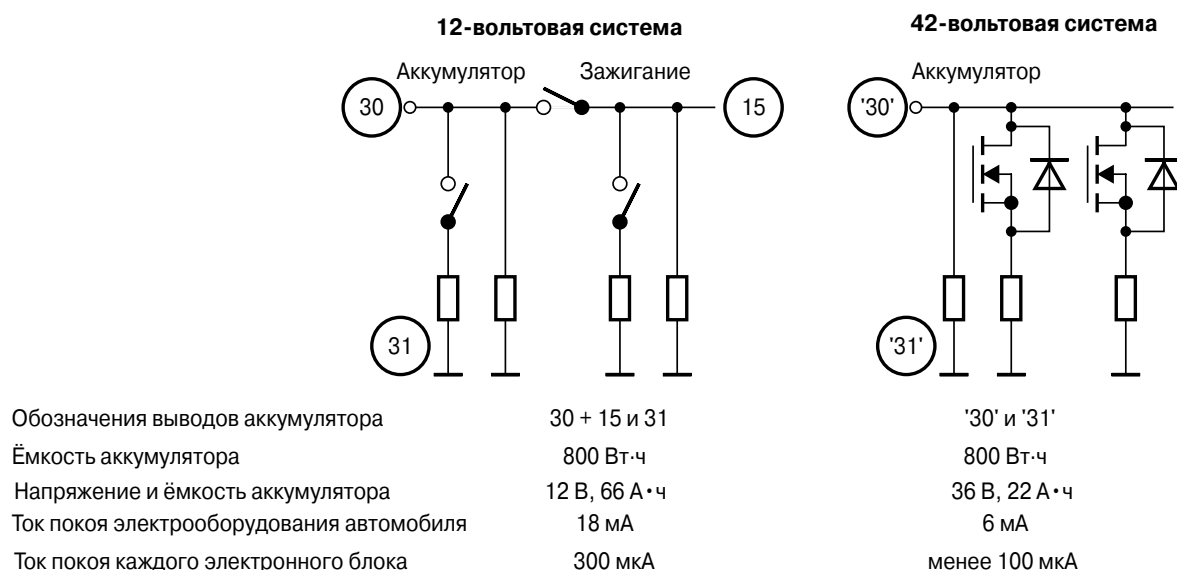


Рис. 9.50. Иллюстрация проблем с токами покоя в 42-вольтовых системах электропитания автомобиля.

Требования по току покоя и питание в 42-вольтовых системах

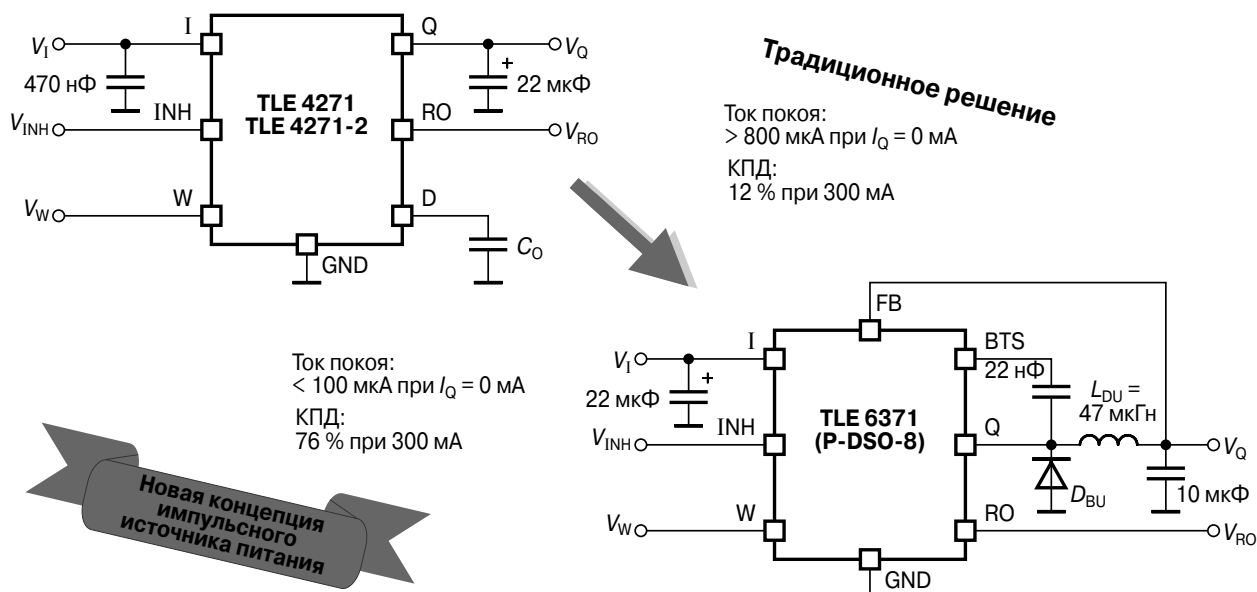
В 12-вольтовых системах электропитания очень важно обеспечить малый ток покоя — ток потребления схем электрооборудования в режиме, когда двигатель транспортного средства выключен. Это гарантирует, что аккумуляторная батарея спустя несколько недель простоя окажется заряженной настолько, что сможет обеспечить запуск двигателя. В 42-вольтовых системах электропитания эта проблема встанет ещё более остро, и тому есть две причины. Во-первых (см. **Рис. 9.50**), будем исходить из того, что в обеих рассматриваемых системах используются аккумуляторные батареи одинаковых габаритов, запасующие одинаковую энергию при полной зарядке до напряжения 14 В и 42 В соответственно. Например, если в 12-вольтовой системе задействован аккумулятор ёмкостью 66 А·ч, то такой же 36-вольтовый¹⁾ аккумулятор будет иметь ёмкость 22 А·ч. Пусть ток покоя электрооборудования автомобиля при напряжении питания 12 В составляет, скажем, 18 мА (примерно 300 мкА на каждый электронный блок). Соответствующие значения для 42-вольтовой системы питания составят 6 мА на весь автомобиль и 100 мкА (или даже значительно меньше) на каждое из его электронных устройств. Таким обра-

зом, требования по току покоя ужесточились в три раза.

Во-вторых, в будущем в составе автомобильного электрооборудования появится ещё больше полупроводниковых ключей с большим энергопотреблением, питающихся непосредственно от аккумуляторной батареи автомобиля (через вывод «30» аккумулятора, изображённого на **Рис. 9.50**). Классическая схема с реле зажигания (через вывод «15» на том же рисунке) используется всё реже и реже, поскольку эта функция реализуется на современной элементной базе с помощью полупроводниковых ключей и соответствующего программного обеспечения. Однако это существенно увеличивает количество электронных устройств, что приводит к росту тока покоя. Другими словами, силовые полупроводниковые компоненты для 42-вольтовых систем должны быть оптимизированы по току покоя. То же самое относится и к интегральным стабилизаторам напряжения. Компания Infineon в качестве решения этой проблемы предлагает использовать целый ряд различных технологических новинок.

Линейные стабилизаторы напряжения едва ли будут использоваться в 42-вольтовых автомобильных системах электропитания, поскольку потери мощности в них оказываются слишком большими. Снижение напряжения питания цифровых схем с

¹⁾ Как уже обсуждалось выше (см. подраздел 9.6.1), величина 36 В относится к номинальному напряжению аккумулятора (в режиме холостого хода); в рабочем же режиме он заряжен до 42 В. — *Примеч. пер.*



5 В до, скажем, 2.5 В, ещё более усугубляет эту проблему. Так, линейный стабилизатор с выходным напряжением 2.5 В и током нагрузки 200 мА при входном напряжении 50 В будет рассеивать 9.5 Вт мощности. Потери мощности в импульсном стабилизаторе при тех же условиях составят приблизительно 200 мВт, что гораздо меньше, чем даже потери в нынешних, 12-вольтовых линейных стабилизаторах. Столь низкий уровень потерь открывает возможности по интеграции стабилизаторов напряжения непосредственно в базовые системные ИС.

Идея создания универсального импульсного стабилизатора напряжения для 42-вольтовых автомобильных систем электропитания, функционально соответствующего популярному интегральному стабилизатору TLE 4271, проиллюстрирована на Рис. 9.51. Особое внимание при проектировании нового прибора уделено минимизации тока покоя, повышению КПД в номинальном режиме работы и снижению уровня помех без существенного удорожания схемы фильтрации.

Подводя некоторый итог, следует подчеркнуть, что импульсные стабилизаторы напряжения в новых 42-вольтовых системах бортового электропитания в общем обеспечивают снижение стоимости полупроводниковых компонентов по сравнению с линейными стабилизаторами напряжения 14-вольтовых систем. Однако могут возник-

нуть дополнительные затраты, связанные с использованием катушек индуктивности и реализацией схем фильтрации выходного напряжения. Во многих случаях эти затраты компенсируются тем, что импульсные источники питания имеют более высокий КПД, меньшие потери мощности и, следовательно, вызывают гораздо меньше проблем с теплоотводом.

Проблема коротких замыканий в комбинированных системах бортового электропитания автомобилей

Одной из наиболее серьёзных проблем в проектировании комбинированных (14 В + 42 В) систем бортового электропитания автомобилей является опасность коротких замыканий (КЗ) между линиями 14 В и 42 В. Немного забегаая вперёд, скажем, что стопроцентного решения этой проблемы с использованием простых методик до сих пор не существует.

Возможные пути возникновения коротких замыканий в подобных системах показаны на Рис. 9.52. Во-первых, теоретически существует вероятность короткого замыкания непосредственно между аккумуляторами (путь А1—Б1) и полностью исключить такую вероятность можно лишь с использованием специальных конструкторских решений. То же самое относится и к возможному короткому замыканию по пути А2—Б2, даже несмотря на то, что интеллектуальный модуль

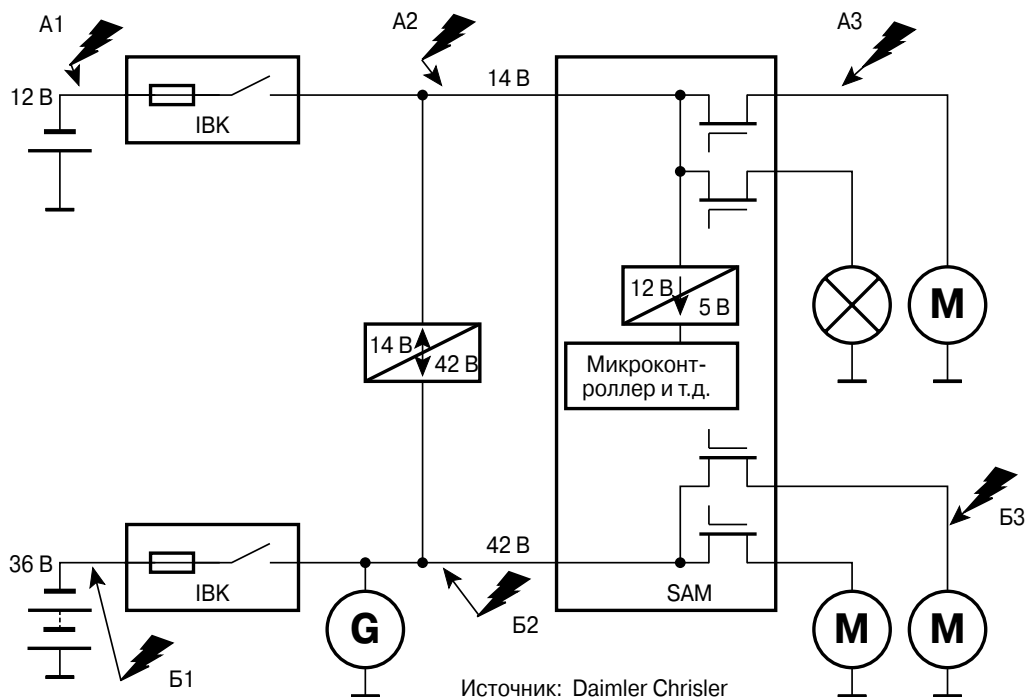


Рис. 9.52. Возможные пути протекания тока в системах с двумя напряжениями питания.

коммутации аккумулятора (IBK) обеспечивает при определённых условиях достаточную защиту от подобных замыканий.

С наибольшей вероятностью короткие замыкания могут возникать на выходах устройств-потребителей электропитания (путь АЗ—БЗ), и на этом уровне необходимо предусмотреть максимально надёжную электрическую защиту. На Рис. 9.53 более подробно представлены возможные сценарии возникновения коротких замыканий. В общем случае, следует различать варианты 1 — высокоомное короткое замыкание между линиями питания 42 В и 14 В с током короткого замыкания, например, 5 А, и 2 — с током короткого замыкания, скажем, 100 А.

В варианте 1 транзисторный 42-вольтовый ключ, рассчитанный на коммутацию токов до 10 А, будет работать в обычном режиме и не среагирует на короткое замыкание. Таким образом, задача детектирования короткого замыкания ложится на контроллер питания 14 В, в то время как источник питания должен без повреждений выдерживать это короткое замыкание до его обнаружения и устранения. Ток короткого замыкания будет протекать в источнике питания 14 В через обратный диод выходного транзистора и далее через плавкий предохранитель на аккумуляторную батарею 14 В. Симптомом наличия короткого замыкания может быть об-

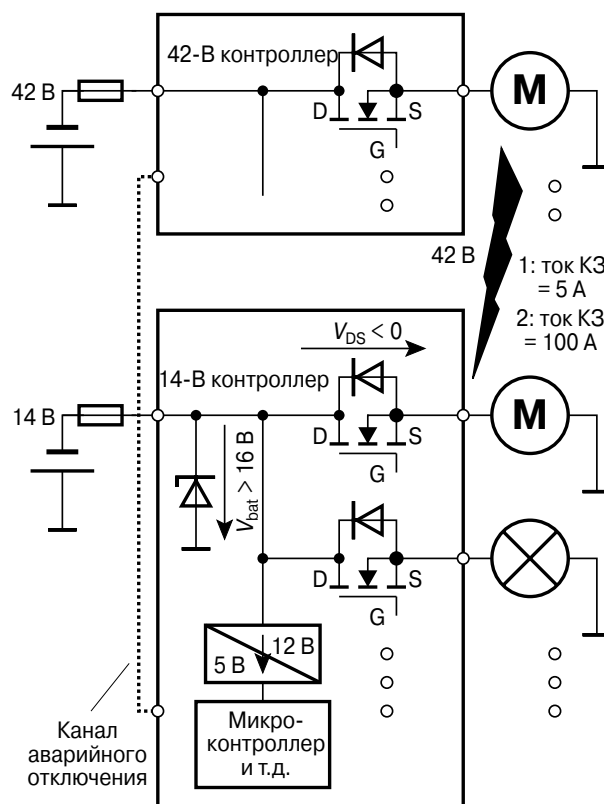


Рис. 9.53. Проблема коротких замыканий между линиями питания 42 В и 12 В и возможные пути её решения.

ратное смещение на выходном транзисторе источника питания 14 В ($V_{DS} < 0$) или превышение выходным напряжением этого источника питания номинального значения (14 В) с последующим его ограничением схемой защиты на стабилитронах (например, на уровне $V_{bat} > 16$ В). После выявления факта короткого замыкания можно отследить ключ в источнике питания 42 В, вызвавший это короткое замыкание, и отключить его. В результате ток короткого замыкания перестает течь. Процесс обнаружения и отключения «виновника» короткого замыкания обычно длится несколько секунд, и в течение этого времени источник питания 14 В должен без повреждений выдерживать протекание тока короткого замыкания, хотя подключенная к нему нагрузка может в итоге выйти из строя.

В варианте 2 условия совершенно иные. Большой ток короткого замыкания должен детектироваться контроллером источника питания 42 В и отключаться не позже, чем через несколько микросекунд. Исследования показали, что за такое короткое время даже 14-вольтовые интеллектуальные интегральные коммутаторы, реализованные на относительно небольших и чувствительных ключах в корпусах SO, не получают серьезных повреждений.

Особенно сложно противостоять коротким замыканиям, представляющим собой нечто среднее между рассмотренными вариантами 1 и 2. Обеспечить стопроцентную защиту — задача, требующая слишком больших издержек, а то и вовсе невыполнимая. Максимум, что можно сделать, — это решить проблему защиты от коротких замыканий с некоторой долей вероятности.

Итак, внедрение 42-вольтовых систем бортового питания в состав автомобильного электрооборудования, с одной стороны, имеет множество плюсов и влечёт за собой появление новых возможностей. Но с другой стороны, в связи с этим существует ещё немало насущных проблем, требующих решения.

Заключение

Если процесс дальнейшей электрификации автомобилей будет выражаться, главным образом, в оптимизации тех или иных функций или узлов (т.е. механические устройства будут заменяться на электромеханические и электрические), то для решения

возникающих проблем может и должна использоваться электроника. Это далеко не всегда означает необходимость применения новых полупроводниковых компонентов; часто речь идёт об использовании доступных функций уже имеющихся компонентов (например ШИМ), чтобы избежать проблемных ситуаций с минимальными затратами. Будущее в области автомобильных технологий — за электроникой.

9.7. Достоинства и проблемы технологий электронного управления оборудованием

Современные технологии электронного управления по проводам (x-by-wire) в автомобилях открывают новые перспективы не только в таких востребованных областях, как электронные рулевые и тормозные системы, электронное управление двигателем (e-gas) или электрические стеклоподъёмники, но и могут быть использованы во множестве других приложений. Постоянно растущие требования к функциональности, безопасности и экономичности автомобильного оборудования сталкиваются с физическими и технологическими ограничениями (Рис. 9.54).

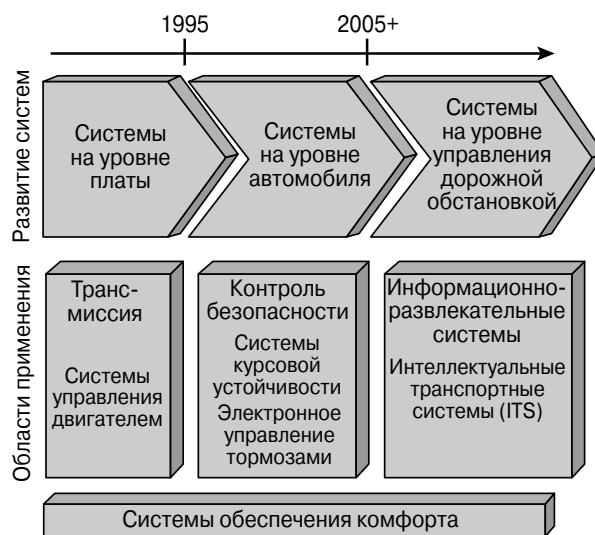


Рис. 9.54. Тенденции развития автомобильных электронных систем и их приложений.

Различные исследования показывают, что лишь путём совершенствования электроники и программного обеспечения можно достичь желаемого уровня индивидуализации и улучшить функциональные возможности автомобильного оборудования (в первую очередь, это относится к замене ме-

ханических и гидравлических систем управления исполнительными устройствами на электрические). По мере того как возрастает насыщенность автомобилей электроникой, неизбежно увеличивается и сложность электронных систем. В дальнейшей перспективе — их объединение в комплексную систему, соответствующую требованиям обеспечения безопасности.

9.7.1. Системные требования

Требования к автомобильному электронному оборудованию основываются на необходимости удовлетворения следующих условий:

- соответствие требованиям охраны окружающей среды и нормативных документов;
- повышение уровня безопасности дорожного движения;
- обеспечение максимального комфорта для водителей и пассажиров при езде;
- снижение расходов, в том числе на техническое обслуживание.

Соответствие требованиям охраны окружающей среды, в первую очередь, следует понимать как поддержание необходимого энергетического баланса в течение всего срока службы транспортного средства, начиная со стадии производства и вплоть до его утилизации. Понятие безопасности в настоящее время также рассматривается шире, чем просто защита пассажиров транспортного средства от повреждений при ДТП, и подразумевает меры, позволяющие предотвратить сами ДТП. Комфортабельность и получение удовольствия от езды является важной характеристикой при выборе автомобиля той или иной марки и определяется наличием индивидуальных, адаптированных под конкретных пользователей возможностей оборудования. Что же касается стоимостных характеристик, то и здесь применим комплексный подход, когда в расчёт берётся не только цена отдельных компонентов или подсистем транспортного средства, но и затраты на его производство, техническое обслуживание и, наконец, утилизацию.

Структура аппаратных и программных средств должна быть масштабируемой и в рамках получения максимально возможной экономической эффективности обеспечивать соответствующую гибкость в выборе оборудования, например различных датчиков или исполнительных устройств.

Возможность повторного использования является лишь одним из критериев выбора. Так, совершенно необходимы надёжные механизмы обнаружения, нейтрализации и устранения неисправностей. Здесь важно правильно определить соотношение цена/эффективность, а также оптимально задать глубину и временные параметры процедур обработки ошибок и информирования о них пользователя.

В целом, с точки зрения таких функциональных параметров, как безопасность, качество, надёжность и долговечность новые электронные системы должны, как минимум, не уступать традиционным механическим и по мере возможности превосходить их. То же можно сказать и о цене, которая ни в коем случае не должна увеличиваться, если функциональность систем остаётся прежней. Новые разработки будут востребованы лишь в том случае, если они смогут обеспечить очевидный, с точки зрения пользователей, выигрыш в плане функциональности и/или стоимости.

9.7.2. Возможности технологии x-by-wire

В концептуальном плане, смысл технологии x-by-wire состоит в том, что она разрывает непосредственную связь водителя транспортного средства с приводными механизмами основных управляемых узлов автомобиля. Механические или гидравлические приводы, скажем, дроссельной заслонки или тормозов заменяются полностью электронными системами управления. С точки зрения системной архитектуры технология x-by-wire допускает децентрализацию информации, потребителей тока, датчиков, вычислительных ресурсов и исполнительных устройств. Используется метод передачи информации по распределённым каналам, чтобы обеспечить работу в реальном времени и повысить безопасность системы (за счёт избыточности данных). Потребление тока также децентрализовано, благодаря этому снижаются потери в соединительных линиях и уровень электромагнитных излучений.

Примеры использования технологии x-by-wire

Ниже с целью иллюстрации возможностей и преимуществ технологии x-by-wire приведён ряд примеров её использования в автомобильном оборудовании.

Классическая конструкция автомобиля основана на механических приводах и тягах. Соответственно, его внешний вид определяется используемым источником энергии, вокруг которого строится всё остальное. Таким образом, двигатель и трансмиссия автомобиля должны рассматриваться как наиболее важные элементы при его проектировании. Колёса и подвеска преобразуют вырабатываемую двигателем энергию в движение по дороге и играют ключевую роль в обеспечении стабильности этого движения и, следовательно, его безопасности (т.е. относятся к узлам, определяющим безопасность и динамику автомобиля). Дополнительные опции и вспомогательные функции, повышающие комфортабельность транспортного средства (например, улучшающие характеристики осветительного оборудования и обзорность), входят в состав кузовного оборудования. К информационно-развлекательной сфере относятся функции, обеспечивающие обмен информацией, коммуникационные и развлекательные услуги.

В области силового оборудования существует тенденция к оптимизации систем управления двигателем и трансмиссией, чтобы, с одной стороны, снизить уровень вредных выбросов, а с другой — обеспечить наиболее комфортный для водителя уровень чувствительности (реакции) этих систем управления. Электронное (by-wire) управление трансмиссией включает в себя

следующие локальные подсистемы: управление газом, сцеплением и коробкой передач (**Рис. 9.55**).

Группа электронных систем управления двигателем включает в себя управление положением дроссельной заслонки, электронный впрыск топлива, рециркуляцию отработанных газов и электрический турбокомпрессор. Основное достоинство электронного управления состоит в том, что оно позволяет более точно контролировать состав топливно-воздушной смеси, поступающей в цилиндры двигателя. Чтобы снизить процентное содержание CO_2 в выхлопных газах, уменьшают объём двигателя, например при использовании систем рециркуляции отработанных газов, при этом динамику можно улучшить путём применения электрического турбокомпрессора или нагнетателя. Кроме того, потери давления во впускных коллекторах могут быть уменьшены, если реализовать адаптивную систему управления клапанами, например, с использованием электро-механических, электрогидравлических или электромагнитных клапанов.

Электронное управление сцеплением реализует ряд функций, относящихся к управлению двигателем: контроль температуры, контроль топливного бака, системы зажигания, последующей обработки выхлопных газов и т.д. Необходимость понизить процентное содержание CO_2 в выхлопных газах автомобилей привела к появлению новых концепций, например гибридных приво-



Рис. 9.55. Области применения электронных систем by-wire, предназначенных для управления трансмиссией и безопасностью/динамикой автомобиля.

дов (первое поколение которых представляет собой сочетание двигателя внутреннего сгорания и стартер-генератора). Появление гибридных двигателей открывает возможность реализации таких функций, как круиз-контроль с опцией Stop&go, рекуперативное торможение и т.п.

Системы электронного управления коробкой передач (shift-by-wire) включают в себя контроллеры автоматических коробок передач различного типа, например, электрогидравлических и электромеханических автоматических многоступенчатых коробок передач, вариаторов (бесступенчатых автоматических коробок передач), трансмиссий с двойным сцеплением и систем полного привода. Использование систем shift-by-wire позволяет точнее выдерживать передаточные отношения, задаваемые контроллером двигателя, благодаря чему снижается содержание CO₂ в выхлопных газах, а вождение становится более комфортным и приятным.

В области систем безопасности и управления динамикой автомобиля акцент в настоящее время также делается на унификацию и организацию совместной работы рулевого управления, тормозной системы и подвески с целью обеспечить максимально возможные стабильность управления автомобилем и контакт с дорогой. Соответственно, основными приложениями технологий by-wire являются контроллеры рулевого управления, тормозов и устройств демпфирования ударов и вибраций (амортизаторов).

Что касается электрических тормозов, то необходимость их внедрения определяется также многими дополнительными факторами, связанными с повышением уровня безопасности и комфорта, соответствием требованиям защиты окружающей среды и обеспечением приемлемой стоимости. Упомянем лишь некоторые из них: тормозные системы с электрическим приводом позволяют точно регулировать величины тормозных усилий, уменьшить время реакции, осуществлять просушивание мокрых тормозных дисков и контролировать износ тормозных колодок, например, в ходе длительного торможения при спуске. Здесь, как и в других областях применения, технологии электронного управления (x-by-wire) не сразу, но постепенно получают всё более широкое распространение. Путь развития тормозных систем ведёт от традиционных, гидравличес-

ких или механических к электрически регулируемым (посредством систем ABS, ESP, экстренного торможения) устройствам и далее через гибридные схемы к полностью электронным тормозным системам (в которых полностью отсутствуют любые механические узлы между водителем и исполнительными устройствами). Гибриды могут представлять собой как простые схемы с гидравлическими резервными тормозами, так и конструкции, в которых на одной из осей автомобиля размещаются тормоза с электрическим (электромеханическим или электрогидравлическим) приводом.

Система динамической регулировки и контроля уровня жёсткости амортизаторов позволяет адаптировать их характеристики к конкретным условиям вождения. Это, в свою очередь, уменьшает потребление топлива и улучшает контакт с дорогой. В сочетании с правильными настройками тормозной системы и рулевого управления система управления амортизаторами вносит существенный вклад в обеспечение курсовой устойчивости автомобиля.

Рулевое управление представляет собой очень критичный, с точки зрения безопасности, узел автомобиля, для которого трудно реализовать даже механическое резервирование.

Основная задача при проектировании кузовной электроники и средств комфорта (к этой области относятся электронные системы управления кондиционированием воздуха, стеклоочистителями, осветительным оборудованием, дверными модулями и т.д.) состоит в наиболее оптимальной, с точки зрения стоимости, локализации функций (распределения их между контроллерами локальных подсистем). При этом вопросы безопасности или, скажем, массогабаритные характеристики отходят на второй план. Грамотное распределение функций между компонентами системы позволяет уменьшить её стоимость и количество соединительных проводов, обеспечивает возможность наращивания функций (масштабируемость) и минимизирует влияние тех или иных локальных неисправностей (возникших, например, вследствие небольшого ДТП). Так, если в результате столкновения автомобиль получил повреждения (разбита фара), это не должно приводить к выходу из строя всего осветительного оборудования. С другой стороны, нежела-

тельно, к примеру, размещать электронный модуль управления передними фарами в модуле управления задними фарами, поскольку это может поднять затраты на ремонт на заоблачную высоту, а в месте с ними возрастёт и величина страховой премии.

Примером удачного применения технологии *by-wire* может служить электронно-механическое управление заслонками кондиционера, осуществляемое с использованием простых шинных протоколов. Такое решение позволяет обеспечить масштабируемость и гибкость в реализации, а также минимизировать расходы на соединительные провода. Аналогично, если заменить механический синхронизатор работы стеклоочистителей лобового стекла на электронный коммутатор, то это расширит возможности по внешнему дизайну автомобиля.

9.7.3. Полупроводниковые решения для систем *x-by-wire*

Шлюзовые и магистральные сетевые архитектуры

В настоящее время в большинстве автомобилей для связи между различными локальными подсистемами и модулями используется сетевая структура с центральным шлюзом. Шлюзы обеспечивают обмен информацией между отдельными участниками сети и поддерживают функции фильтрации, преобразования протоколов и инкапсуляции (формирования пакетов) данных. Центральный шлюз, по сути, выполняет необходимую, хотя и не дающую явных результатов работу (контроллера сети), однако его стоимость довольно велика. К тому же, если обмен данными осуществляется между несколькими локальными устройствами, то использование центрального шлюза затрудняет сетевое планирование и ухудшает так называемую прозрачность сети. Ещё большие проблемы могут возникнуть в том случае, когда необходимо расширить уже существующую сеть. Информация о тех или иных локальных изменениях, распространяясь по всей сети, довольно часто может быть с трудом идентифицирована лишь после того, как эти изменения уже произошли, что во многих случаях требует дорогостоящей процедуры перенастройки системы в целом. С другой стороны, существует и альтернативная, магистральная (шинная) топология, которая,

при наличии определённых предпосылок её применения, обладает весомыми преимуществами. К ним относятся быстрый и безопасный обмен данными с использованием прозрачных и детерминированных протоколов, не зависящих от прикладного программного обеспечения, наличие хорошо проработанных стандартных API (прикладных программных интерфейсов) и прозрачных, ресурсо и аппаратно независимых программных функций. Следствием того, что процессы передачи данных и настройки функционирования сети протекают независимо друг от друга, являются хорошие тестопригодность и модифицируемость системы. Это, в свою очередь, означает дополнительную гибкость в использовании всех доступных ресурсов.

Интеллектуальные дискретные/встроенные источники питания

В зависимости от используемых технологий производства полупроводниковых кристаллов, их функциональных возможностей и типов корпусов, в данной области существует три основных класса решений: монолитные однокристалльные устройства, многокристалльные ИС и устройства на базе дискретных компонентов.

Интеллектуальные интерфейсы ввода/вывода и вспомогательные ИС

Современные автомобильные системы управления с центральным контроллером требуют применения полупроводниковых компонентов, адаптированных для работы в конкретных приложениях, чтобы таким образом сократить количество этих компонентов и снизить общую стоимость системы. Ключ к дальнейшему снижению стоимости лежит в использовании подходящих стандартных микросхем (ASSP) взамен специализированных микросхем (ASIC), разрабатываемых под конкретное приложение.

Обмен данными между контроллерами

К автомобильным контроллерам предъявляются всё более жёсткие требования с точки зрения быстродействия и рентабельности. По сравнению с заказными (ASIC) стандартные микросхемы (ASSP) являются универсальными, что позволяет организовать массовое производство при более вы-

соком качестве и низкой цене компонентов. Однако необходимой предпосылкой успешной работы контроллеров ASSP является организация каналов доступа ко всем компонентам системы. Один из наиболее распространённых на сегодняшний день интерфейсов, последовательный периферийный интерфейс (SPI), обеспечивает скорость передачи данных не более 5 Мбит/с, в то время как уже в ближайшем будущем потребуются каналы передачи данных со скоростью до 30 Мбит/с. Новое решение от компании Infineon обеспечивает связь процессоров или модулей памяти через высокоскоростной последовательный интерфейс. При его использовании совместно с контроллером транмиссии, построенным на процессорном ядре TriCore (Рис. 9.56), можно повысить рентабельность многопроцессорной системы за счёт оптимального распределения ресурсов; при этом обмен ресурсами и связь различных модулей друг с другом осуществляется через высокоскоростной последовательный интерфейс Micro Link (MLI).

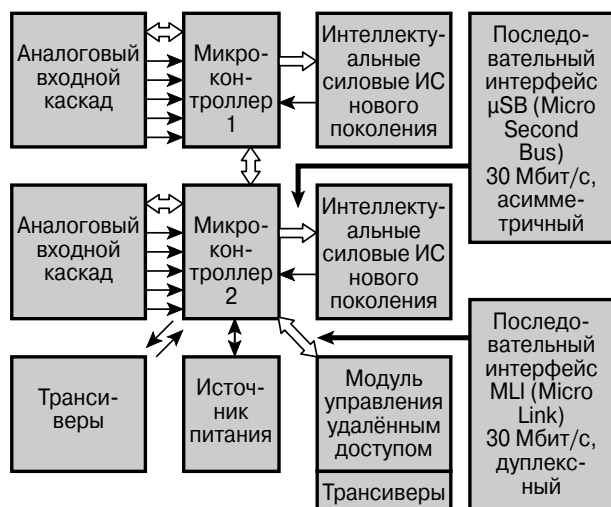


Рис. 9.56. Обмен данными внутри многопроцессорной системы.

Обмен данными внутри кристалла

Необходимым условием создания хорошо организованной системы с распределением ресурсов является наличие понятных интерфейсов и разделение потоков данных от потока команд управления. В связи с этим компания Infineon в своих новых 32-битных микроконтроллерах применяет иерархическую системную архитектуру, предусматривающую раздельное управле-

ние обработкой прикладных программ, статусными/сетевыми и периферийными функциями. Обработка прикладного программного обеспечения осуществляется 32-битным RISC DSP процессором на ядре TriCore. Типовые задачи сетевого администрирования, выполнения статусных и диагностических функций или обмена с периферийными устройствами могут (опционально) решаться с использованием прямого доступа к памяти (DMA) или за счёт применения вспомогательного 32-битного периферийного процессора (PCP). Микроконтроллеры семейства AUDO-NG, в свою очередь, характеризуются масштабируемостью ресурсов: в зависимости от объёма подлежащих обработке данных могут использоваться аппаратные ресурсы различных уровней, как DMA, так и PCP, а также соответствующие шинные интерфейсы. Это позволяет микроконтроллерам AUDO-NG, помимо управления работой периферийных модулей, выполнять от одного до трёх процессов обработки данных одновременно. Кроме того, их возможности расширяет поддержка большого количества встроенных коммуникационных интерфейсов, таких как SPI, K-Line (ISO9141), LIN, CAN, TTCAN, MLI, MSC. Следует отметить и наличие быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и программируемых таймеров.

9.8. Перспективы развития автомобильной электроники

Несмотря на колоссальную сложность задач, стоящих перед разработчиками автомобильной электроники, развитие в этой области идёт бурными темпами. Причинами тому, во-первых, огромный объём рынка (ежегодно в мире производится 55 миллионов новых автомобилей), а во-вторых, относительно постоянный и не подверженный кризисам рост этого рынка.

Несомненно, электрификация и электризация автомобилей будет продолжена. Во главу угла должна быть поставлена задача разработки оптимальной концепции, сочетающей использование в автомобилях центрального и локального аппаратного и программного обеспечения и обеспечивающей бесперебойное взаимодействие всех его компонентов. Без наличия такой концепции добиться существенных улучшений в функци-

ональных возможностях автомобиля и снизить его цену будет очень сложно.

Ключом к успеху здесь может служить дальнейшая стандартизация. В первую очередь, использование стандартизированных или универсальных программных и аппаратных средств будет востребовано при реализации таких традиционных приложений, как, например, дверные модули или подушки безопасности. Очевидно, что эта тенденция будет только усиливаться и развиваться; объёмы выпуска продукции будут расти, в то время как её разнообразие существенно сократится.

Тенденция к унификации или стандартизации аппаратных средств изменила направление развития полупроводниковых компонентов: от стандартных и заказных микросхем (ASIC) к компонентам ASSP, специально адаптированным под конкретные приложения. В связи с этим, в будущем большое значение при разработке подобных компонентов приобретёт компьютерное моделирование, призванное ускорить процесс разработки и повысить её качество.

Автомобильная промышленность не стоит на месте. Так, большие средства были вложены в разработку альтернативных концепций транспортных средств, таких как электромобили (использующие энергию аккумуляторных батарей), гибридные

конструкции (приводимые в движение обычным двигателем внутреннего сгорания и/или электромотором) или автомобили на топливных элементах (использующие электрическую энергию, вырабатываемую водородным или спиртовым топливным элементом). Уже сегодня эти проекты демонстрируют большой потенциал. Однако появление альтернативных двигательных установок не слишком сильно повлияло на задачи автомобильной электроники. Такие её приложения, как системы безопасности, кузовные или информационно-развлекательные системы вообще не претерпели изменений, и лишь в области управления трансмиссией автомобиля некоторые изменения всё же имели место.

Несмотря на развитие автомобильной электроники, ещё немало конкретных проблем ожидают своего разрешения. Например, быстрая смена полупроводниковых технологий ведёт к тому, что очень скоро будет невозможно найти замену неисправному компоненту и окажется очень сложно адаптировать новые полупроводниковые устройства в уже имеющиеся приложения. Существует, впрочем, вполне прагматичное решение этой проблемы — можно использовать контроллеры и модули управления от старых и неисправных автомашин.

10. РАЗВЛЕКАТЕЛЬНАЯ БЫТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

10.1. Виды широкополосной связи

С развитием цифровых технологий в радио- и телевидении (кабельном, спутниковом или наземном) появилась возможность не только предложить частным потребителям большое количество дополнительных каналов с лучшим качеством сигнала, но и обеспечить онлайн-доступ к таким сервисам, как Интернет, региональные информационные каналы или иные интерактивные услуги, характеризующиеся высокой скоростью передачи данных (см. **Рис. 10.1**).

Процесс перевода общедоступных сетей и пользовательских устройств в цифровой формат характеризуется всё возрастающей скоростью передачи данных и благодаря развитию цифрового телевидения и внедрению интерактивных абонентских ТВ приставок (Set-Top Box — STB) ведёт к появлению многофункциональных и высокопроизводительных широкополосных коммуникационных сетей.

Внедрение цифровых форматов не только обеспечивает вещание гораздо большего, чем это было раньше, количества телевизионных и радиоканалов, но и предоставляет возможность передачи данных и гарантирует более высокое качество передаваемого изображения. Общедоступная «домашняя» сеть будущего предоставит потребителям

свободный доступ к необъятному морю различных цифровых услуг, начиная с вещания региональных информационных служб (информация о погоде, путешествиях, спорте, общественных мероприятиях и т.д.) и вплоть до предоставления услуг Интернет-доступа, телефонной связи по телевизионному кабелю и организации видеоконференций (а в перспективе и высокоскоростного доступа в Интернет, высокоскоростной IP- и видеотелефонии). Все эти сервисы могут поддерживаться широкополосной кабельной сетью.

Для поддержки большинства новых сервисов пользовательское оборудование обязательно должно обладать специальными интерактивными ресурсами. Кабельные сети, используемые для предоставления этих услуг, служат не только в качестве средств передачи данных от поставщика услуг к пользователю (upstream), но и аналогичным образом передают данные от пользователя (downstream), осуществляя тем самым обратную связь с поставщиком услуг (провайдером). Однако в настоящее время лишь небольшая часть существующих кабельных сетей поддерживает опцию «обратного» канала, а остальным требуется апгрейд аппаратных средств, чтобы реализовать поддержку интерактивных услуг.

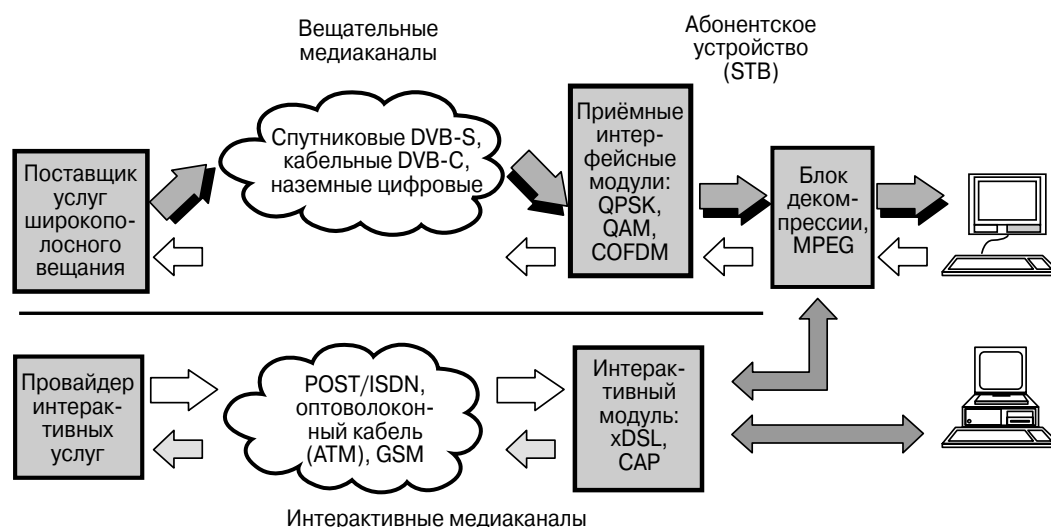


Рис. 10.1. Это больше, чем просто ТВ — цифровое телевидение открывает для частных потребителей возможности широкополосных коммуникаций.

В настоящее время существуют два конкурирующих стандарта, поддерживающих опцию обратного канала: MCNS (кабельная мультимедийная сеть, использующаяся в США) и DVB-C RC (обратный канал в системе цифрового кабельного ТВ). В качестве альтернативы им телефонные сети общего пользования также могут обеспечивать обратную связь с провайдером через аналоговый модем или (опционально) через высокоскоростную сеть ISDN (Integrated Service Digital Network — универсальная цифровая сеть с интеграцией услуг). Кроме того, стандартная функция обратного канала поддерживается и системой цифрового спутникового вещания (Digital Satellite Broadcast — DSB), а в перспективе она будет доступна и в системе цифрового наземного телевидения (Digital Terrestrial TeleVision — DTTV).

Коль скоро интерактивный потенциал цифрового кабельного телевидения уже в ближайшем будущем обеспечит доступность телефонной связи по ТВ кабелю, цифровизация кабельных каналов ТВ вещания создаст серьёзную конкуренцию для телефонных сетей общего пользования. Даже с учётом постоянного увеличения пропускной способности сети ISDN, в перспективе она не сможет сравниться с пропускной способностью телевизионного кабеля. По этой причине операторы традиционных телефонных сетей уделяют всё большее внимание таким технологиям, как DSL (Digital Subscriber Line — цифровая абонентская линия) или HFC (Hybrid Fiber Coax — гибридные оптико-коаксиальные сети), которые позволяют увеличить пропускную способность сети и благодаря этому помогают им выдерживать конкуренцию со стороны цифровых телевизионных сетей.

10.1.1. Цифровизация кабельного телевидения

Кабельные телевизионные сети должны быть переведены в цифровой формат по следующим двум причинам:

1. **Конкуренция со стороны цифрового спутникового телевидения.** Цифровое спутниковое ТВ вещание приобрело в США такую популярность, что значительное количество абонентов полностью отказались от подписки на кабельные каналы в пользу спутникового ТВ. Операторы кабельных телевизионных сетей сумели сохранить или даже вернуть обратно сво-

их подписчиков лишь в тех случаях, когда смогли предоставить им аналогичное спутниковому телевидению количество каналов и дополнительных услуг.

2. **Ограниченная полоса пропускания.** На сегодняшний день аналоговые кабельные сети способны передавать приблизительно 30 телевизионных каналов. С учётом современных технологий и пожеланий пользователей, этого количества явно недостаточно. Простейший способ резко увеличить пропускную способность кабельного ТВ — это перевести его в цифровой формат.

Традиционная аналоговая кабельная телевизионная сеть, в которой используется коаксиальный кабель, осуществляет передачу 25...30 каналов с шириной полосы пропускания каждого из них соответственно 6...8 МГц. В случае перевода в цифровой формат скорость передачи данных по каждому из каналов составит 10...30 Мбит/с в направлении к пользователю и 3...10 Мбит/с при передаче в обратном направлении (обратный канал, см. **Рис. 10.2**). По каждому кабельному каналу может быть передано приблизительно 5...6 цифровых телевизионных каналов, что в совокупности составит до 180 ТВ каналов. Если часть из них будет отведена под передачу данных, то суммарная пропускная способность сети (количество имеющихся каналов, умноженное на 30 Мбит/с) позволит организовать для частных абонентов сети (домовладений) повременной коллективный (многогостанционный) доступ к этим данным. Однако для того чтобы обеспечить быстрый доступ даже в «пиковое» время, количество абонентов такой сети должно быть ограничено. По этой причине цифровые кабельные телевизионные сети обычно разделены на локальные сегменты (секции), каждый из которых обслуживается собственным сервером. Статистические оценки загрузки сети показывают, что один цифровой кабельный канал может обеспечить обслуживание 100...150 домовладений при средней скорости передачи данных 3 Мбит/с. Следовательно, число абонентов, обслуживаемых локальным сегментом сети, в 150 раз больше, чем количество зарезервированных каналов. Обратный канал, назначенный в цифровой кабельной телевизионной сети, используется коллективно всеми абонентами, обслуживаемыми по одной схеме.

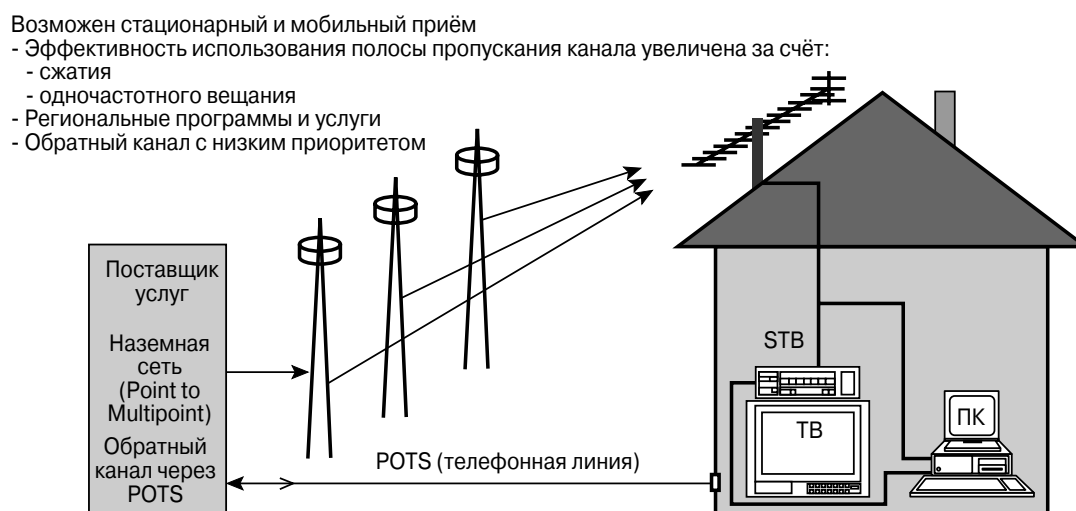


Рис. 10.3. Система цифрового наземного ТВ вещания.

см. Рис. 10.3), а также наличие алгоритмов сжатия телевизионного сигнала и эффективного кодирования каналов с целью лучшего использования полосы пропускания канала. В зависимости от применяемых способов модуляции сигнала дополнительно может быть реализована одновременная передача ТВ программ несколькими станциями (Simultaneous Broadcasting Network — SBN) и даже мобильный приём.

Увеличение полосы пропускания канала, связанное с переходом на цифровой формат, может быть использовано для передачи сигнала с более высоким разрешением, трансляции дополнительных ТВ каналов или для реализации новых цифровых сервисов. К ним относятся как передачи образовательного характера (для школ и университетов) или содержащие информацию об общественной жизни в данном регионе, так и новости, реклама, информация для туристов, а также платные ТВ программы. Благодаря использованию новых цифровых технологий, DTTV будет столь же привлекательно, как DSB и общедоступные эфирные телеканалы, многие из которых не транслируются через спутник. С переходом на цифровой формат они, тем не менее, смогут выдерживать растущую конкуренцию.

При организации цифрового наземного ТВ вещания в США, странах Скандинавии, в Германии, Италии, Франции, Испании,

Австралии, Сингапуре, ЮАР, Малайзии и в ряде европейских стран в качестве базового принят стандарт DVB-T. Он основан на использовании метода COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением кодированных сигналов), при котором транслируемые символы передаются одновременно на целом множестве несущих частот в течение относительно длительного (несколько миллисекунд) периода времени. Результатом такой операции является очень высокая эффективность подавления эхо-сигналов (помех от многолучевого приёма сигнала)¹⁾, что позволяет реализовать режим одночастотной передачи программ (SBN).

В системе SBN сигнал одного и того же ТВ канала передаётся на одной и той же несущей частоте группой из нескольких соседних станций ТВ вещания. Приёмник получает один и тот же сигнал от нескольких источников одновременно (но с фазовым сдвигом). С помощью методики эхо-подавления фазовый сдвиг компенсируется, и в результате обеспечивается идеальная «самокоррекция» полезного сигнала в процессе его декодирования.

Данный метод, с определёнными ограничениями, применим даже в случае мобильного приёма в автомобилях, поездах и т.п. Ограничения определяются тем, что в

¹⁾ В отличие от аналогового телевидения, в цифровом телевидении помехи от многолучевого (вследствие отражений сигнала от различных объектов) приёма приводят к полному пропаданию полезного сигнала, поэтому борьба с ними является одной из главных задач при реализации систем цифрового наземного ТВ вещания. — *Примеч. пер.*

сети наземного ТВ вещания до сих пор используются аналоговые стандарты передачи сигналов. Вследствие больших расстояний между вещательными станциями и весьма ограниченных размеров антенн у мобильных ТВ приёмников, очень трудно обеспечить достаточный для уверенного приёма уровень сигнала на всей территории вещания. Поэтому приходится использовать дополнительные передатчики, предназначенные для компенсации «провалов» в зоне вещания (более подробно об этом будет рассказано ниже). Преимущество системы SBN состоит в том, что, поскольку соседние передатчики работают на одной, а не на различных частотах, то при её реализации значительно сокращается число используемых каналов.

В настоящее время в различных странах мира ведутся работы по развитию существующих стандартов цифрового ТВ вещания с целью обеспечить возможность мобильного приёма на всей территории вещания. В Европе эта работа уже практически завершена. Стандарт DVB-H (где сокращение «-H» образовано от слова *Handheld* — переносной) основан на стандарте DVB-T, то есть общий принцип кодирования источника сигнала остался тем же самым. Компания *Infineon*, совместно с другими, активно участвует в продвижении стандарта DVB-H. Помимо этого, в рамках европейского проекта «Цифровое ТВ вещание» (*Digital Video Broadcasting — DVB*) предпринимаются усилия по дополнению стандарта DVB-H за счёт конвергенции с сотовыми сетями, терминалами и платформами. Это шаг на пути объединения преимуществ широковещательных сетей (реализующих экономически эффективный принцип «один источник — много пользователей») и сотовых сетей (работающих по принципу «один источник — один пользователь» и реализующих интерактивные функции). Существенное отличие стандарта DVB-H от DVB-T состоит, однако, в том, что поток данных по каждому из каналов передаётся не постоянно, а в определённые временные интервалы, или временные слоты (система TDMA¹⁾). Кроме того, передаются дополнительные данные, используя которые, приёмник сигналов может

«выходить на связь» только тогда, когда транслируется, например, желаемая телепрограмма. В «периоды ожидания» приёмник находится в режиме пониженного энергопотребления, благодаря чему экономия энергии составляет до 80% по сравнению с режимом работы по стандарту DVB-T. Для мобильных устройств с батарейным питанием, например сотовых телефонов или КПК, такая экономия просто необходима, чтобы обеспечить достаточно длительное время работы как в режиме приёма, так и в режиме ожидания (в первую очередь это относится к мобильным телефонам). Реализация данного режима требует использования в канальных декодерах дополнительных ресурсов памяти, чтобы обеспечить восстановление непрерывного потока данных из полученных приёмником пакетов данных.

Наличие новых стандартов передачи сигналов пока ещё не привело к каким-либо изменениям в цифровом ТВ вещании, поскольку по-прежнему существует упомянутая выше проблема полного покрытия зоны вещания при трансляции программ. При стандарте DVB-H используются имеющиеся передатчики стандарта DVB-T, которые, в свою очередь, заменяют ещё существующие аналоговые ТВ передатчики. Соответственно, первоочередным требованием к DVB-H является возможность передачи сигналов уже существующими большими передатчиками. В этой связи, существенным достоинством системы одночастотного вещания (SBN) является возможность использования для компенсации плохого приёма (так называемых «провалов» в зоне вещания) дополнительных передатчиков небольшой мощности, для работы которых не требуется какого-либо управления со стороны головной передающей станции.

В настоящее время единственным производителем цифровых ТВ тюнеров является компания *Infineon*. Разработанная ею ИС TUA 6034 (называемая также TAIFUN) предназначена для построения комбинированных тюнеров, способных работать как с цифровым, так и с аналоговым телевизионным сигналом. В дальнейшем *Infineon* намерена предложить потребителям решения для будущих систем стандарта DVB-H.

¹⁾ Данная система передачи сигнала называется TDMA (*Time Division Multiple Access* — многостанционный доступ с временным разделением каналов). — *Примеч. ред.*

10.1.3. Улучшенная модель обратной связи в системе цифрового спутникового ТВ вещания

Трансляция цифровых телевизионных программ через спутниковые каналы ведётся с 1994 года, а первые цифровые услуги в области передачи данных были анонсированы в США в 1996 году. Поскольку цифровые спутниковые системы не имеют обратного канала, их основным применением остаётся собственно передача телевизионных программ. Однако, как упоминалось выше, реализация интерактивных функций, необходимых, например, для приёма платных ТВ программ, онлайн-шопинга, осуществления банковских услуг «на дому» или доступа в Интернет, возможна лишь при наличии канала обратной связи с использованием обычной телефонной линии или сети ISDN (Рис. 10.4).

Структура подобной системы выглядит следующим образом. Поставщик услуг (провайдер) осуществляет связь с абонентским сервером через прокси-сервер (на станции связи), который используется для сохранения и обработки наиболее часто запрашиваемого Интернет-контента и, тем самым, минимизации времени отклика системы на запрос. Этот сервер связан с другими источниками информации, не только с Web-сайтами, но и с ресурсами других местных провайдеров и частных

компаний. Наиболее часто запрашиваемые с прокси-сервера данные могут постоянно передаваться через спутник (подобно передаче сигналов телетекста в аналоговом телевидении). Менее актуальные данные могут быть затребованы через телефонный обратный канал. В зависимости от условий приёма в зоне вещания, эти данные затем могут передаваться абоненту непосредственно через спутник или «в обход» с использованием телефонной сети. Для осуществления операций, критических с точки зрения защиты информации, например банковских онлайн-услуг или загрузки программного обеспечения из сети, предусмотрен контроль доступа к системе.

Спутниковый транспондер (ретранслятор) обеспечивает скорость передачи данных приблизительно 38 Мбит/с, что позволяет обслуживать большое количество пользователей при относительно малом времени доступа. Спутниковый транспондер, используемый в системе цифрового телевидения, позволяет последовательно передавать 6 программ стандарта PAL. Количество передаваемых каналов можно увеличить, если повысить коэффициент сжатия сигнала. Например, это применимо при трансляции новостных программ или мультфильмов, которые не требуют чрезвычайно высокого качества изображения.

Передача по широкополосному спутниковому каналу
- Режим Point-to-multipoint, а также
- Режим Point-to-point с использованием индивидуальных кодов доступа

Телефонная линия для обратного канала и для передачи узкополосной индивидуальной информации:

- коды доступа
- биллинг
- индивидуальные услуги

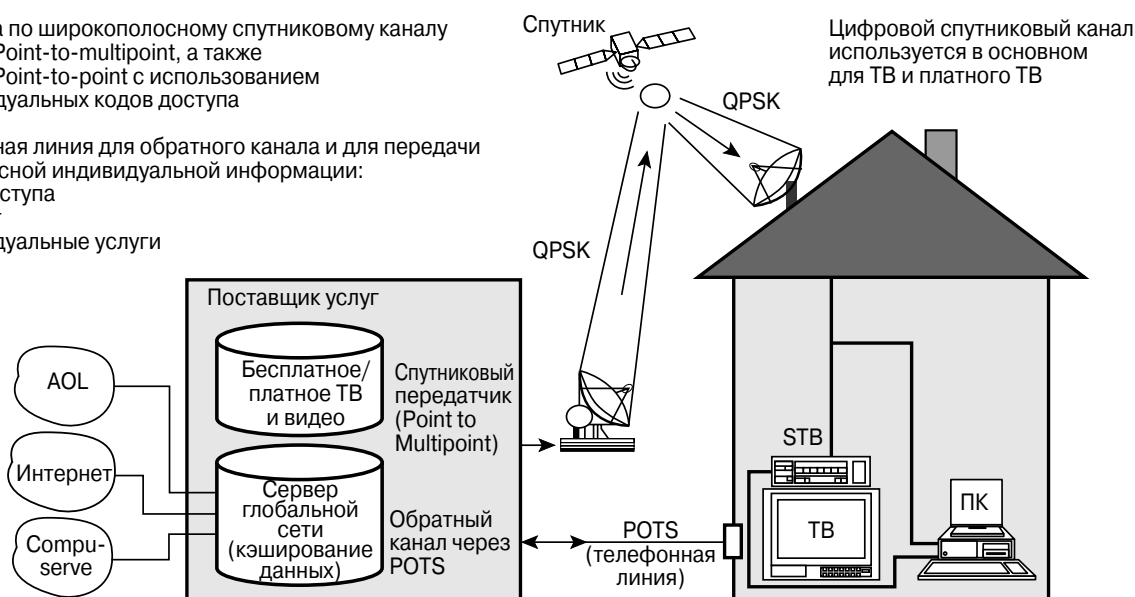


Рис. 10.4. Организация цифрового спутникового ТВ вещания с обратной связью непосредственно через спутник или по телефонной сети.

С переходом от аналоговых технологий к цифровым, используемая пропускная способность транспондеров увеличилась в среднем в 6 раз. После того как количество абонентов цифрового спутникового телевидения достигло «критической точки», перспективы увеличения возможностей по размещению рекламы стали главной движущей силой в процессе замены аналоговых транспондеров на цифровые. На сегодняшний день в Северной Америке и в Европе уже более 1000 цифровых ТВ каналов передаются через спутники.

В большинстве стран мира в качестве стандарта канальной модуляции для спутникового цифрового телевидения выбран DVB-S. В нём, как и в ряде других стандартов, используется метод квадратурной фазовой манипуляции (Quadrature Phase Shift Keying — QPSK). Благодаря распределению энергии в спектре сигнала и полной коррекции ошибок, этот метод модуляции более всего подходит для системы DVB-S и работы в условиях типичных помех, присущих спутниковому вещанию.

Компания Infineon разработала ИС TUA 6120 (TORNADO) — микросхему приёмника спутниковых сигналов. Микросхема TUA 6120 представляет собой «монолитный кремниевый тюнер», построенный по принципу приёмника прямого преобразования (DCR), и содержит интерфейс выходных сигналов I/Q, что позволяет использовать различные микросхемы канальных декодеров QPSK (см. Рис. 10.5).

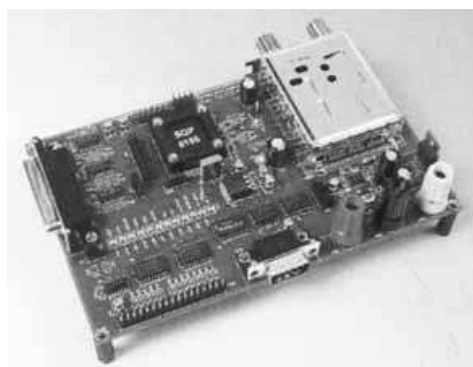


Рис. 10.5. Демонстрационная плата QPSK-декодера DiRec-Sat2TS.

Термин «монолитный кремниевый тюнер» (Silicon Tuner) означает в данном случае, что для работы тюнера больше не требуется никаких внешних ВЧ компонентов (катушек индуктивности, варакторов, высоко-

частотных диодов или транзисторов). Все необходимые функции, такие как управляемый маломощный усилитель, генератор, управляемый напряжением (VCO), и др., интегрированы непосредственно в чип; система не требует какой-либо дополнительной настройки. ВЧ сигнал, поступающий на вход спутникового приёмника, попадает непосредственно в ИС тюнера. Используемые на выходах сигналов I/Q встроенные фильтры нижних частот с переключаемыми частотами среза позволяют адаптироваться к различным скоростям передачи данных и системам кодирования QPSK.

10.2. MultiMediaCard — идеальное устройство хранения данных для мобильных пользовательских устройств

Благодаря своим исключительно малым размерам MultiMediaCard (MMC) представляет собой очень компактное запоминающее устройство большой ёмкости, особенно востребованное в мобильном оборудовании (Рис. 10.6). За счёт применения технологии 3D Memory, специально разработанной для решения подобных задач, достигнуты очень высокие плотности размещения информации при минимальных размерах кристалла. В настоящее время разработанное Infineon устройство MultiMediaCard, габариты которого составляют 24×32×1.4 мм (Рис. 10.7), является самым маленьким среди всех представленных на рынке мобильных носителей информации, чем выгодно отличается от своих конкурентов. Следовательно,



Рис. 10.6. MultiMediaCard используется в мобильных устройствах самого различного назначения.



Рис. 10.7. MultiMediaCard — на сегодняшний день самый малогабаритный и дешёвый носитель информации.

ММС более всего подходит для использования в портативных устройствах, где имеется минимум места для размещения устройств записи и хранения данных и важным фактором является вес этих устройств с учётом разъёмов и электронных схем управления.

С развитием технологии 3D Мемогу и разработкой новых технологий изготовления корпусов ИС (см. **Табл. 10.1** и **Рис. 10.9** далее в подразделе 10.2.4) соотношение между затратами на производство компактных электронных носителей информации и максимальным объёмом хранящихся на них данных значительно улучшилось. В результате, сегодня полупроводниковые приборы впервые представляют собой реальную альтернативу оптическим и магнитным устройствам хранения информации. В ряде же областей применения их преимущества вырисовываются особенно отчётливо.

Благодаря надёжному разъёмному соединению карты ММС с устройством воспроизведения информации, процесс передачи данных нечувствителен к механическим вибрациям. Поскольку устройство воспроизведения не содержит движущихся частей, использование MultiMediaCard гарантирует самую высокую (по сравнению с CD-ROM или флоппи-дисковыми) устойчивость к механическим, температурным воздействиям и не боится влажности. Помимо этого, MultiMediaCard демонстрирует наиболее высокую скорость передачи данных и характеризуется малым энерго-

потреблением. Последнее особенно важно, поскольку от энергопотребления зависит продолжительность работы устройств воспроизведения с батарейным питанием.

Многие ведущие производители мобильных телефонов и КПК уже включили поддержку MultiMediaCard в число функций своей продукции. Судя по всему, за ними вскоре последуют и производители таких устройств, как цифровые камеры, навигационное оборудование, электронные игры или собственно устройства воспроизведения мультимедиа.

10.2.1. Широкий диапазон применений

Одним из многочисленных применений MultiMediaCard является хранение программ для портативных устройств. Конечные пользователи могут, например, расширить функциональные возможности оборудования, загрузив в него соответствующие программы или данные из ММС-карты. Если данные, которые требуется перенести, представлены в определённом формате, то карты подобного типа можно использовать для обмена данными между различными устройствами. Например, владелец мобильного телефона может вытащить из него MultiMediaCard с номерами телефонов и вставить её в свой настольный телефонный аппарат, а покидая офис, снова вернуть карту в мобильник. Другими сферами применения ММС в мобильных телефонах являются запись голоса (цифровой диктофон), сохранение полученных факсов и сообщений электронной почты или обновление программного обеспечения телефона.

Ещё один сценарий использования MultiMediaCard связан с загрузкой различных данных из сервера в персональный компьютер, а затем в мобильный ММС-плеер. Так, на ММС-карту объёмом 32 Мбайт при использовании соответствующего алгоритма сжатия (например, MPEG-2 Layer 3) можно записать в цифровом виде до получаса музыки в стереоформате. Музыкальные и другие развлекательные файлы могут быть получены владельцем заветной MultiMediaCard из Интернета, загружены всё в ту же MultiMediaCard и затем проигрываться, скажем, во время утренней пробежки, через аудиоплеер, который абсолютно не восприимчив к тряске и размером не больше спичечного коробка.

Кроме мобильных телефонов и аудиоплееров, ММС-карты широко используются в электронных играх. В данном случае речь идёт, главным образом, о картах ПЗУ (ROM), на которых могут быть записаны аудиокниги, радиопостановки или, например, детские песни.

10.2.2. Упор на стандартизацию

Для того чтобы гарантировать совместимость MultiMediaCard с различными форматами данных и с разнообразными системами их записи, компания Infineon пошла по пути стандартизации. С этой целью Infineon осуществляет стратегическое партнёрство с международными компаниями в области производства полупроводниковых компонентов, мобильных телефонов и КПК. Задача этого партнёрства — основать Ассоциацию производителей MultiMediaCard, с тем чтобы активно продвигать этот стандарт и обеспечивать соответствие технических характеристик разрабатываемых компонентов данному стандарту.

Чтобы повысить популярность ММС-карт, ассортимент этой продукции, который первоначально состоял исключительно из ПЗУ (память, предназначенная только для чтения), был дополнен перезаписываемыми флэш-картами. Благодаря сотрудничеству с ведущими производителями флэш-памяти, в настоящее время наряду с ММС-картами, предназначенными только для чтения, потребителям предлагаются и устройства перезаписываемой памяти, соответствующие стандарту MultiMediaCard.

10.2.3. Гибкий интерфейс

Благодаря низкому энергопотреблению (1 мВт при тактовой частоте 100 кГц) и возможности работы в диапазоне напряжений питания 2...3.6 В, MultiMediaCard оптимальны для использования в устройствах с питанием от батарей. Скорость передачи данных при операции чтения варьируется от 0 до 20 Мбит/с, что перекрывает возможные требования большинства различных прило-

жений.

В MultiMediaCard реализован синхронный последовательный интерфейс, имеющий шинную архитектуру с одним ведущим контроллером (single master bus). Несколько ММС-карт могут последовательно управляться от одного контроллера одновременно благодаря так называемому транзитному (сквозному) соединению¹⁾ контактных площадок карт. Имея всего три сигнальных линии (CMD, DAT, CLK), интерфейс оптимизирован для защищённой, но, тем не менее, быстрой передачи данных.

Благодаря «гибкости» интерфейса, обеспечивающего работу при различной тактовой частоте и напряжении питания, MultiMediaCard идеально подходит для использования в самых разнообразных приложениях, начиная от недорогих устройств воспроизведения и кончая Pentium PC, где требуется максимальная скорость передачи данных.

Очень простой и экономичный способ использования MultiMediaCard состоит в программном эмулировании трёх сигнальных линий. Соответственно, у оконечного устройства потребуется задействовать только три порта ввода/вывода. При программной эмуляции, в зависимости от производительности процессора, может быть достигнута скорость передачи данных от 100 Кбит/с (процессор 8051 с тактовой частотой 16 МГц) до 2 Мбит/с (RISC-процессоры). Для быстродействующих приложений, где требуется максимально возможная скорость передачи данных, функции интерфейса могут быть реализованы аппаратно с использованием VHDL²⁾. Затем пользователь может, например, объединить ММС-интерфейс и другие периферийные функции в специализированной заказной ИС (ASIC).

К системным компонентам, требующимся для работы с MultiMediaCard, относятся соответствующие разъёмы, а также адаптер PC-карт, с помощью которого MultiMediaCard может подключаться к устройствам, не имеющим слота MultiMediaCard, но имеющим слот для PC-карт.

¹⁾ В плоском разъёме, с помощью которого ММС-карта соединяется с внешними устройствами, предусмотрены контактные площадки (линии) специально под осуществление транзитного соединения (вход-выход), т.е. управляющий сигнал контроллера может поступать одновременно на несколько карт. — *Примеч. пер.*

²⁾ VHDL — язык описания аппаратного обеспечения на высокоскоростных ИС. — *Примеч. пер.*

10.2.4. 128 Мбайт в 2001 году

MultiMediaCard впервые вышли на рынок мобильных носителей информации в 1998 году как устройства ПЗУ объёмом 2...8 Мбайт (Рис. 10.8 и Табл. 10.1). Год

спустя появилась модель с объёмом памяти 32 Мбайт (к 2001 году он увеличился уже до 128 Мбайт), а также появились первые перезаписываемые флэш-карты с объёмом памяти 2 или 4 Мбайт.

Таблица 10.1. Технические характеристики MultiMediaCard

Электрические	
Диапазон рабочего напряжения	2.0...3.6 В
Потребляемая мощность	< 20 мВт при рабочей частоте 20 МГц, < 1.0 мВт при рабочей частоте 100 кГц, < 0.1 мВт в режиме ожидания
Скорость последовательной передачи данных	до 20 Мбит/с
Время доступа	< 3 мкс
ESD-защита	±4 кВ
Логические	
Объём памяти	2/4/8/10 Мбайт
Рабочие режимы	Идентификация карты; режим высокоскоростной передачи данных
Скорость передачи данных	Чтение: 20 Мбит/с, запись: 1.6 Мбит/с
Нагрузочная способность шины	Шина ММС поддерживает до 30 карт одновременно
Механические	
Габариты	24×32×1.4 мм
Число контактов	7
Износоустойчивость (вставка/извлечение)	10 000 циклов
Диапазон рабочих температур	−20...+85°C
Температура хранения	−40...+85°C
Технология	ПЗУ/флэш

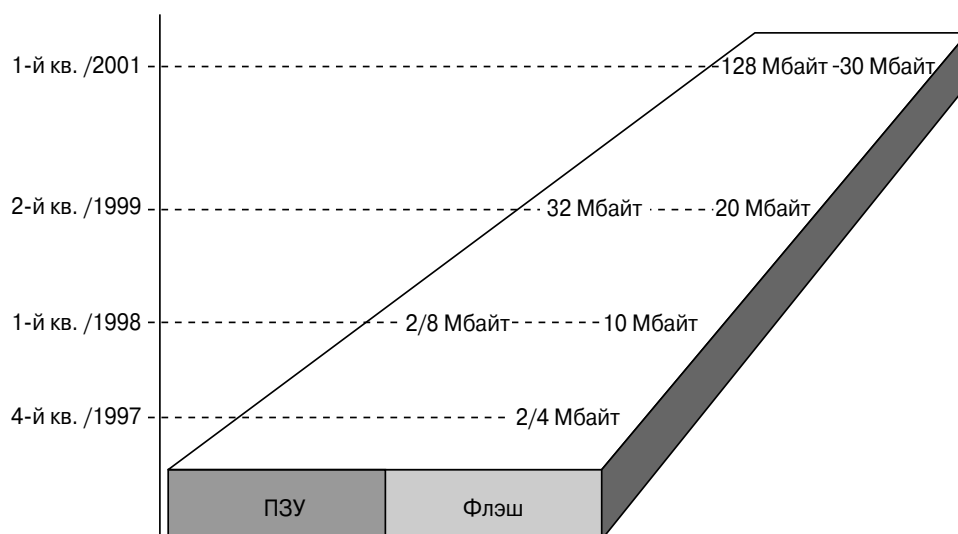


Рис. 10.8. Ёмкость MultiMediaCard к 2001 году достигла 128 Мбайт для ПЗУ (ROM) и 32 Мбайт для флэш-карт.

Запатентованная Infineon новая архитектура построения ячеек памяти открыла новые возможности в развитии полупроводниковых технологий. В отличие от прежних решений, когда транзисторы, образующие ячейки памяти, располагались в одной плоскости (2D-ROM — двумерная архитектура), новая технология реализует их трёхмерное расположение (3D-ROM).

Таким образом, при новой технологии более высокая «плотность упаковки» ячеек памяти в полупроводниковом кристалле (при том же объёме памяти) достигается не за счёт уменьшения технологических норм, а в результате изменения конструкции путём уплотнения имеющейся структуры кристалла в 2 раза (см. **Рис. 10.9**). Площадь 3D-ячеек памяти может быть дополнительно уменьшена за счёт «сжатия».

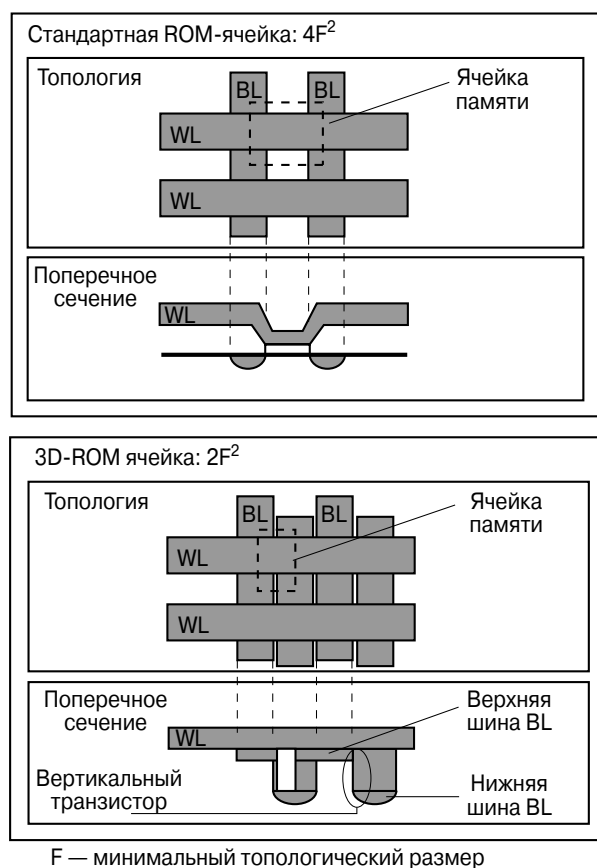


Рис. 10.9. Площадь ячейки памяти уменьшается наполовину при использовании трёхмерной (3D) технологии.

Как правило, конструкции разъёмов для подключения MMC-карт выполняются в соответствии с требованиями заказчиков, в зависимости от того, где эти карты используются (**Рис. 10.10**). Возможны различные варианты: стандартный или многоконтактный разъём, с защёлкиванием или прижимного типа. Принимая во внимание, что основным применением MMC-карт является работа в портативных устройствах, конструкция разъёмов определяется в первую очередь размерами имеющегося пространства. Контакты MMC-разъёмов должны выдерживать до 10 000 операций вставки/извлечения одной или нескольких MultiMediaCard и при этом разъём должен занимать минимум места на шине. По сравнению со стандартными чип-картами, эти контакты расположены на самом краю карты.

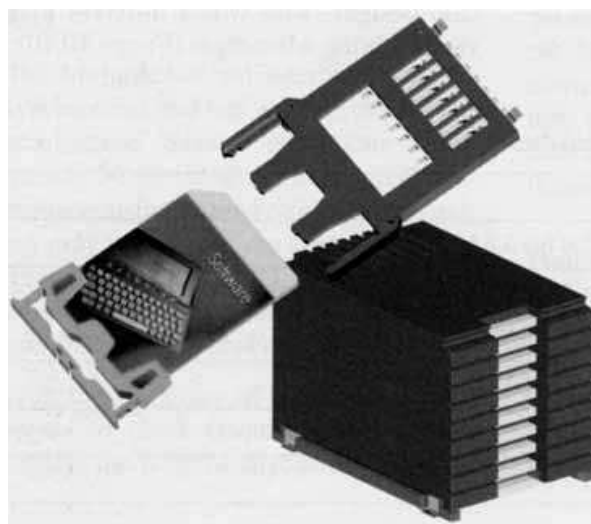


Рис. 10.10. Стандартный разъём для подключения MMC-карт (слева) и «мультизащёлка» в варианте для печатного монтажа (справа).

11. КОММУНИКАЦИОННЫЕ МОДУЛИ

11.1. Общий обзор коммуникационных устройств и тенденции их развития

На сегодняшний день в мире насчитывается более 600 млн телефонных линий. Последние достижения в области микроэлектроники позволили дополнить эту глобальную коммуникационную сеть новыми услугами, такими как предоставление доступа в Интернет, организация видеоконференций или, например, обмен информацией с абонентами в мобильных сетях.

Сегодня абсолютно ясно, что глобальная связь должна осуществляться через Интернет. При этом следует учитывать, что пользователи заинтересованы в возможно более удобном доступе к сети. Появление ISDN (Integrated Services Digital Network — цифровая сеть с интеграцией услуг) представляет собой значительный шаг по пути к данной цели, и быстрое развитие глобального рынка ISDN-услуг это подтверждает.

Постоянное увеличение объемов мультимедийной информации в сети требует повышения скорости доступа к данной информации. Это означает необходимость обновления самих сетей. На смену коммутируемым линиям телефонной связи пришли новые сетевые технологии, такие как ATM (Asynchronous Transfer Mode — асинхронный режим передачи) или быстрый Ethernet. Они обеспечивают очень быстрое соединение со скоростью передачи данных до 1 Гбайт/с и возможность его динамической подстройки под требования пользователя. Конечно, реализация этих технологий потребовала также разработки новых полупроводниковых компонентов.

Что касается высокопроизводительных сетей связи, предназначенных для передачи данных и голоса, то в этой области будущее наступило уже сегодня. Так, весьма многообещающим является использование ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line — асимметричная цифровая абонентская линия), VDSL (Very high speed Digital Subscriber Line — сверхскоростная цифровая абонентская линия) и SHDSL (Single pair High speed Digital

Subscriber Line — однопарная быстродействующая цифровая абонентская линия).

Стандарты и основные системные возможности

К числу наиболее многообещающих и рыночно востребованных приложений полупроводниковой электроники в сфере телекоммуникаций относятся так называемые встроенные решения (Solutions on a Chip), которые включают в себя:

- интегральные микросхемы, предназначенные для цифровых и аналоговых устройств коммутации и передачи сигналов. Среди таких устройств, например, линейные карты для АТС, офисные АТС (Private Business eXchange — PBX), устройства абонентского радиодоступа (Radio In The Loop — RITL) или интегрированные устройства доступа (Integrated Access Devices — IAD);
- интегральные решения и компоненты для систем АТМ и других высокоскоростных сетей передачи данных;
- ИС для оконечных устройств, предназначенных для цифровой передачи речи, видео и данных.

«Встроенные решения для систем связи» означают, что всё большее количество телекоммуникационных функций реализуется «в рамках» одной ИС с высокой степенью интеграции. Это, с одной стороны, снижает стоимость систем, а с другой — позволяет постоянно расширять их функциональные возможности. Хорошим примером является разработанный несколько лет назад DOC-модуль, который реализует встроенные непосредственно в чип функции офисной АТС.

Чтобы оправдать средства, вложенные в создание компонентов такой высокой степени интеграции, необходимо обеспечить широкий рынок сбыта для подобной продукции, что, в свою очередь, требует разработки соответствующих промышленных стандартов. Одним из наиболее показательных в этом отношении примеров является сеть ISDN, первые интегральные микросхемы для которой были разработаны более 10 лет назад.

11.1.1. Стратегические ориентиры

Разработчикам телекоммуникационных систем приходится работать в условиях постоянной конкуренции, поэтому успеха можно достигнуть лишь за счёт повышения производительности и экономичности.

При проектировании телекоммуникационных систем наряду с технологически усовершенствованными компонентами важное значение имеют универсальность и «гибкость». Наличие большого количества аппаратных средств и программно-аппаратных модулей от различных производителей обеспечивает для пользователей возможность выбора оптимизированных по стоимости решений. Предлагаемые компанией Infineon интегральные микросхемы имеют стандартные интерфейсы, которые, однако, можно «комбинировать» при разработке специализированных систем. Таким образом, требуются меньшие инвестиции в разработку, ускоряется процесс вывода продукции на рынок и снижаются общие затраты.

Интегрированные решения, разработанные по заказу потребителей

Эти решения базируются, главным образом, на стандартных системных решениях. Вместе с тем, используя модульную архитектуру, разработчики компании Infineon могут «собирать» заказные системы на основе специализированных стандартных компонентов, предназначенных для конкретного применения. Такая возможность особенно привлекательна с точки зрения пользователей, для которых важно обеспечить быструю разработку перспективной продукции.

11.1.2. Высокие темпы инноваций

Технологии производства ИС также имеют определяющее значение для достижения долгосрочных успехов на рынке телекоммуникаций. Особенно велики темпы инноваций в производстве модулей (микросхем) памяти. Так, их производительность (объём памяти) удваивается каждые 18 месяцев. Совершенствование логических ИС также идёт всё быстрее, а благодаря КМОП-технологиям совершенствуется и производство модулей, предназначенных для обработки смешанных сигналов. В результате этих процессов уже сегодня достигнут высокий технологический уровень производства ИС для систем связи.

Производственное оборудование расположенного в Германии в мюнхенском районе Перлах (Munchen-Perlach) завода компании Infineon позволяет использовать наиболее современные комплексные технологии для создания продукции, соответствующей высшим стандартам качества. Благодаря непосредственному взаимодействию инженеров завода с заказчиками, все их требования удовлетворяются в максимально короткие сроки, чем обеспечивается быстрый запуск продукции в производство. Наличие по соседству, в германском Регенсбурге, ещё одного завода (производственного подразделения Infineon) позволяет более гибко реагировать на запросы рынка.

11.1.3. Коммутационные ИС

В настоящее время коммутационные ИС производства Infineon используются более чем в 25% кабельных сетей связи во всём мире. Для сетей ISDN этот показатель превышает 50%. Таким образом, подразделение коммутационных ИС компании Infineon занимает лидирующие позиции в соответствующем сегменте рынка. Компания Infineon в качестве партнёра помогает своим заказчикам осуществлять оптимизацию существующих и разработку новых систем связи, предлагая им функциональные и экономичные решения, удовлетворяющие как современным требованиям, так и требованиям, которые могут возникнуть в будущем.

Коммутационное оборудование становится всё миниатюрнее, в то время как его функциональность расширяется, а объёмы передаваемых данных стремительно увеличиваются, что, в свою очередь, требует экономически эффективных методов передачи данных. Это обеспечивается за счёт постоянного внедрения инновационных технологий, расширения списка базовых параметров, и, конечно, за счёт тесного сотрудничества производителей оборудования с его заказчиками по всему миру.

11.1.4. Сетевые интегральные микросхемы

Подразделение сетевых ИС компании Infineon занимается производством устройств для высокоскоростных сетей, в том числе локальных (LAN) и глобальных (WAN) сетей. Многоканальный интерфейс-

ный контроллер MUNICH32X Infineon является самым быстродействующим устройством для сетей передачи данных и входит в состав практически каждого сетевого маршрутизатора в мире.

Сети связи будущего должны иметь инфраструктуру, объединяющую системы передачи данных и телефонной связи, с использованием АТМ и других высокоскоростных систем. Компания Infineon в настоящее время разрабатывает новые технологические решения, благодаря которым системы связи, рассчитанные на обслуживание нескольких миллионов абонентов, можно будет создавать с использованием всего лишь пары сотен ИС. Слияние телекоммуникационных и информационных сетей особенно ярко проявляется при организации межсетевого взаимодействия. Здесь определяющую роль играют технические характеристики и возможности тех или иных систем. Разработанные Infineon программные симуляторы представляют собой один из примеров реализации этих возможностей. Использование симулятора позволяет заказчику начать «виртуальную» разработку системы ещё до того, как будут доступны соответствующие полупроводниковые компоненты.

11.1.5. Интегральные микросхемы оконечных устройств связи

Подразделение оконечных коммуникационных устройств Infineon производит широкий спектр ИС, предназначенных для передачи голоса, данных и видео. Главным образом, они применяются в цифровых телефонах и автоответчиках, в базовых станциях беспроводных телефонов, а также в персональных компьютерах и системах видеосвязи. К числу новинок здесь можно отнести однокристалльные телефонные модули, INCA (Integrated Network Communications Architecture — интегрированная сетевая архитектура для учрежденческой связи) и различные устройства семейства Linecard Transceiver (трансиверы линейных карт телефонной связи).

Растущий обмен информацией через Интернет и развитие системы удалённой (надомной) работы в существенной степени

определяют быстрый рост требований к пропускной способности каналов передачи. Аналоговые модемы способны удовлетворить этим требованиям лишь при определённых условиях. Шаг вперёд, по сравнению с ними, представляют собой устройства ISDN, обеспечивающие достаточную скорость передачи данных при вполне приемлемой цене. Компания Infineon — одна из немногих, кто стоял у истоков развития технологии ISDN, а сегодня производит в широком ассортименте ISDN-модули. Применение продукции Infineon, благодаря её модульной архитектуре и стандартизации интерфейсов, предоставляет пользователям оптимальную свободу и гибкость при разработке своих собственных устройств, повышая тем самым их конкурентоспособность.

Одним из базовых элементов этой стратегии является развиваемая Infineon модульная ISDN-ориентированная архитектура (IOM-2). В рамках этой архитектуры могут быть спроектированы как различные модули с высокой степенью интеграции, так и пассивные или активные ISDN-компоненты со встроенными функциями аудио, видео или факс-модема. Основной упор здесь делается на разработку комплексных системных решений, которые смогут впоследствии с успехом применяться в сотнях различных проектов по всему миру.

В последующих разделах дано описание некоторых модулей, выбранных из очень широкого спектра ISDN-продукции.

Высокоскоростное соединение с сетью Интернет может быть, однако, реализовано лишь с использованием технологии DSL (Digital Subscriber Line — цифровая абонентская линия). В настоящее время разработано немало стандартных DSL-протоколов, а в будущем их количество, несомненно, ещё более возрастет, что приведёт к дальнейшему увеличению скорости передачи данных. Доступные на сегодняшний день DSL-протоколы передачи данных представлены на **Рис. 11.1**.

Краткое описание этих методов передачи данных дано в разделе 11.10. Стандартный протокол ADSL2, сменивший устаревший ADSL, рассматривается более подробно.

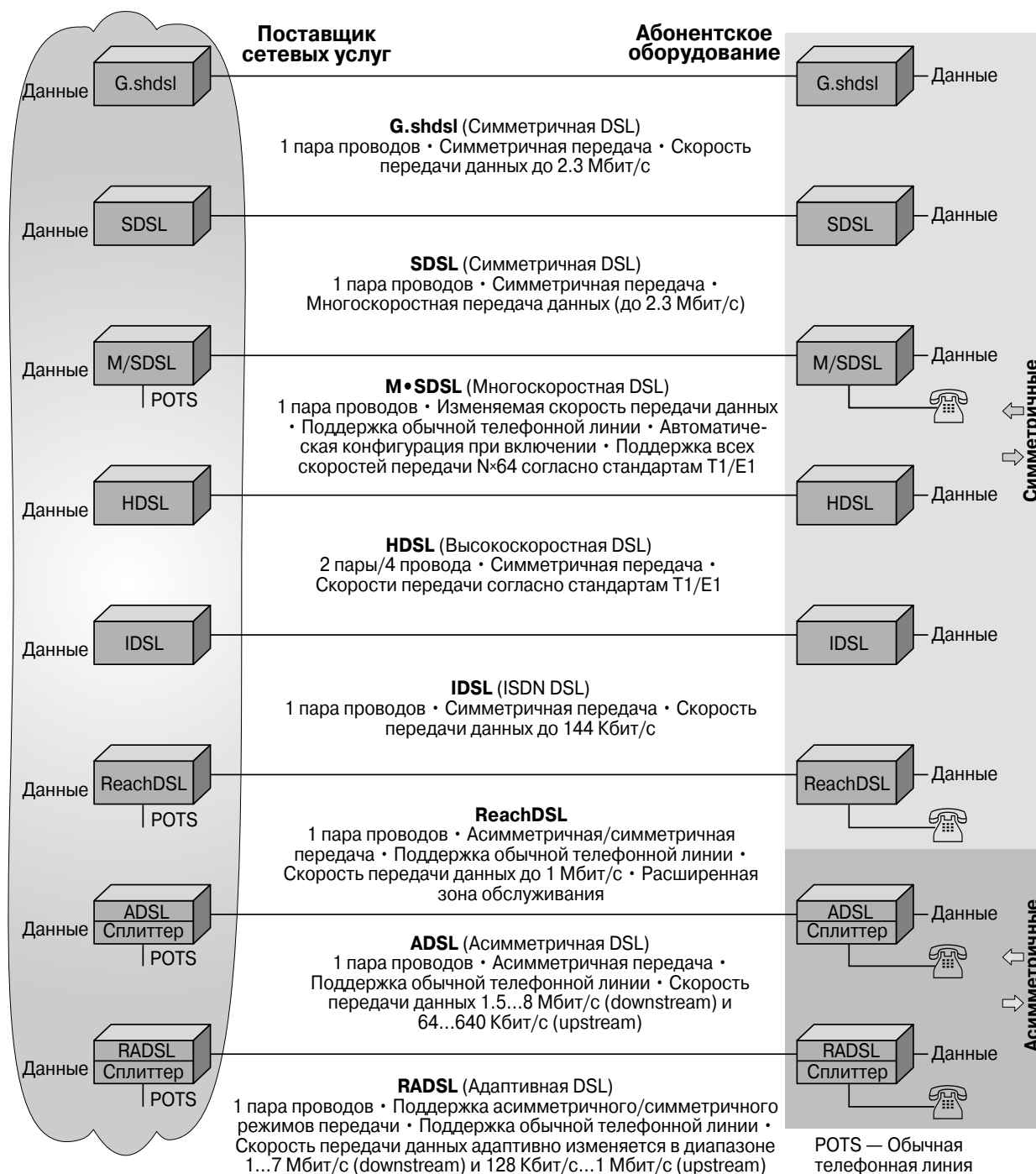


Рис. 11.1. Доступные в настоящее время DSL-протоколы передачи данных.

11.2. ISDN: от телефонной станции к абоненту

Широкий выбор полупроводниковых компонентов с высокой степенью интеграции гарантирует возможность реализации практически безотказной системы связи в сети ISDN. При использовании «интеллектуальных» сетевых оконечных устройств цифровое и аналоговое оконечное оборудо-

вание могут работать рядом друг с другом (совместно).

Благодаря более высокой степени интеграции, ISDN-микросхемы второго поколения производства Infineon требуют минимального количества внешних компонентов и поддерживают ряд дополнительных функций. Например, фидер S-интерфейса ISDN (ISDN-S Interface Feeder — ISFC) предназначен для работы в качестве входного фор-

мирователя сигналов (feeder circuit) для S-интерфейса, заменяя собой большие реле и трансформатор. Другое устройство, однокристалльный контроллер сетевого окончания ISDN (ISDN Network Termination Controller — INTC), совмещает в себе трансиверы U- и S-интерфейсов, контроллер HDLC (High-level Data Link Control — высокоуровневое управление каналом передачи данных) и порт IOM-2, обеспечивая тем самым возможность непосредственного подключения кодек-фильтра.

Использование совместно с цифровыми линейными картами восьмиканального U-трансивера позволяет сэкономить место на схемной плате и, соответственно, снизить её стоимость. Контроллер на базе DSP-процессора может обслуживать до трёх таких восьмиканальных U-трансиверов. Помимо обслуживания 24 каналов, он также осуществляет ряд дополнительных функций, таких как режим конференции или музыкальная заставка на время удержания вызова. Встроенный контроллер питания управляет подачей напряжения от аккумуляторных батарей на U-линию, а также осуществляет такие важные функции, как ограничение тока и защита от перенапряжения. Эта новая ИС заменяет большое количество дискретных компонентов, использовавшихся ранее на цифровых линейных картах.

11.2.1. Функциональная структура ISDN

ISDN — это цифровая сеть, основанная на использовании сквозных соединений (end-to-end connection — соединение непосредственно между двумя конечными точками сети) и поддерживающая широкий

спектр услуг, среди которых передача голоса и данных. Все абонентские устройства, независимо от того, телефон ли это, компьютер, факсимильный аппарат или, скажем, телевизор, получают информацию из телекоммуникационной сети и посылают её туда в виде цифровых потоков данных (bit streams). Таким образом, различные устройства осуществляют доступ к одной и той же сети по одной и той же абонентской линии.

На **Рис. 11.2** приведена функциональная схема ISDN. Четыре функциональных блока между абонентским оконечным устройством и сетью можно объединить в так называемый соединительный элемент доступа (Access Connection Element — ACE).

Местная ISDN-станция (Local Exchange — LE) включает в себя локальное оконечное оборудование (Local Termination — LT), предназначенное для работы с абонентским шлейфом, и оконечную станцию телефонной сети (Exchange Termination — ET), которая «отвечает» за функции коммутации собственно с сетью ISDN.

Сетевое окончание (оконечное оборудование сети) типа 1 (NT1) физически завершает соединение между пользователем сети (абонентом) и локальным оконечным оборудованием (LT). Оно управляет подачей питания, осуществляет контроль линии связи, преобразование протоколов обмена сигналами, а также мультиплексирует каналы В и D. Сетевое окончание типа 2 (NT2) задействуется опционально (т.е. в случае необходимости). Это оборудование предназначено для работы в локальных сетях или с офисными АТС и, как правило, не используется в домашних сетях.

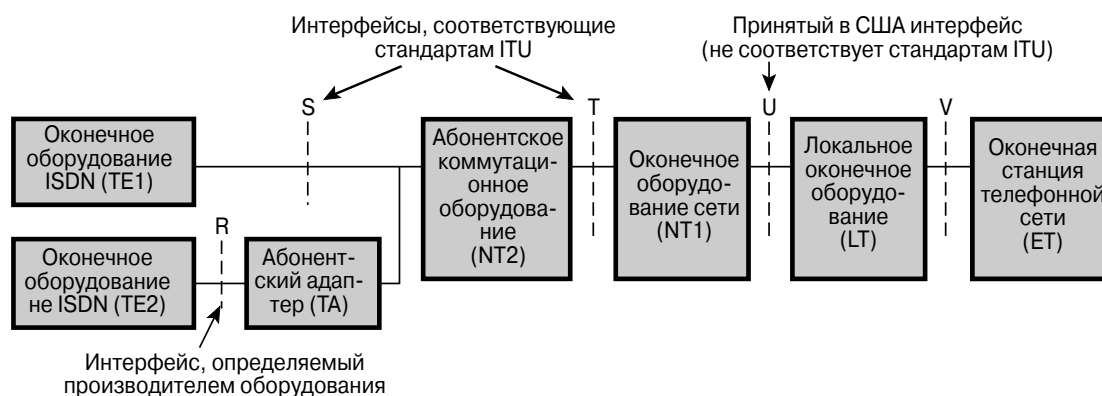


Рис. 11.2. Функциональные блоки сети ISDN и точки подключения в соответствии с моделью Международного союза электросвязи (ITU).

Оконечное оборудование типа 1 (TE1) представляет собой любое пользовательское оконечное устройство, совместимое с протоколом ISDN, например цифровой телефон. Оконечное оборудование типа 2 (TE2) — это, напротив, оборудование, не поддерживающее стандарт ISDN, например аналоговый телефон. Для его подключения к сети ISDN требуется абонентский (терминальный) адаптер (ТА). Существуют также более сложные, «интеллектуальные» сетевые окончания, объединяющие в себе функции NT1 и ТА.

В ISDN используются так называемые опорные точки (reference points), которые указывают на связь между различными протоколами, используемыми различными интерфейсами. Например, если устройство типа NT2 в домашней сети отсутствует, то S- и T-интерфейсы являются идентичными (см. Рис. 11.2). Более подробно взаимосвязи между блоками ET, LT и NT1 показаны на функциональной схеме, приведённой на Рис. 11.3.

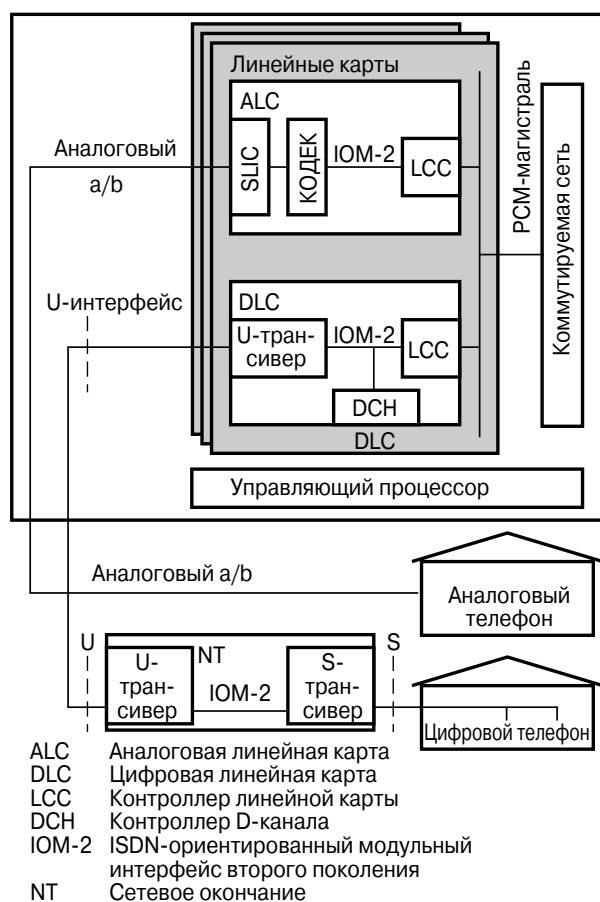


Рис. 11.3. Цифровая система коммутации с аналоговыми и цифровыми линиями связи.

ISDN-ориентированный модульный интерфейс IOM-2 (ISDN-Oriented Modular) представляет собой проводной интерфейс и может использоваться при соединении между любыми приёмопередающими ИС, кроме ИС, предназначенных для первичных соединений. Он включает в себя две однонаправленные линии передачи данных, а также линии кадровой синхронизации и синхронизации данных. Используя один интерфейс, можно управлять и программировать до восьми цифровых приёмопередающих модулей через одну ИС контроллера. На Рис. 11.4 приведена структура субканала интерфейса IOM-2.



Рис. 11.4. Формат кадра при передаче данных через интерфейс IOM-2, при управлении до 8 приёмопередающими модулями с помощью одной микросхемы контроллера.

Интерфейс IOM-2 позволяет значительно сократить количество линий, поскольку каждый из трансиверов (приёмопередатчиков) программируется через канал MONITOR (Контроль), что не требует его постоянного подключения к микроконтроллеру. Один интерфейс IOM-2 может обслуживать, например, восемь линий связи U-типа. Соответственно, в состав контроллера линейной карты (ELIC) может входить четыре интерфейса

ИОМ-2, благодаря чему обеспечивается подключение к одной цифровой линейной карте до 32 абонентов сети ISDN.

11.2.2. Цифровые линейные карты

Цифровая линейная карта, согласно модели ИТУ, функционирует как блок ЛТ (локального оконечного оборудования) сети ISDN (см. Рис. 11.2). Она осуществляет коммутацию между РСМ-магистралью (магистральной линией связи с импульсно-кодовой модуляцией сигнала) и абонентскими линиями (абонентским шлейфом), реализует поддержку протокола доступа к D-каналам (если используется архитектура с распределёнными D-каналами) и подаёт напряжение питания на U-линии связи (Рис. 11.5).

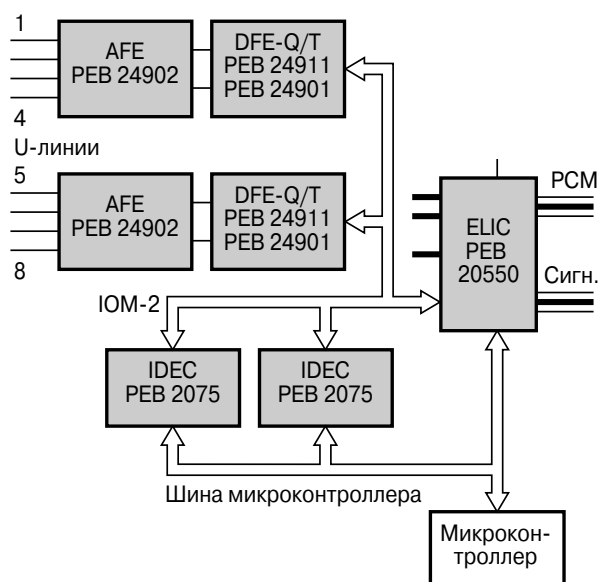


Рис. 11.5. Структурная схема цифровой линейной карты (алгоритм 2B1Q/4B3T), осуществляющей коммутацию между РСМ-магистралью и абонентскими линиями (абонентским шлейфом).

11.2.3. Контроллер расширенной линейной карты (ELIC)

Контроллер ELIC (ИС PEB20550H) осуществляет мультиплексирование четырёх D-каналов и имеет конфигурируемый интерфейс CFI (Configurable Interface) для подключения трансивера. Контроллер может работать в режимах «4 канала РСМ» или «4 канала ИОМ-2». В режиме ИОМ-2 могут быть заданы различные тактовые частоты и скорости передачи данных; при этом

возможна коммутация до 32 цифровых или 64 аналоговых линий. Кроме того, в зависимости от заданной скорости передачи данных, для осуществления связи ИС с РСМ-магистралью может быть задействовано до четырёх дополнительных программируемых РСМ-интерфейсов. Максимально возможные скорости передачи данных, таким образом, составляют 4×2 Мбит/с, 2×4 Мбит/с или 1×8 Мбит/с. Используя матрицу 128×128, контроллер ELIC может осуществлять подключение любого канала передачи голоса или данных (которые кодируются временными слотами по 8 бит каждый) между интерфейсами CFI и РСМ. Контроллер также поддерживает канал MONITOR и обеспечивает передачу кодов управления/индикации (C/I) в соответствии с протоколом для интерфейса ИОМ-2. Наконец, данная микросхема содержит встроенный HDLC-контроллер, служащий для передачи сигнальной информации между линейной картой и комбинаторной логической схемой. В качестве альтернативы контроллеру ELIC может применяться EPIC (Extended PCM Interface Controller — контроллер расширенного РСМ-интерфейса), который выполняет те же функции, за исключением HDLC-контроллера.

11.2.4. Контроллер ISDN-станции с D-каналом (IDEC)

Контроллер IDEC (ИС PEB 2075) оптимизирован для обработки сигнальной информации, передаваемой по D-каналу, которая осуществляется на цифровой линейной карте. С этой целью ИС PEB 2075 содержит четыре встроенных независимых HDLC-контроллера, что обеспечивает возможность обрабатывать информацию D-каналов четырёх абонентских линий одновременно. Каждый канал содержит контроллер LAPD (Link Access Protocol, Channel D — протокол доступа к каналу связи, D-канал) и 64-байтную быстродействующую FIFO-память на каждое направление передачи. Чтобы снизить расходы на программное обеспечение, основной упор сделан на поддержку коммутационных функций 2-го уровня согласно модели OSI/ISO. За счёт этого, а также других характеристик контроллера удаётся существенно снизить динамическую загрузку микропроцессорной системы. С помощью протоколов кана-

ла MONITOR и каналов управления/индикации (C/I) интерфейса IOM-2 контроллер IDEC обеспечивает возможность управления периферийным оборудованием. Поскольку каждый интерфейс IOM-2 может коммутировать до 8 абонентских линий, для работы с ним требуется два IDEC-контроллера. Всего же для обработки информации D-каналов всех 32 абонентских линий, обслуживаемых одной цифровой линейной картой, используются восемь ИС.

11.2.5. U-трансивер для аналогового интерфейса

Аналоговый интерфейс (Analog Front-End — AFE) и цифровой интерфейс (Digital Front-End — DFE) (ИС РЕВ 24902 и РЕВ 24911/01) образуют четырёхканальный U-трансивер цифровой линейной карты. В зависимости от линейного кода, используемого для U-линии, 2B1Q или 4B3T, требуется РЕВ 24911 DFE-Q или РЕВ 24901 DFE-T. Аналоговый интерфейс может обрабатывать оба этих кода. При четырёх ИЕС-трансиверах (AFE + DFE) потребуется дуплексный четырёхканальный U-трансивер на базе однокристалльного трансивера РЕВ 2091 ИЕС-Q для U-интерфейса сети ISDN. Указанный трансивер удовлетворяет всем существующим на настоящее время требованиям ANSI (Американский национальный институт стандартов), ETSI (Европейский институт стандартов по телекоммуникациям) и CNET. Если используется метод подавления эхо-сигнала, то безотказная работа канала передачи возможна при длине линии до 8 км.

Основными особенностями данного U-трансивера являются:

- наличие встроенного блока «автопробуждения», который активирует ИС, когда она переходит в режим пониженного энергопотребления;
- адаптивное эхоподавление;
- адаптивный эквалайзер;
- автоматический выбор полярности входного сигнала;
- автоматическая регулировка усиления;
- восстановление тактовой синхронизации;
- низкая потребляемая мощность.

Поскольку каждый чипсет поддерживает до четырёх абонентских линий, для работы с интерфейсом IOM-2 требуется два таких модуля. Соответственно, на цифровой линейной карте, предназначенной для обслуживания 32 абонентских линий и использующей для этого контроллер ELIC с четырьмя интерфейсами IOM-2, должны размещаться 8 четырёхканальных чипсетов ИЕС.

11.2.6. Контроллер высоковольтного источника питания ISDN (IHPC)

Схема включения контроллера IHPC (ИС РЕВ 2026) в составе линейной карты показана на **Рис. 11.6**. Данная ИС управляет питанием U-линий от центральной телефонной станции (АТС). Она выдерживает напряжение до 130 В и реализует такие критические с точки зрения надёжности системы функции, как ограничение тока и защита от перенапряжения. Кроме того, в контроллер встроен блок, отключающий его в случае недопустимого повышения температуры, благодаря чему ИС может без повреждений работать в жёстких условиях окружающей среды. Данная микросхема предназначена для замены устройств, состоящих из реле и дискретных компонентов.

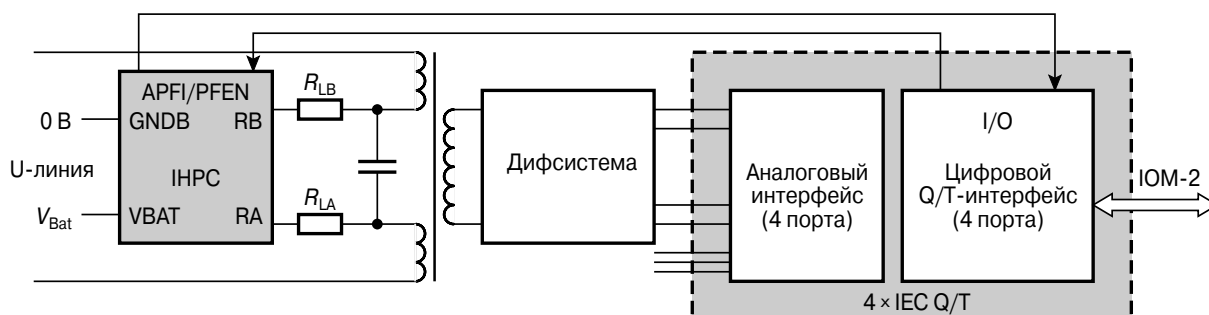


Рис. 11.6. IHPC-контроллер осуществляет питание U-линии от АТС.

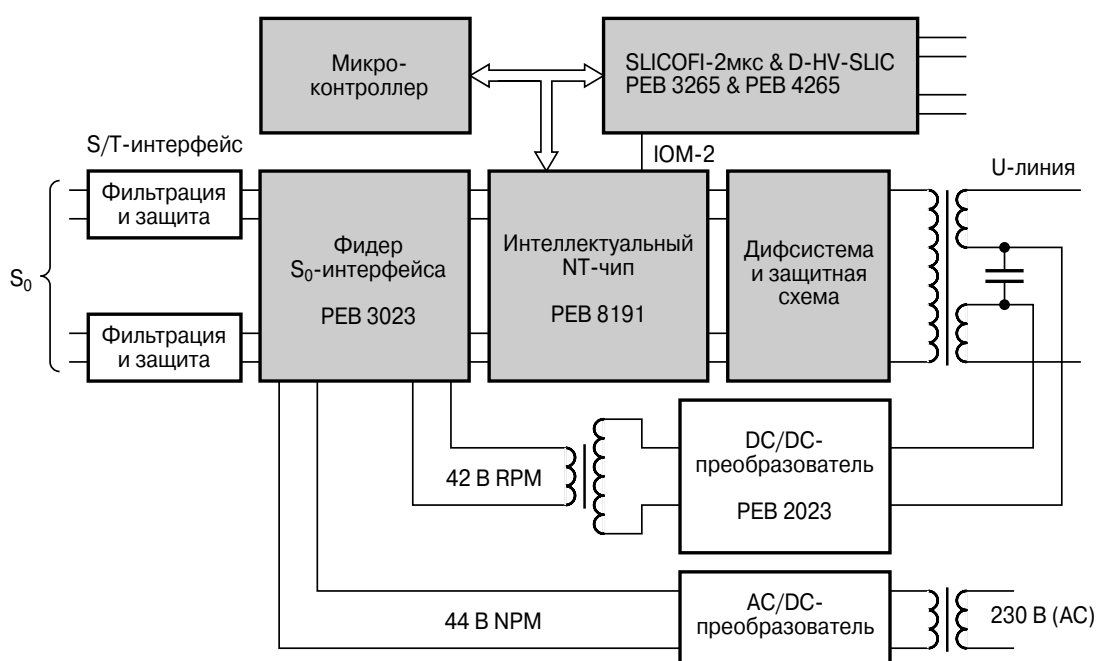


Рис. 11.7. Интеллектуальное сетевое окончание (INTC) — расширенная версия стандартного сетевого окончания NT1.

11.2.7. Сетевое окончание

В настоящее время существует два основных типа сетевых окончаний. Стандартное сетевое окончание NT1 преобразует двухпроводной U-интерфейс в четырёхпроводной S₀-интерфейс. Это устройство 1-го (физического) уровня, которое обеспечивает передачу информации по В- и D-каналам между локальной станцией и абонентским оконечным оборудованием (ТЕ). Помимо этого, стандартное NT1 подаёт питание на оконечное оборудование, а также предотвращает конфликты доступа, когда несколько абонентов пытаются «занять» один и тот же D-канал. Сигнал, поступающий на U-интерфейс, кодируется одним из двух кодов (2B1Q или 4B3T). Компания Infineon Technologies производит ИС, поддерживающие как тот, так и другой код.

Сетевое окончание второго типа (NT2) представляет собой «интеллектуальное NT» (см. Рис. 11.7). Помимо стандартных функций NT1, оно обеспечивает возможность подключения для тех пользователей, кто хотел бы оставить свои старые аналоговые оконечные устройства, но при этом иметь возможность доступа к ISDN. Интеллектуальное сетевое окончание соответствует стандартному NT1, но дополнительно имеет микропроцессор, кодек-фильтр и схему

интерфейса абонентской линии (Subscriber Line Interface Circuit — SLIC).

11.2.8. Контроллер интеллектуального сетевого окончания (INTC)

На Рис. 11.8 показан контроллер PEB 8191H, который совмещает в себе функции S- и U-трансиверов, а также содержит HDLC-контроллер.

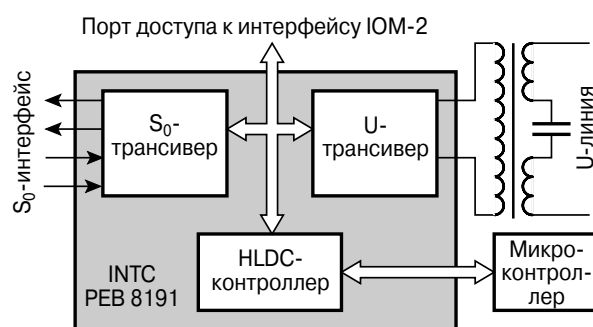


Рис. 11.8. Контроллер «интеллектуального» сетевого окончания INTC (PEB 8191), совмещающий функции S₀- и U-трансиверов.

Он обрабатывает линейный код 2B1Q в соответствии с рекомендациями ETSI ETR 080 1995 и ANSI T1E1.601 1992 и реализует протокол S/T-интерфейса в соответствии с рекомендацией 1.430 ITU. При использовании параллельного или последовательного

интерфейса микроконтроллера, встроенный HDLC-контроллер позволяет осуществлять доступ к В-каналу, D-каналу и каналам обмена данными (интеркоммуникационным каналам), предназначенным для обмена данными между блоками. Аппаратно поддерживаются функции протокола LAPD, соответствующие 2-му уровню модели OSI/ISO. Помимо функции преобразования U-интерфейса в S-интерфейс, контроллер INTС содержит также интерфейс IOM-2, благодаря чему может напрямую подключаться к кодеку.

Семейство ИС, предназначенных для работы в качестве контроллеров сетевых окончаний, дополняют ещё две модификации ИС РЕВ 8191. Первая из них, РЕВ 8091, функционально идентична РЕВ 8191, однако не содержит ни HDLC-контроллера, ни интерфейса IOM-2. Она предназначена для работы в схеме стандартного сетевого окончания NT1, когда не требуется подключение каких-либо дополнительных аналоговых линий. Вторая модификация (РЕВ 8090) отличается лишь тем, что использует линейный код 4В3Т.

11.2.9. DC/DC-преобразователь для сети ISDN (IDDC)

DC/DC-преобразователь (ИС РЕВ 2023) построен по принципу импульсного источника питания с ШИМ-регулированием выходного напряжения. Он был специально разработан для применения в телефонии и сетях ISDN и полностью соответствует рекомендациям ITU для источников питания S-интерфейсов. Требуя для работы всего лишь несколько внешних компонентов, IDDC служит стабильным источником постоянного тока при напряжении питания 5 В. Кроме того, его можно запрограммировать таким образом, чтобы получить более высокие выходные напряжения для питания S-интерфейса. Напряжение питания DC/DC-преобразователя может регулироваться в различных диапазонах, например 12...80 В или 20...120 В. В микросхему РЕВ 2023 также встроены программируемая защита от перегрузки по току, контроль повышенного напряжения и функция плавного запуска. Благодаря малым тепловым по-

терям и высокой точности поддержания опорного напряжения данная ИС идеально подходит для работы в сетевых окончаниях, которые весьма требовательны по отношению к рассеиваемой мощности.

11.2.10. Схема фидера S-интерфейса ISDN (ISFC)

Для того чтобы передать данные пользователя от сетевого окончания NT1 через S-интерфейс к оконечному оборудованию, неминуемо приходится использовать ряд дополнительных схем (см. **Рис. 11.9**). Переменное напряжение питания поступает через S-интерфейс (четырёхпроводной), поэтому требуется иметь не один, а два трансформатора. Для переключения между нормальным режимом питания (Normal Power Mode — NPM) и режимом питания с ограничением по мощности (Restricted Power Mode — RPM) используется реле. Выбор режима зависит от того, является ли источник питания локальным или питание поступает через U-интерфейс. Для каждого из режимов питания нужны дополнительные схемы ограничения тока. Ещё одним необходимым элементом схемы фидера является генератор сброса, который вырабатывает для всех ИС, входящих в состав сетевого окончания (NT1), команду сброса (reset), когда напряжение питания достигает заданной величины.

Использование микросхемы ISFC (РЕВ 3023) позволяет уменьшить количество дискретных компонентов, требуемых для работы сетевого окончания. ИС содержит генератор сброса и индивидуально программируемые устройства ограничения тока в линии для обоих режимов питания (NPM и RPM). Она заменяет оба трансформатора в схеме S-интерфейса и осуществляет автоматическое переключение между режимами NPM и RPM. Кроме того, данная микросхема отличается очень низкой рассеиваемой мощностью. Она совместима не только с контроллерами интеллектуальных сетевых окончаний INTС, но и с представителями предыдущего поколения ISDN-устройств, например SBC¹⁾ (РЕВ 2080), SBCX (РЕВ 2081) и ISAC-S (РЕВ 2085, РЕВ 2086).

¹⁾ SBC (S-Bus interface Circuit) — схема интерфейса S-шины. — *Примеч. ред.*

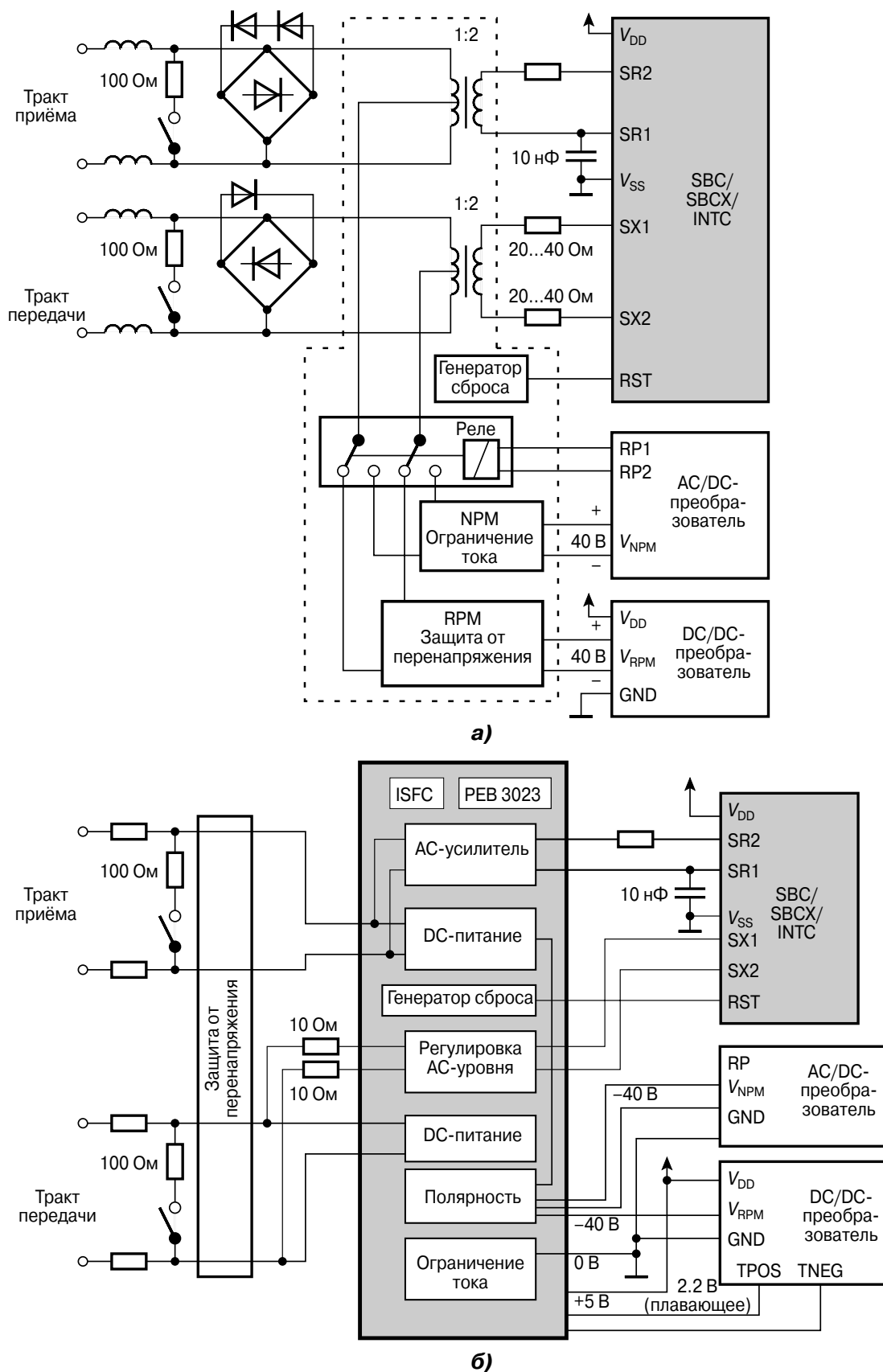


Рис. 11.9. Использование контроллера ISFC (ИС РЕВ 3023) позволяет сократить количество требуемых компонентов при реализации сетевого окончания (NT): *а* — схема на дискретных компонентах; *б* — схема включения ISFC.

11.2.11. Двухканальный кодек-фильтр с цифровой обработкой сигнала

Оптимальным решением при построении «интеллектуальных» сетевых окончаний (INTC) является использование двухканального чипсета DuSLIC, состоящего из микросхем SLICO-F12 (PEB 3265) и Dual-HVSLIC (PEB 4265). Он обеспечивает подключение интерфейса IOM-2, входящего в состав INTC, к двум аналоговым телефонным оконечным устройствам, а его характеристики соответствуют требованиям ITU, EIA и Bellcore LSSGR. Чипсет имеет два независимых программируемых цифровых фильтра, что даёт возможность подстройки под параметры телефонных линий, принятые в различных странах. Кроме того, чипсеты семейства DuSLIC содержат генератор DTMF (Dual-Tone Multi-Frequency — двухтональный многочастотный набор) и интерфейс микропроцессора, а также поддерживает функции автоматического выбора полярности сигнала на линии и передачи данных в режиме «on-hook» (при положенной трубке).

11.3. Оконечное оборудование ISDN: абонентское окончание

Всё большее количество пользователей во всём мире осознают для себя преимущества сети ISDN. Помимо эффективного использования полосы частот (например, за счёт методов уплотнения канала связи), достоинствами ISDN являются возможность быстрого установления соединения и различные дополнительные (в зависимости от региона) услуги, а также высокая гибкость в построении системы и весьма низкие эксплуатационные расходы.

В настоящее время имеется полный набор ISDN-трансиверов, поддерживающих следующие интерфейсы:

- интерфейс базового доступа (Base Rate Interface — BRI);
- интерфейс первичного доступа (Primary Rate Interface — PRI);
- U-интерфейс (2B1Q).

Для абонентских адаптеров ISDN или PC-карт предлагаются соответствующие интегральные микросхемы. Они предназначены для реализации как чисто цифровых, так и гибридных решений (т.е. для тех случаев, когда вместе с сетью ISDN требуется

подключить модем или факс). Эти ИС применяются также в системах видеосвязи или при одновременной передаче голоса и данных (voice-over data).

Таким образом, перед разработчиками в области телефонии, систем передачи данных и видеосвязи открываются широкие возможности по проектированию самого различного оконечного оборудования.

Классическое оконечное устройство, подключённое со стороны абонента, — это, конечно же, телефонный аппарат. Здесь возможны самые разнообразные варианты исполнения, начиная со стандартной «трубки» и заканчивая телефонным аппаратом с дуплексной связью hands-free и конференц-связью.

11.3.1. Телефон

Для разработки экономически эффективных моделей телефонных аппаратов компания Infineon Technologies предлагает кодеки SCOUT-S (PSB 2181/PSB 2182) и SCOUT-SX (PSB 2183/PSB 2184) с последовательным или параллельным интерфейсом микроконтроллера. Микросхемы SCOUT-S содержат все необходимые функциональные блоки, такие как аналоговый интерфейс (Analog Front-End — AFE), HDLC-контроллер и S₀-трансивер, а микросхемы SCOUT-SX, кроме того, поддерживают полудуплексный режим громкой связи (по принципу «Stronger Wins»). Благодаря реализации полностью цифровой системы hands-free, телефоны на основе SCOUT-SX при сравнительно небольшой цене характеризуются улучшенными техническими параметрами. Подавление эхо-сигналов и сигналов обратной связи, возникающей между громкоговорителем и микрофоном, осуществляется за счёт того, что сигнал, приходящий с линии, всегда передаётся без ослабления.

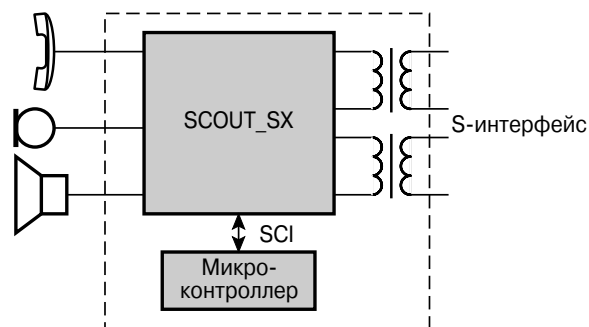


Рис. 11.10. Телефон SCOUT-SX.

Аналоговый интерфейс обеспечивает возможность непосредственного подключения двух микрофонов и двух громкоговорителей (см. **Рис. 11.10**). Это позволяет использовать телефонный аппарат как в обычном режиме, так и в режиме hands-free. К третьему входу устройства может быть (в случае необходимости) дополнительно подключён внешний микрофон системы громкой связи. Кодек имеет следующие характеристики:

- полное соответствие спецификациям ITU-T G.712 и ETSI (NET-33);
- импульсно-кодовая модуляция по А-закону/μ-закону (ITU-T G.711) и 8/16-битовые линейные данные; маскирование данных в кодеке;
- независимо программируемые усилители для всех аналоговых входов и выходов;
- высококачественная цифровая обработка голоса и данных, используемая, например, для организации трёхсторонней конференц-связи;

- два корректирующих фильтра на передачу и на приём;
- регулируемая противоместная схема;
- универсальный генератор DTMF и вызывного сигнала.

В режиме оконечного устройства S_0 -трансивер обеспечивает интерфейс для сети ISDN. Таким образом, аппаратно полностью реализуется уровень 1 протокола ISDN. Функции более высоких уровней могут быть реализованы с помощью HDCL-контроллера, а также специального модуля, предназначенного для осуществления арбитража на шине TIC.

INCA-S (PSB 21483) представляет собой однокристальное решение, предназначенное для построения полнофункционального телефона высшего класса. Помимо S_0 -трансивера, HDCL-контроллера и схемы арбитража шины TIC, данная ИС содержит DSP-процессор с ПЗУ микропрограмм и 16-битный микроконтроллер с USB-интерфейсом (**Рис. 11.11**).

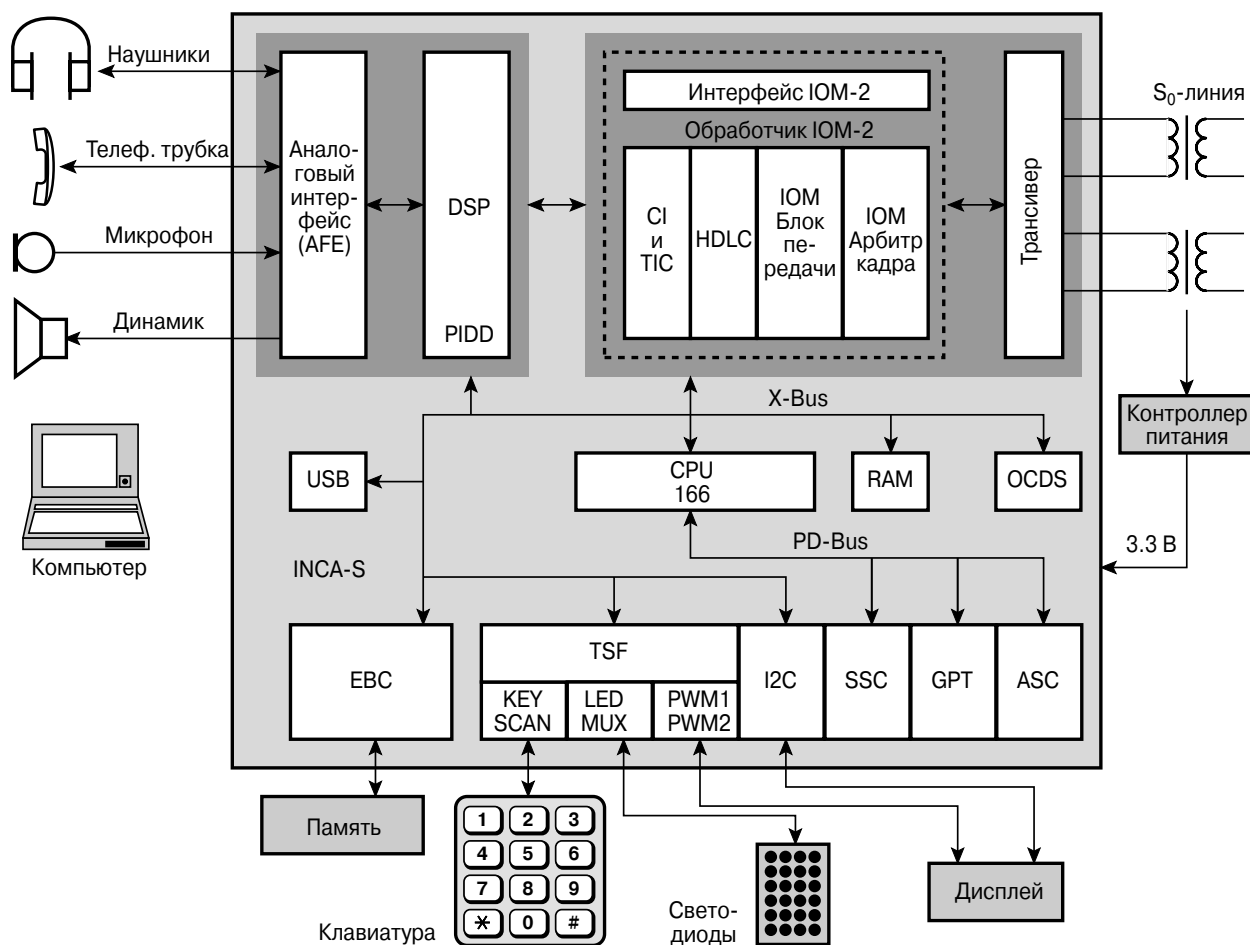


Рис. 11.11. Блок-схема INCA-S.

Аналоговый интерфейс этой микросхемы рассчитан на подключение трёх микрофонов и трёх громкоговорителей. Следовательно, пользователь имеет в своём распоряжении возможность использовать телефонную трубку, наушники с микрофоном или громкую связь. Помимо специфических телефонных модулей, таких как генератор вызывного сигнала и DTMF-генератор, микропрограммное обеспечение DSP-процессора позволяет реализовать дуплексный алгоритм громкой связи (hands-free) с подавлением эхо-сигнала. Дуплексный режим означает, что участники разговора имеют возможность говорить и слушать собеседника одновременно. Качество передачи голоса дополнительно улучшается за счёт наличия цифровых фильтров и схемы подавления внешних акустических шумов. Сумматор предназначен для подключения схемы, обеспечивающей трёхстороннюю конференц-связь.

16-битный микроконтроллер построен на процессорном ядре C166 и имеет встроенный модуль отладки программ (OCDS), 2-Кбайт двухпортовую оперативную память (RAM) и 4-Кбайт расширенную память (XRAM). Микроконтроллер имеет выводы для непосредственного подключения к нему клавиатуры и светодиодных индикаторов; подключение дисплея осуществляется через интерфейс I²C. Интерфейс USB V1.1 поддерживает скорость передачи данных 12 Мбит/с и используется как для дистанционного управления телефоном, так и при передаче данных в компьютер. Функциональность модуля может быть дополнительно расширена благодаря использованию интерфейса IOM-2.

11.3.2. Сменные PC-карты

Экономически эффективный способ передачи данных для PC-карт обеспечивается благодаря использованию однокристального решения IPAC-X (PSB 21150). Этот высококачественный модуль поддерживает ряд специальных функций, что позволяет заметно снизить стоимость компонентов и печатной платы PC-карты.

В состав PC-карты входят PITA-2 (PCI-Interface for Telephony/Data Applications — PCI-интерфейс для систем телефонии и передачи данных), IPAC-X (ISDN PC Adapter Interface Circuit — схема ISDN-интерфейса для PC) и интерфейс линии (Рис. 11.12).

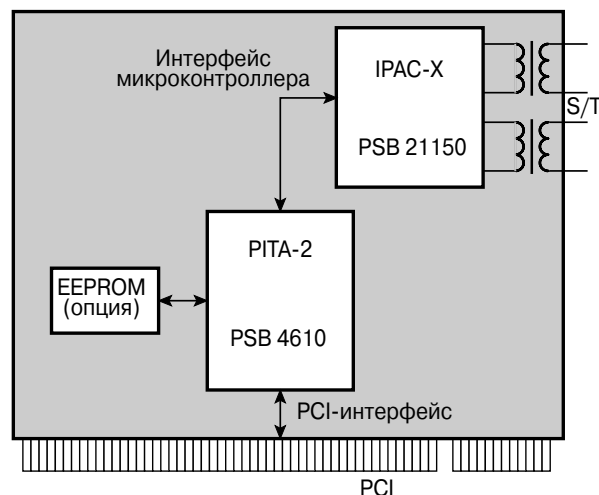


Рис. 11.12. PC-карта, в которой используется однокристальное решение IPAC-X.

Микросхема IPAC-X включает в себя S-трансивер и три HDLC-контроллера D-канала и двух В-каналов интерфейса базового доступа (BRI). Доступ к этим каналам может осуществляться через встроенный в чип параллельный интерфейс, а их буферизация — путём использования кольцевого FIFO-буфера с переменной верхней границей (до 64 байт для D-канала, до 2×128 байт для В-каналов). Доступ к В-каналам может осуществляться и через последовательный интерфейс (IOM-2), который позволяет подключать модуль кодека (например, SCOUT).

В приведённой на Рис. 11.12 схеме используется параллельный интерфейс микросхемы PITA-2, к которому подключён IPAC-X. С программной точки зрения доступ осуществляется так же, как и к обычному устройству с распределением памяти. В качестве опции к PITA-2 может быть подключена микросхема памяти EEPROM, предназначенная для хранения данных, определяемых производителем PC-карты, например идентификатора производителя, идентификатора устройства, идентификатора производителя подсистемы и идентификатора подсистемы устройства, а также соответствующих параметров системы управления электропитанием. Идентификатор производителя подсистемы и идентификатор подсистемы устройства также могут быть загружены путём переопределения выводов. Таким образом, можно программно распознавать различные PC-карты, использующие один и тот же модуль интерфейса.

11.3.3. Абонентский адаптер (ТА) и USB-адаптер S₀-интерфейса

Приведённое на **Рис. 11.13** схемное решение позволяет реализовать доступ к данным ISDN и функции абонентского адаптера при чрезвычайно высоком уровне интеграции.

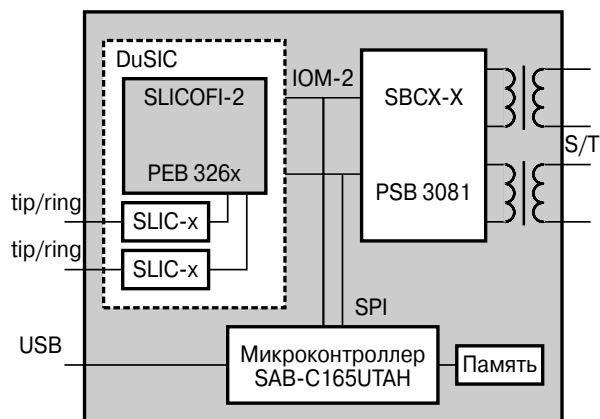


Рис. 11.13. Схема, сочетающая абонентский адаптер и USB-порт.

Основным элементом схемы является микроконтроллер C165UTAH, имеющий 16-битное ядро C166, четыре HDLC-контроллера для В- и D-каналов и контроллер USB V1.1, обеспечивающий скорость передачи данных 12 Мбит/с. Используя интерфейс IOM-2, микроконтроллер обеспечивает подключение к модулю S-трансивера (SBCX-X) и к двухканальному кодеку DuSLIC, имеющему, в свою очередь, два порта POTS (для подключения обычных аналоговых телефонных линий). Существует также возможность использования других кодеков, не совместимых с интерфейсом IOM-2; вместо него может использоваться РСМ-интерфейс микроконтроллера.

Если в пользовательском приложении не предполагается задействовать USB-порт, то оптимальным с точки зрения стоимости решением будет совместное использование SBCX-X и DuSLIC. При этом в качестве микроконтроллера, например, может применяться C165H.

11.3.4. Комбинированная схема NT1 и ТА

Комбинированное устройство NT1 + ТА разработано в Германии, но часто используется и в США. Оно позволяет осуществлять подключение к U-интерфейсу и обычным (POTS) телефонам.

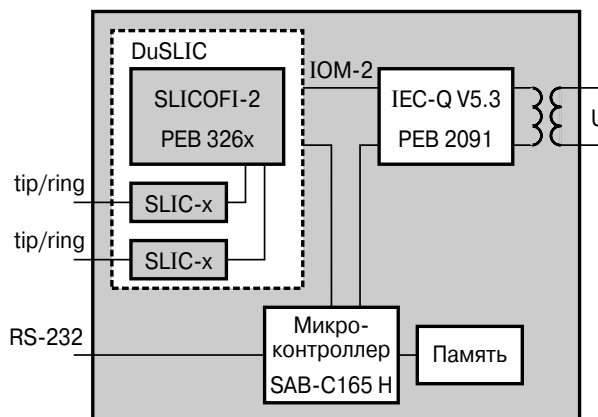


Рис. 11.14. Комбинированная схема сетевого окончания и абонентского адаптера (NT1 + ТА).

Блок-схема устройства приведена на **Рис. 11.14**. В устройстве реализован абонентский адаптер с портом RS-232. Оно включает в себя микроконтроллер C165H, модуль IEC-Q V5.3 с U-интерфейсом линии и двухканальный голосовой кодек DuSLIC для обычных телефонных линий (POTS). Подавитель эхо-сигналов ISDN (IEC-Q V5.3) содержит U-трансивер и диф-систему, осуществляющую преобразование двухпроводной линии в четырёхпроводную. Интерфейс U-линии представляет собой трансформатор. В качестве опции в интерфейс может быть встроена металлическая оконечная нагрузка линии. Обработку информации В- и D-каналов производит микроконтроллер C165H. Поскольку в его состав входят также четыре двунаправленных HDLC-контроллера, то для доступа к каналам 2В + D не требуется внешних HDLC-контроллеров.

11.3.5. Телефон высшего класса с USB-S₀-адаптером и функцией абонентского адаптера (ТА)

Компания Infineon предлагает недорогой вариант комбинированного устройства, сочетающего в себе функции телефона, USB-порта передачи данных и абонентского адаптера для подключения аналогового факсимильного аппарата. В нём используется телефонный модуль INCA-S и кодек DuSLIC.

Как уже упоминалось выше (см. подраздел 11.3.1.), INCA-S представляет собой полнофункциональный высокопроизводительный телефонный модуль со встроенным USB-адаптером. DuSLIC подключает-

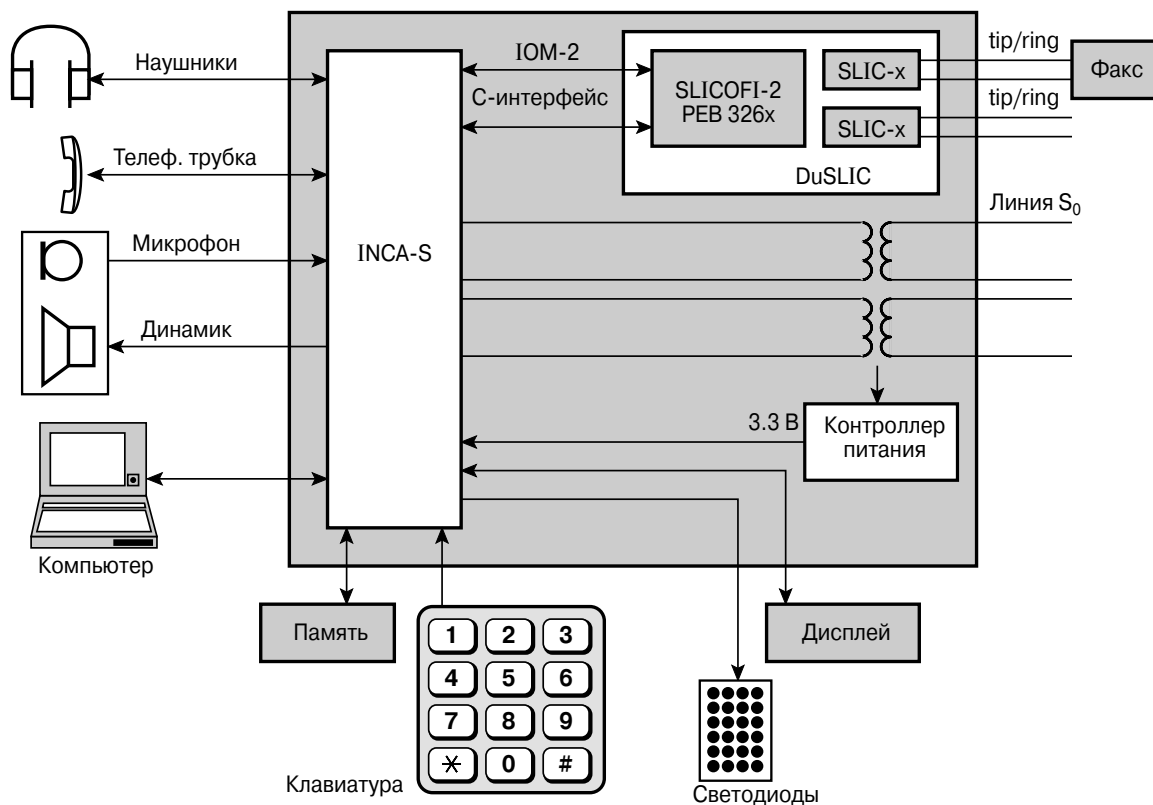


Рис. 11.15. Схема применения модуля INCA-S.

ся через интерфейс IOM-2, который обеспечивает поступление телефонных вызовов по двум аналоговым линиям (Рис. 11.15).

11.4. Образцы разработки для ISDN

Компания, выступающая на рынке телекоммуникаций как поставщик системного оборудования, должна обладать потенциалом по разработке и быстрому внедрению в производство конкурентоспособных устройств. Infineon Technologies является мировым лидером в области производства ИС для сетей ISDN и накопила многолетний опыт инновационных разработок в данной и других областях. Компания Infineon использует свои ноу-хау для дальнейшего совершенствования систем и полупроводниковых компонентов, применение которых позволяет значительно облегчить и ускорить процесс разработки устройств ISDN.

11.4.1. Комплексные решения — основа успешного маркетинга

Производители систем связи, выходящие на постоянно растущий глобальный рынок телекоммуникаций, сталкиваются с необходимостью решения целого ряда задач:

- Какие коммуникационные модули оптимально подходят для реализации требуемой системы?
- Возможна ли программная эмуляция тех или иных функций оборудования или требуемой производительности системы нельзя достичь без применения активных аппаратных средств с микроконтроллерным управлением?
- Использование каких вычислительных ресурсов требует выбранный телекоммуникационный протокол? Каким образом может быть обеспечена его поддержка в тех или иных странах?
- Как достичь соответствия системы международным стандартам?
- Имеется ли возможность без больших затрат разрабатывать оптимизированную по параметрам продукцию и быстро выпускать её на рынок?

Высокая конкуренция на телекоммуникационном рынке требует от производителей разработки экономически эффективной продукции, изготавливаемой по самым современным технологиям. В связи с этим на первый план выходит концепция построения системы в целом, поскольку наряду с совершенствованием аппаратного и про-

граммного обеспечения критическим фактором становится апробация системы.

Комплект эталонных плат

Система под общим названием «Reference Board Package» (Комплект эталонных, или демонстрационных плат) включает в себя аппаратное и программное обеспечение для типовых приложений, а также набор соответствующей документации. Различная справочная информация по тем или иным компонентам представлена в виде предложений по конструкции, электрических принципиальных схем, руководств по применению, результатов приёмо-сдаточных испытаний и испытаний на электромагнитную совместимость.

11.4.2. Аппаратное обеспечение

«ISDN Reference Board» (Эталонная плата ISDN) представляет собой PC-карту или внешний модуль, выполненный по самой современной технологии. В настоящее время, с появлением первых образцов инженерной реализации ISDN-модулей, появились и эталонные платы ISDN, спроектированные с учётом мирового опыта в области разработки полупроводниковых компонентов и схемотехники. К компьютеру они могут подключаться через стандартные интерфейсы (например, PCI или USB). Эталонная плата ISDN обеспечивает разработку решений, полностью соответствующих требованиям международного телекоммуникационного рынка.

11.4.3. Программное обеспечение

Помимо программного обеспечения, предназначенного для оценки параметров системы и позволяющего получить быстрый доступ к тем или иным функциям микросхем, в состав программного обеспечения эталонных комплектов для ISDN входят также пакеты протоколов В- и D-каналов. Пакет протоколов D-канала содержит протоколы, соответствующие американскому (NI-1, 5ESS, DMS100), японскому (INS) и европейскому (DSS-1) стандартам, т.е. может использоваться во всём мире. Кроме того, имеется встроенная поддержка дополнительных услуг, таких как автодозвон при занятости номера абонента (Completion of Calls to Busy Subscriber — CCBS). Пакет протоколов В-канала обеспе-

чивает поддержку HDLC, transp., X.75, V.110, V.120, T90NL и ISO 8208.

При передаче данных используются протоколы PPP (Point-to-Point Protocol — протокол точка-точка) или MLPPP (Multi Link PPP — многоканальный PPP). Кроме того, в состав программного обеспечения могут также входить демоверсии различных прикладных программ, таких как RVS-COM Lite компании RVS Data Technology или TELES Power Pack компании TELES.

11.4.4. Доступ к сети ISDN

Эталонная плата IPAC представляет собой оптимизированную пассивную ISDN PC-карту с S-интерфейсом. В её состав входят ISDN-модуль высокой степени интеграции — IPAC-X (схема ISDN-интерфейса для PC на микросхеме PSB 21150) и PC(S)-интерфейс с контроллером шины PCI. Микросхема PSB 21150 содержит три HDLC-контроллера для В- и D-каналов, а также встроенный S-трансивер.

Разделение потока данных осуществляется путём использования FIFO-буферов глубиной 128 байт для каждого из В-каналов и по 64 байт для каждого из направлений передачи D-канала. Когда буферы заполняются, производится их чтение под управлением контроллера прерываний или DMA-контроллера. Связь с внешними устройствами осуществляется с помощью последовательного PCM-интерфейса или интерфейса IOM-2; кроме того, линии портов ввода/вывода могут программироваться под различные функции. Микросхема IPAC-X поддерживает как режим ТЕ, так и режимы LT-S, LT-T или NT. Таким образом, она может применяться для решения различных задач, в том числе, для построения офисных АТС. В данной микросхеме впервые в мире реализован S-интерфейс с использованием только одного трансформатора и двух конденсаторов (в отличие от обычной схемы на двух трансформаторах и дросселе). Такое решение обеспечивает существенное сокращение стоимости.

Интеллектуальное сетевое окончание (NT + 2ab) для сети ISDN с функцией абонентского адаптера может быть построено на ИС SIPB 8191-8/-16 (для 2B1Q) или ИС SIPB 8090-16 (для 4B3T). Сетевое окончание NT + 2ab обеспечивает подключение ISDN-телефонов и двух аналоговых теле-

фонов. Кроме того, имеется возможность внутренней коммутации телефонных аппаратов, т.е. NT + 2ab может работать в качестве офисной АТС. Для обслуживания аналоговых телефонных линий (a/b) используется программируемый кодек (двухканальный DSP-процессор SICOFI-2TE PSB 2132), который осуществляет кодирование данных по А- или μ -закону и обеспечивает необходимое согласование импедансов. В качестве трансивера для U- и S-интерфейсов используется микросхема сетевого окончания ISDN с высокой степенью интеграции (INTC-Q PEB 8191 и NTC-T PEB 8090).

В зависимости от конкретной модели NT + 2ab, управление им осуществляет 8-битный (C513A) или 16-битный (C161R1) микропроцессор. Программное обеспечение IOS (ISDN Operating Software — операционная система для ISDN), успешно протестированное на большом количестве приложений, реализует протоколы D-канала, принятые в Европе (DSS1 + дополнительные услуги), США (5ESS, N1-1, DMS100) и Японии (INS).

11.4.5. ISDN-телефоны

Эталонная плата для телефона может использоваться в качестве дополнительного ISDN-устройства. Так, плата «SCOUT Telephone Board» (SIPB 21385) со встроенной акустической системой предназначена для реализации высококачественного ISDN-телефона с функциями определения номера вызывающего (CLIP — Calling Line Identification Presentation) и подключённого (COLP — COConnected line Identification Presentation) абонентов, а также с рядом дополнительных функций, например парковка вызова (call parking), ожидание вызова (call waiting) или трёхсторонняя конференц-связь.

В качестве ISDN-модуля на плате «SCOUT Telephone Board» используется микросхема SCOUT-SX (PSB 21383 в корпусе P-MQFP-44), которая предназначена для реализации стандартных ISDN-функций, а также содержит аудиокодек.

Программирование модуля осуществляется с помощью 16-битного микроконтроллера C161OR. На плате размещается также 1-Мбайт флэш-память и 32-Кбайт SRAM. Напряжение питания поступает с линии S₀ через DC/DC-преобразователь. Телефон-

ная трубка и 8-оммная акустическая система подключаются непосредственно к плате через аналоговый интерфейс. Кроме того, телефон может управляться с помощью полнофункциональной 20-клавишной клавиатуры и жидкокристаллического дисплея, а также через последовательный (COM) интерфейс компьютера.

Поставляемый совместно с телефонной платой пакет программного обеспечения IOS содержит все элементы (с 1-го, физического, по 3-й, сетевой уровень согласно модели OSI/ISO), необходимые для организации голосовой связи по сети ISDN. Демонстрационная версия программного пакета (без исходных кодов) прединсталлирована во флэш-память. Для некоторых разработок может потребоваться дополнительно приобрести исходные коды IOS.

Программа пользовательского управляющего интерфейса (User Control InterFace — UCIF) совместима с Windows 95/98/2000/NT4 и предназначена для задания всех необходимых параметров при работе с ISDN. К ним относятся, например, выбор В-канала (B1 или B2), загрузка параметров кодека, а также настройка соединения с абонентами в сети ISDN.

Модуль расширения, выполненный на базе ИС SIPB 21387, предназначен для реализации дуплексного режима hands-free. Данный модуль автоматически распознаётся программным обеспечением IOS и UCIF и функционально встраивается в сигнальный тракт. Модуль автоответчика (SAM-EC PSB 4860) поддерживает адаптивный алгоритм эхо-подавления, который является наиболее эффективным по сравнению с другими алгоритмами. Более подробно модуль SAM-EC описан ниже в разделе 11.8.

В будущем в новых образцах разработки для ISDN будут реализовываться новые интерфейсы и новые технологии производства ИС (например, 3.3-В технологии).

11.5. Анализ качества телефонной сети

Определение качества телефонной связи подразумевает использование интеллектуальных аналитических систем. Фирма Oscar Vierling GmbH&Co. KG, в течение многих лет специализирующаяся в области измерений и испытаний телекоммуникационных сетей, предоставляет подобные систе-

мы на базе экспериментальных соединений.

Провайдеры телефонных услуг должны быть способны гарантировать надлежащее качество своих телефонных сетей. С одной стороны, это предусмотрено системой регулярных отчётов перед контролирующими организациями; с другой стороны, возможность реальной проверки качества соединений особенно важна для пользователей этих сетей.

«Качество услуг» (Quality of Service — QoS) — это стандартный термин, включающий в себя все важные с точки зрения пользователя аспекты. Например, устанавливается ли соединение при вызове немедленно или же линия постоянно занята; насколько велика скорость передачи данных; верен ли счёт за предоставленные услуги. Сетевые операторы заинтересованы в исследовании эффективности работы сети с точки зрения указанных вопросов и возможности быстро «нащупать» слабые места в работе сети.

11.5.1. Система TIQUS для контроля телефонных сетей

Компания Vierling разработала систему анализа качества TIQUS, предназначенную для решения перечисленных выше задач. Система состоит из большого количества автоматических модулей контроля, которые подключаются к сети подобно обычным абонентам. Они круглосуточно осуществляют тысячи «пробных» соединений, проверяя тем самым возможности сети с точки зрения пользователя. В процессе постоянных измерений могут быть получены важные статистические данные, характеризующие качественные параметры сети, например её пропускную способность. Система также способна детектировать любые неисправности, которые могут возникнуть в ходе работы сети, в частности, ошибочное подключение тех или иных модулей. Благодаря этому, возможно быстрое исправление данных ошибок.

Система TIQUS (её внешний вид показан на **Рис. 11.16**) может использоваться для определения параметров качества в сетях фиксированной связи с аналоговым или цифровым (ISDN) доступом, в сетях мобильной связи и в сетях с пакетной коммутацией, поддерживающих протокол передачи данных X.25. Благодаря своей модульной структуре, система может быть легко модифицирована в соответствии с требованиями

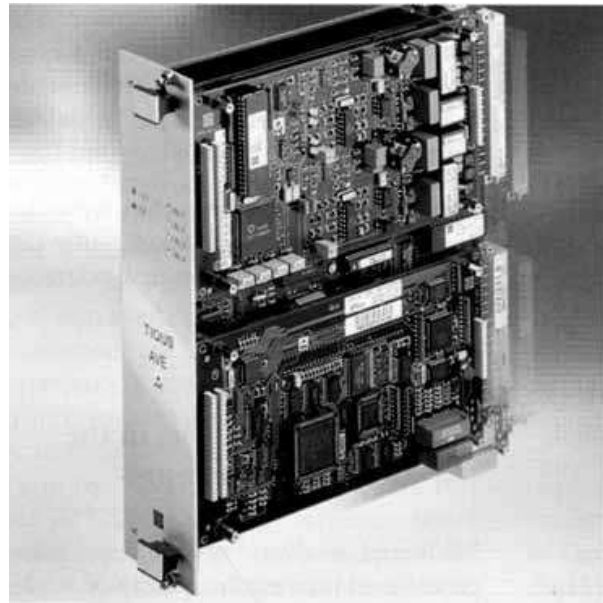


Рис. 11.16. Полностью автоматизированный блок TIQUS, предназначенный для контроля телефонных сетей.

любых сетевых операторов.

В рамках программы «Партнёрство в качестве услуг» (Partner in Quality of Service — PiQoS) компания Vierling предоставляет услуги по тестированию сетей с помощью системы TIQUS и предлагает сетевым операторам полную, независимую и соответствующую стандартам оценку характеристик качества сетей.

11.5.2. Проверка методом установления вызова: тестовое соединение

Тестовое (пробное) соединение — это, в первую очередь, не более чем обычный телефонный вызов. Модуль контроля TIQUS вызывает другой модуль, т.е. происходит установление соединения и передача тонального или цифрового сигнала, после чего соединение разрывается. Однако кроме этого, в процессе каждого тестового соединения его параметры тщательно контролируются и записываются модулем TIQUS. Определяются такие параметры, как величина задержки при установлении соединения, удалось ли соединиться с вызываемым модулем контроля, уровень потерь при передаче голоса, уровень эхо-сигнала, задержки сигнала, скорость передачи данных и т.д. С этой целью вместо обычного «звонка» абоненту посылается испытательный сигнал с точно заданными характеристиками,

позволяющими определить качество связи (например, уровень громкости и качество передачи голоса, уровень внешних акустических шумов или количество ошибочных битов при передаче данных).

Управление модулями контроля производится из центра управления. Здесь задаётся, какие параметры и в каких временных интервалах будут измеряться. Список пробных соединений, отсортированный по времени и промежуткам, генерируется программно, и эти данные передаются через коммутируемые соединения по сети ISDN в модули контроля, которые и осуществляют пробные соединения. По завершении всех измерений, их результаты поступают обратно в центр управления, где они обрабатываются и сохраняются.

11.5.3. Технологии доступа к сети ISDN, предлагаемые компанией Infineon

Каждый из модулей контроля TIQUS предназначен для выполнения целого ряда различных функций. К ним относятся установление связи с центром управления, сохранение данных конфигурации и данных, полученных в результате измерений, управление процессом пробных соединений, генерирование испытательных сигналов, измерение различных параметров и, конечно, подключение к сети. Поскольку система TIQUS имеет модульную структуру (см. **Рис. 11.17**) и включает в себя большое количество интеллектуальных интерфейсных модулей, она обеспечивает возможность подключения к самым разнообразным оконечным абонентским интерфейсам в телекоммуникационных сетях. Это интерфейсы для классического аналогового соединения, для мультиплексного ISDN-соединения базового или первичного доступа, для доступа к сети X.25 или к сетям мобильной связи (GSM 900/GSM 1800).

Например, Infineon предлагает модули, предназначенные для реализации следующих ISDN-интерфейсов:

- ISDN-интерфейс базового доступа в конфигурации S_0 (модуль ISAC-S);
- ISDN-интерфейс базового доступа в конфигурации $U_{K0-4B3T}$ (модули IEC-T и ICC);
- мультиплексный ISDN-интерфейс первичного доступа S_{2M} (модуль FALC).

Кроме того, для подключения пользова-

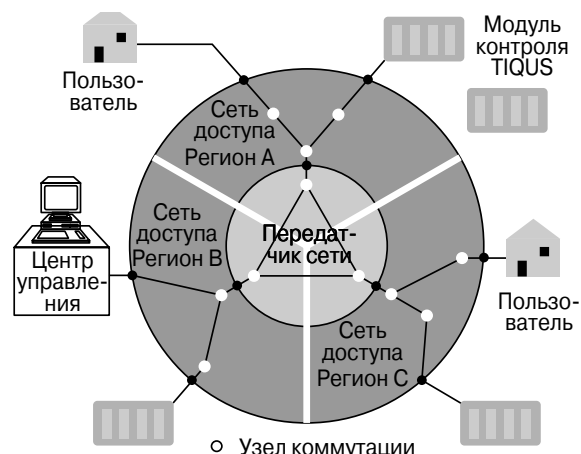


Рис. 11.17. Подключение модулей контроля TIQUS как обычных абонентов телефонной сети.

тельских информационных каналов к измерительным DSP-процессорам используется коммутационный модуль EPIC-S.

С помощью DSP-процессоров и соответствующих коммуникационных контроллеров измеряются коммутационные параметры (уровни с 1-го по 3-й, т.е. физический, транспортный и сетевой уровни соответствующих протоколов), а также технические параметры пользовательских информационных каналов, связанные с качеством передачи данных.

Программное обеспечение модулей контроля, реализующее функции измерения и обработки сигналов, является в достаточной степени универсальным и интерфейсно-независимым.

Перечисленные выше ISDN-модули полностью соответствуют концепции построения системы TIQUS. Полнота охвата коммуникационных технологий, модульная архитектура и, конечно, техническая поддержка продукции — вот основные критерии, в течение многих лет учитываемые при проектировании систем контроля от Vierling, критерии, на базе которых компания Infineon осуществляет разработку данного семейства модулей.

11.6. Снижение стоимости офисных АТС за счёт гибкого использования интегральных технологий

Цифровизация общедоступных сетей (ISDN) открывает новые перспективы развития офисных мини-АТС. Так, недорогие

офисные АТС могут быть спроектированы с использованием всего нескольких ИС высокой степени интеграции.

На малые и средние системы, рассчитанные на обслуживание не более 30 абонентов, в настоящее время приходится свыше 40% соединений (общий объём которых составляет 63 млн. соединений), и, по прогнозам, эти системы будут развиваться наиболее быстрыми темпами.

11.6.1. Экономически эффективные системные решения

Необходимость инвестировать значительные средства в прикладное программное обеспечение несколько усложняет задачу по снижению стоимости систем офисных АТС. Новые полупроводниковые компоненты, будучи дешевле, вместе с тем характеризуются повышенной степенью интеграции и большей функциональностью. Компания Infineon, осуществляя очередной прорыв в данной области электроники, предлагает исключительно гибкие и оптимизированные по стоимости системные решения под общим названием «Systems on Silicon» (Системы на кристалле), предназначенные для реализации как средних, так и больших цифровых офисных АТС.

11.6.2. Тенденция к миниатюризации

В состав офисной автоматической телефонной станции (ОАТС) входят следующие элементы:

- множество абонентских устройств (контроллеры физического уровня), предназначенных для подключения аналоговых и/или цифровых телефонных линий;
- контроллеры, осуществляющие коммутацию, сигнализацию (передачу сигналов), обмен данными внутри ОАТС, прерывание потока данных, и т.п.;
- блок обработки голосового и звукового сигналов (на базе DSP);
- как минимум, один микропроцессор;
- память;
- блок питания.

Если ранее для построения всех этих модулей требовалось довольно большое количество ИС, то с повышением степени интеграции количество используемых полупроводниковых компонентов уменьшается, в то время как функциональность модулей возрастает. Такой подход выгоден тем, что:

- снижается стоимость продукции;
- уменьшаются габариты устройств;
- снижается потребляемая мощность, что позволяет использовать менее мощные блоки питания.

11.6.3. Специализированные ИС для цифровых офисных АТС

Благодаря вышеперечисленным достоинствам нового поколения ISDN-модулей высокой степени интеграции, инженеры-проектировщики с удовольствием используют их в своих разработках. При этом не оказываются лишними и ранее сделанные вложения в создание программного обеспечения для микропроцессоров и процессоров цифровой обработки сигналов (DSP).

На **Рис. 11.18** приведена функциональная схема построенной на базе чипсета Delic/Vip малой ОАТС на 12 цифровых ($4 \times S_0$, $8 \times U_{PN}$), 8 аналоговых абонентских линий и 4 цифровые магистральные линии.

ИС универсального интерфейсного порта VIP (Versatile Interface Port, РЕВ 20950) представляет собой трансивер физического уровня (уровня 1), который может обслуживать 8 цифровых интерфейсов. Первые четыре из них могут быть сконфигурированы как S/T-или U_{PN} -интерфейсы, остальные — только как U_{PN} -интерфейсы. Данная микросхема через шину IOM-2000 подключается к контроллеру DELIC (РЕВ 20570/1). Всего к контроллеру DELIC возможно подключение до 3 микросхем VIP, что в сумме даёт 24 цифровых интерфейса (линии) (до 12 из них могут быть сконфигурированы как S/T-интерфейсы). Кроме того, контроллер DELIC имеет порты IOM-2, позволяющие подключать к ним стандартные трансиверы физического уровня (такие как DuSLIC или SICOFI) для аналоговых линий и трансиверы типа IEC-Q (РЕВ 2091) для цифровых линий. Используя эти порты, к контроллеру DELIC можно подключить до 16 цифровых или 32 аналоговых линий.

Входящий в состав ИС DELIC процессор цифровой обработки сигналов (DSP) используется в качестве контроллера физического уровня (данный DSP-процессор управляет конечными автоматами для цифровых интерфейсов, подключённых к VIP), а также для управления коммутацией и сигнализацией. В случае необходимости, в контроллер DELIC (только в исполнении DELIC-PB)

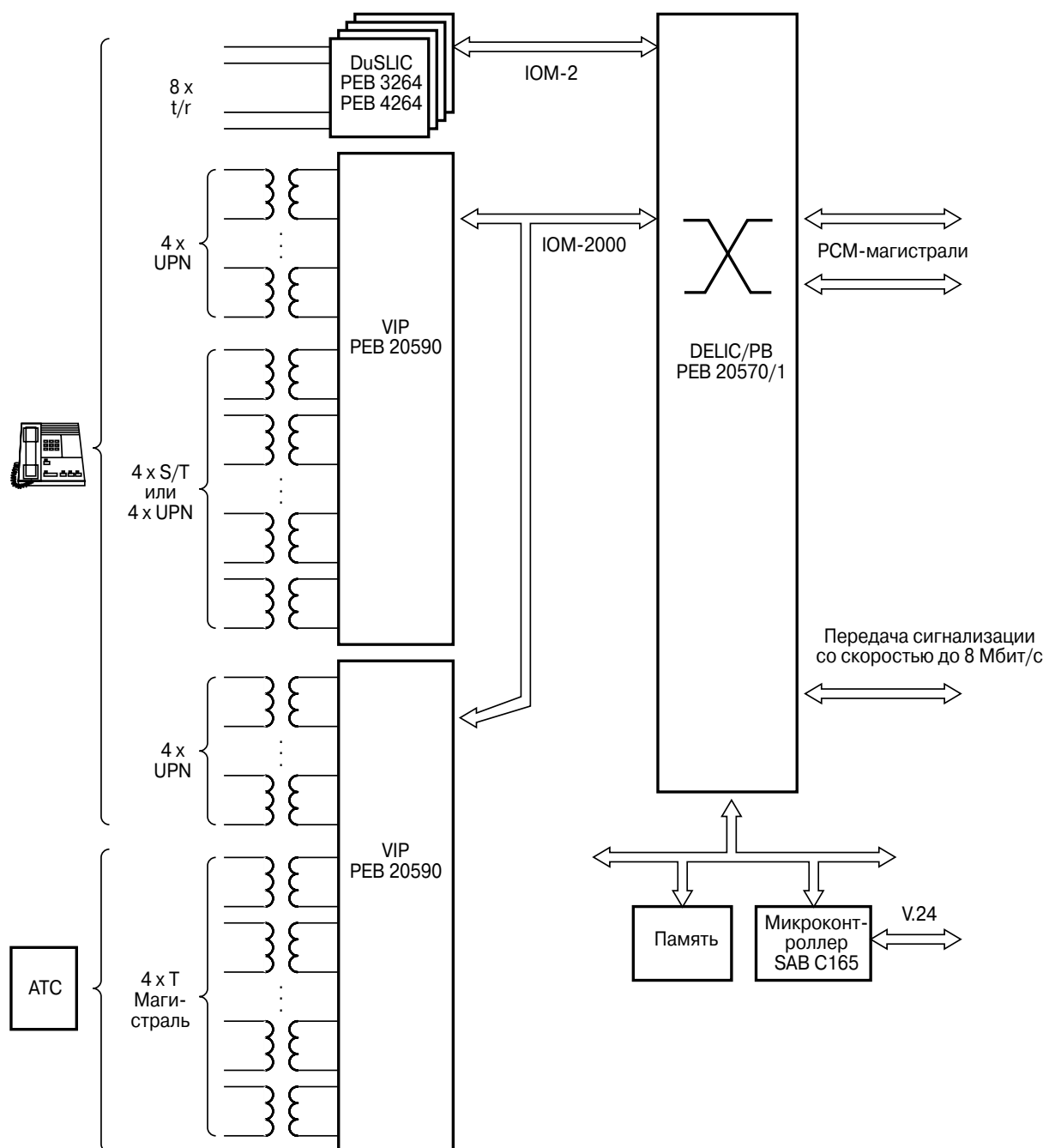


Рис. 11.18. Функциональная схема офисной АТС, содержащей небольшое количество компонентов высокой степени интеграции.

может быть встроено специальное программное обеспечение для поддержки различных функций офисной АТС, например генерации тональной частоты, конференц-связи и т.д. Управление ИС DELIC осуществляет микроконтроллер через интерфейс почтового ящика (mailbox); при этом микроконтроллер и контроллер DELIC используют общую область памяти. Через указанный интерфейс осуществляется также загрузка программного кода DSP во внутреннее ОЗУ

контроллера DELIC. В случае использования данной ИС для управления сигнализацией в цифровой линейной карте, скорость передачи данных по каналу связи может достигать 8 Мбит/с. ИС DELIC, работающая совместно с VIP-8 (PEB 20591), обеспечивает подключение до 24 интерфейсов S/T.

Большие офисные АТС, рассчитанные на подключение 1000 и более абонентов, могут быть построены на цифровых линейных картах, в состав которых входят чипсет DELIC/VIP

и модули матричных коммутаторов.

11.6.4. Решения для РСМ-коммутаторов

В данном разделе приведены примеры решений для матричных РСМ-коммутаторов. Подобные решения часто встречаются в групповых коммутаторах и в коммутируемых сетях. Использование специализированных ИС семейства SWITCH даёт возможность разрабатывать коммутаторы с практически неограниченным количеством РСМ-каналов (которым при использовании временного уплотнения каналов соответствуют определённые временные интервалы, или слоты). На **Рис. 11.19...11.21** приведены несколько примеров таких устройств, начиная с 512-канального неблокирующего РСМ-коммутатора и кончая неблокирующим РСМ-коммутатором на 2048 каналов. Данные схемы могут быть использованы и при других скоростях передачи данных.

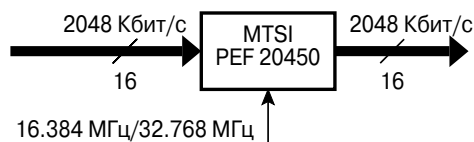


Рис. 11.19. Непрокирующийся РСМ-коммутатор для 512 временных слотов (каналов).

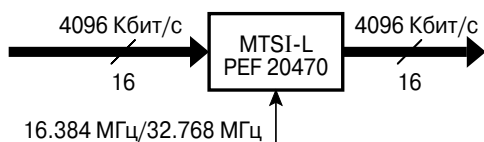


Рис. 11.20. Непрокирующийся РСМ-коммутатор для 1024 временных слотов.

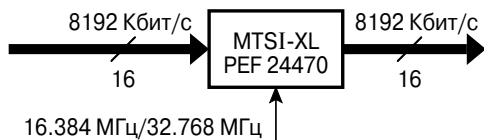


Рис. 11.21. Непрокирующийся РСМ-коммутатор для 2048 временных слотов.

Используя серию микросхем Memory Time Switch (MTS), можно реализовать различные матричные РСМ-коммутаторы. Самым простым является решение, приведённое на **Рис. 11.19**. На микросхеме MTSI (PEF 20450) собран неблокирующийся коммутатор, который осуществляет коммутацию 512 входных временных слотов с 512

выходными временными слотами. Для работы ИС семейства MTSI требуется внешний задающий генератор или кварцевый резонатор на частоту 16.384 или 32.768 МГц, при этом скорость передачи данных по РСМ-магистральной составляет 2048 Кбит/с. Это даёт 8 линий по 32 временных слота каждая для передачи входных и выходных данных.

Два следующих представителя семейства MTSI разработаны с целью уменьшения габаритов коммутаторов большой ёмкости. На MTSI-L (PEF 20470) может быть реализован неблокирующий коммутатор 1024×1024 РСМ-каналов (см. **Рис. 11.20**). Скорость передачи входных и выходных данных может варьироваться от 2048 до 16384 Кбит/с.

Наконец, MTSI-XL (PEF 24470) может обрабатывать до 2048 входных и 2048 выходных временных слотов (см. **Рис. 11.21**). Частота внешнего задающего генератора или кварцевого резонатора может составлять 16.384 или 32.768 МГц, а скорость передачи входных и выходных данных может варьироваться от 2048 до 16384 Кбит/с.

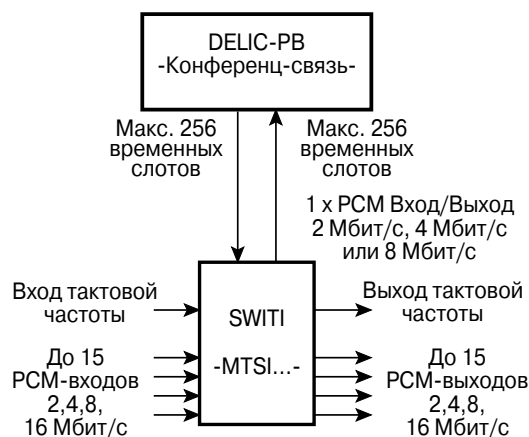


Рис. 11.22. РСМ-коммутатор с функцией конференц-связи.

На **Рис. 11.22** показано решение для организации конференц-связи при помощи микросхем MTSI и DELIC-PB. Каждый из входных каналов (всего их 64) может быть одновременно подключён к 21 независимым конференциям (при условии, что эти конференции трёхсторонние, т.е. количество абонентов каждой из них равно 3). Возможны любые комбинации — от 3 абонентов в 21 конференции вплоть до 64 абонентов только в 1 конференции. Затухание

ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ КАНАЛОВ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ПУТЁМ ПРЕЦИЗИОННОЙ 64-КБИТ ПОШАГОВОЙ ПОДСТРОЙКИ (ДЛИНА СЛОВА 16 БИТ).

Функцию конференц-связи реализует встроенный DSP-процессор, который также контролирует «переполнение» конференций и осуществляет шумоподавление с различными пороговыми уровнями. Программирование ИС DELIC-PB осуществляется без особых проблем при помощи программатора на базе персонального компьютера.

11.6.5. Использование ИС семейства SWIT¹ для подключения к шинам H.100/H.110

ИС семейства SWIT1 имеют интерфейс шины H.100/H.110, поддержка которой (особенно если речь идёт о системах PCI и Compact PCI) служит ключом к реализации высокоскоростных систем компьютерной телефонии (Computer Telephony — CT) и голосовой IP-телефонии (VoIP). Данная технология является одной из наиболее перспективных в области телекоммуникаций. Интерфейс шины H.100/H.110 имеется только в микросхемах подсемейства HTS1, а микросхемы подсемейства MTS1 представляют собой обычные РСМ-коммутаторы. Микросхемы обоих подсемейств (в исполнении XL) могут обрабатывать до 2048 соединений при скорости передачи данных до 16 384 Кбит/с.

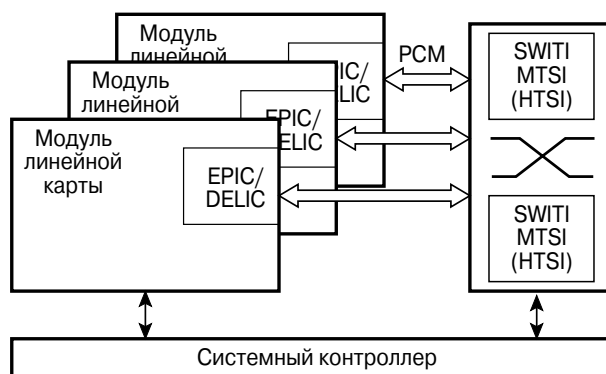


Рис. 11.23. Использование ИС семейства SWITCH в качестве коммутатора РСМ-магистральной.

На **Рис. 11.23** показана схема применения ИС семейства SWIT¹ в качестве коммутатора магистралей. Линейные карты подключаются к PCM-магистралям ИС MTSI (или HTSI). Если в системе не предполагается использовать шину H.100/H.110, то MTSI или HTSI может работать в так назы-

ваемом М-режиме (при этом поддержка шины H.100 отключена). Линейные карты могут подключаться к РСМ-магистралям с помощью контроллеров DELIC или ELIC/EPIC.

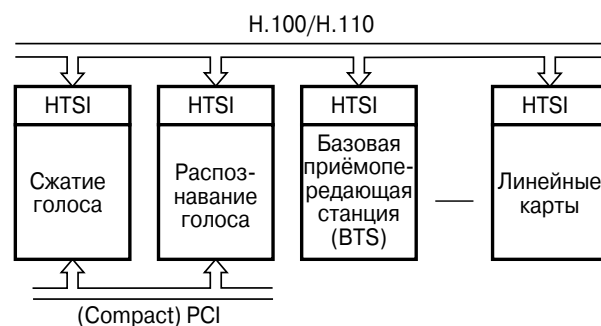


Рис. 11.24. Использование ИС семейства SWITI в системе компьютерной телефонии.

Рис. 11.24 иллюстрирует базовую концепцию построения систем компьютерной телефонии (СТ). Разнообразные модули, реализующие функции сжатия речевого сигнала, распознавания голоса, карты факс-сервера, базовых приёмопередающих станций (BTS), линейных карт и т.д., подключаются к шине H.100/H.110 с помощью HTSI. Данная система может быть разработана с учётом стандарта шины Compact PCI. Соединители, используемые для шины Compact PCI, полностью совместимы с шиной H.100 (H.110) на магистрали.

HTSI могут использоваться и в приложениях голосовой IP-телефонии для подключения традиционных офисных АТС к шине Н.100 (как показано на **Рис. 11.25**). Вокодерная карта, также подключаемая к шине Н.100 с помощью HTSI, служит для сжатия/восстановления речевого сигнала. Сетевая интерфейсная карта осуществляет подключение всей системы к локальной (LAN) или глобальной (WAN) сети.

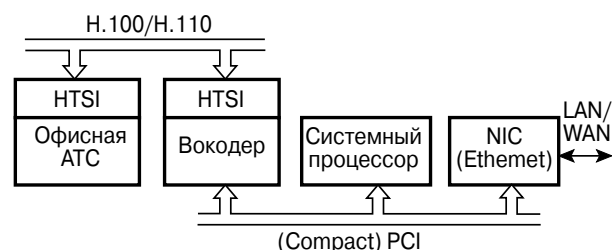


Рис. 11.25. Использование ИС семейства SWITCH в системе голосовой IP-телефонии (VoIP).

11.7. Архитектура нового поколения мобильного оконечного оборудования — GOLDenfuture для GSM

Несмотря на то что несколько лет назад, в 2001 году рынок GSM переживал существенный спад, в настоящее время его потенциал вновь представляется весьма перспективным. В основе необычайного успеха глобальной системы мобильной связи (Global System for Mobile communications — GSM) лежит целый ряд факторов. Важнейшими из них являются простота и надёжность в работе, что открывает возможность производства компактных, лёгких и недорогих мобильных телефонов стандарта GSM. С появлением же на телекоммуникационном рынке такой инновационной продукции, как абонентские пакеты услуг, GSM-телефония приобрела надёжную потребительскую базу для дальнейшего развития.

В процессе этого развития стандарт GSM постоянно дорабатывается. Так, было улучшено качество голосовых услуг, увеличилась производительность и пропускная способность сетей мобильной связи. Получили дальнейшее развитие услуги высокоскоростной передачи данных (GPRS¹⁾) по коммутируемым линиям.

Стремясь удовлетворить многочисленным требованиям, предъявляемым к мобильным оконечным (абонентским) устройствам системы GSM, и даже превзойти эти требования, компания Infineon разработала на базе новой архитектуры E-GOLD высокопроизводительный, высокоинтегрированный чипсет со сверхнизким энергопотреблением для двух- или трёхдиапазонных сотовых телефонов. E-GOLD представляет собой платформу для построения передовых оконечных устройств, обеспечивающих передачу голоса, пересылку факсов, быструю передачу данных и оснащённых рядом дополнительных «комфортных» функций.

11.7.1. E-GOLD — расширение стандартной платформы GOLD

С тех пор как в 1993 году компания Infineon Technologies выпустила первый полнофункциональный GSM-чипсет GOLD, она утвердилась на лидирующих

позициях в области разработки аппаратных решений под стандарты GSM и продолжает устанавливать эти стандарты.

Концепция E-GOLD отражает современный подход к проектированию GSM-аппаратуры, аккумулируя в себе огромный опыт, полученный в ходе практического использования ранее выпускавшейся продукции. Разработка платформы E-GOLD представляет собой решительный шаг в направлении большей системной интеграции. При этом процесс выпуска новой продукции на рынок значительно ускоряется, что повышает привлекательность и безопасность инвестиций в развитие производства. Всеми этими достоинствами обладает и новое поколение чипсетов GOLD. Разработанная на основе широкого использования ноу-хау и передовых КМОП-технологий Infineon, архитектура E-GOLD предназначена для реализации целевых системных решений, связанных с обеспечением наивысшей производительности, снижением энергопотребления и оптимизацией расходов.

Данная архитектура разработана с учётом простой и эффективной интеграции с многодиапазонными ВЧ схемами, например для совместной работы с однокристальным трансивером SMARTi (Seimens Multi-Advanced Radio Transceiver IC). Чипсет E-GOLD включает в себя две микросхемы обработки сигнала в основной полосе частот: одна из них представляет собой однокристальный микроконтроллер E-GOLD с DSP-процессором, а вторая — модуль аналоговых интерфейсов GSM (E-GAIM) и содержит АЦП и ЦАП для интерфейсов сигналов ВЧ и речевых сигналов. Микроконтроллер E-GOLD построен на статическом 16-битном процессорном ядре, имеет встроенный DSP-процессор и обеспечивает кодирование речевого сигнала в полноскоростном, полускоростном и расширенном полноскоростном режимах, а также работу двух- и трёхдиапазонных схем ВЧ. Кроме того, он поддерживает такие востребованные в настоящее время функции, как многоканальная передача данных, адаптивное многоскоростное кодирование речи (Adaptive Multi-Rate — AMR) и пакетная передача данных (GPRS).

¹⁾ GPRS (General Packet Radio Service) — служба пакетной передачи данных в радиоканале. — *Примеч. ред.*

Современная система управления энергопотреблением позволяет свести к минимуму потери энергии и благодаря этому увеличить время работы мобильных телефонов (без подзарядки аккумуляторов). Основные преимущества чипсета E-GOLD состоят в следующем:

- более высокий уровень интеграции и наличие оптимизированного ВЧ интерфейса, вследствие чего требуется меньшее количество внешних компонентов;
- наличие DSP со встроенным аппаратно-программным обеспечением и различными дополнительными функциями (по требованию заказчика), например трёхскоростного вокодера, высокоскоростного интерфейса передачи данных с коммутацией каналов (High Speed Circuit Switched Data — HSCSD), встроенной PRAM;
- чрезвычайно низкая рассеиваемая мощность;
- малогабаритный корпус BGA (в виде матрицы с шариковыми выводами).

Ещё более высокий уровень интеграции обеспечит чипсет E-GOLD+, в котором впервые в одной интегральной схеме реализовано совмещение функций аналоговой и цифровой обработки сигналов в основной полосе частот.

Отдельно следует упомянуть следующие характеристики:

- 0.18-микронная, 18-В полупроводниковая технология;
- DSP-процессорное ядро OAK+, работающее на тактовой частоте 78 МГц;
- многофункциональное аппаратно-программное обеспечение DSP, включающее в себя адаптивный многоскоростной вокодер (AMR);
- реализация полнофункциональной GSM-системы всего лишь на двух ИС и трансивере SMARTi.

11.7.2. Поддержка приложений

Infineon Technologies обеспечивает всестороннюю поддержку своей продукции, предоставляя разработчикам различную техническую документацию, аппаратно-программный инструментарий и образцы разработки печатных плат (рекомендации по оптимизации конструктивных параметров — форм-фактора). Благодаря этому потребители имеют возможность существенно со-

кратить время и ресурсы, затрачиваемые на разработку и вывод продукции на рынок.

На **Рис. 11.26** показан один из наиболее полезных пользовательских инструментов — отладочная плата E-GOLD, которая реализует полностью тестируемую эталонную системную среду и обеспечивает доступ ко всем системным интерфейсам. Плата содержит встроенный отладчик нового поколения и средства контроля, что значительно упрощает процесс параллельной разработки пользовательского аппаратного и программного обеспечения.

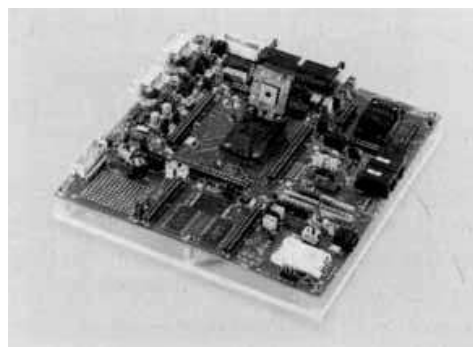


Рис. 11.26. Отладочная плата E-GOLD.

Кроме того, Infineon обеспечивает поддержку GSM-протоколов и драйверов 1-го (физического) уровня, а также предлагает стандартные программные инструменты разработчика для микроконтроллера C166. В чипсет E-GOLD/E-GOLD+ встроено разработанное, протестированное и оптимизированное компанией Infineon аппаратно-программное обеспечение для DSP-процессора, которое с запасом удовлетворяет требованиям ETSI и сети GSM.

Ускорению процесса разработки новых аппаратных и программных продуктов способствует наличие партнёрских отношений с другими производителями. Например, компания Infineon, в тесном партнёрстве с Debis Systemhaus (дочерней компанией концерна DaimlerChrysler Services AG), работает над созданием встроенного в платформу E-GOLD готового программного обеспечения для GSM. Стоит отметить и сотрудничество между Infineon и компанией ATL Research A/S, известным разработчиком систем GSM.

11.7.3. Новая платформа для разработки — первый шаг в будущее

Компания Infineon Technologies предложила открытую платформу для разработки решений под требования заказчиков и стандартов сотовой связи, например таких, как UMTS (Universal Mobile Telecommunications System — универсальная система мобильной связи). Эта платформа базируется на высокопроизводительном DSP-процессорном ядре TriCore™, которое уже было отмечено наградами международных выставок.

Новая архитектура оптимизирована с целью упростить её интеграцию с компонентами Infineon, предназначенными для многодиапазонных схем ВЧ, например с однокристалльным трансивером SMARTi.

С появлением этой уникальной полупроводниковой архитектуры пользователи получают более гибкий и производительный инструмент разработки. Что, в свою очередь, открывает путь к созданию в будущем новых мобильных мультимедиа-устройств и сервисов.

11.7.4. Полнофункциональный GSM-модуль

Infineon Technologies предлагает функционально полное решение для реализации двухдиапазонных (900/1800 МГц) оконечных устройств стандарта GSM. Это решение представляет собой интегрированные аппаратные средства, размещённые на чрезвычайно компактной, односторонней печатной плате, содержащей около 200 компонентов и требующей небольшого количества покупных материалов (Рис. 11.27). Программное обеспечение содержит набор протоколов физического, транспортного и сетевого уровней. Аппаратные средства модуля реализованы на базе самых последних разработок, пополнивших хорошо зарекомендовавшие себя семейства полупроводниковых компонентов Infineon. Они включают в себя монолитную интегральную микросхему обработки сигналов в основной полосе частот E-GOLD+, полностью интегрированную систему управления питанием E-Power, однокристалльный ВЧ трансивер SMARTi+ и функционально полный РА-модуль (универсальный усилитель мощности).

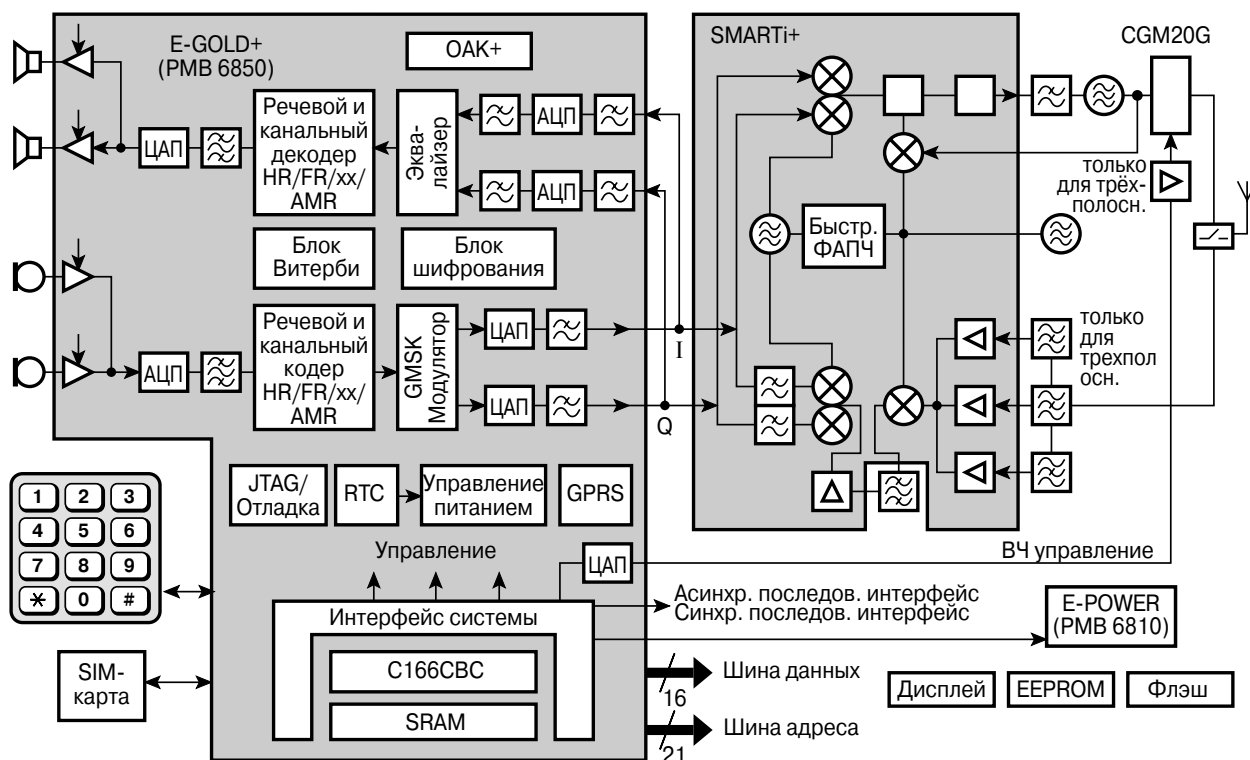


Рис. 11.27. Трансивер SMARTi+ и многофункциональный РА-модуль.

11.8. Цифровые автоответчики

В зависимости от принципа записи приветствий и сообщений автоответчики можно условно поделить на 3 типа:

- Аналоговые — сообщения и приветствия записываются в виде аналоговых сигналов на магнитную ленту.
- Цифровые — сообщения и приветствия кодируются в цифровом виде и сохраняются в памяти автоответчика.
- Комбинированные — приветствия сохраняются в цифровом виде, а сообщения — в аналоговом.

Поскольку речь идёт о записи сигнала, поступающего по телефонной линии, требования к качеству записи и воспроизведения речевых сигналов оказываются гораздо ниже, чем в системах высшего класса. Так, вполне достаточно обеспечить диапазон рабочих частот 300...3400 Гц. В этой связи полупроводниковые технологии имеют следующие преимущества:

- полупроводники не подвержены механическому износу;
- качество записи не ухудшается со временем;
- модули цифровой обработки сигналов и модули памяти по мере развития соответствующих технологий становятся всё дешевле, а их массовое производство — экономически эффективнее.

Как правило, преобразование в цифровой формат осуществляется с частотой дискретизации 8000 Гц при разрешении 8 бит. Однако накапливаемый объём данных остаётся весьма существенным: каждую секунду в память должны быть записаны 64 000 бит

11.8.1. Использование DSP-процессора для сжатия потока данных

Один из способов сокращения объёма данных в цифровом автоответчике — применение процессора цифровой обработки сигналов (DSP). Используя подходящий алгоритм обработки сигналов, DSP осуществляет сжатие цифровых данных. За счёт этого уменьшается объём данных, записываемых в память автоответчика, и снижаются требования к ёмкости памяти без заметной потери качества звукового сигнала.

Однако коэффициент сжатия аудиосигнала нельзя увеличивать до бесконечности. В первую очередь, страдает разборчивость речи вследствие возрастания шумов. Вторых, даже если с повышением коэффи-

циента сжатия речевой сигнал сильно не искажается, то на записи он звучит неестественно. Хороший алгоритм сжатия речевого сигнала (кодера) обеспечивает справедливый компромисс между коэффициентом сжатия и качеством записи (см. **Табл. 11.1**).

Таблица 11.1. Зависимость качества сигнала от коэффициента сжатия

Коэффициент сжатия	Качество
< 3	Отличное
3...10	Хорошее
10...22	Удовлетворительное
> 22	Плохое

«Отличное» качество означает, что невозможно определить на слух разницу между исходным и записанным сигналами. «Плохое» качество сравнимо с качеством записи на магнитную ленту. На практике, коэффициент сжатия речевого сигнала должен находиться в диапазоне от 5 (и не ниже, учитывая конкуренцию со стороны дешёвых аналоговых автоответчиков) до 20 (дальнейшее повышение коэффициента означает неприемлемое снижение качества записи).

11.8.2. Одноканальный кодек

Хотя наиболее важной задачей цифровых автоответчиков является эффективное сжатие речевого сигнала, в тех или иных случаях приходится решать и другие задачи. Основные возникающие при этом требования можно проиллюстрировать на примере двух устройств: стандартного автоответчика и базовой станции телефона DECT (Digital European Cordless Telecommunications — Европейский стандарт на цифровую беспроводную связь). В обычном автоответчике (**Рис. 11.28**) микрофон, громкоговоритель и телефонная линия подключены как источники и получатели сигнала. Для микрофона и громкоговорителя требуются усилители, а подключение телефонной линии осуществляется с помощью дифсистемы телефонной схемы. Поскольку запись в автоответчик может производиться либо с микрофона, либо с линии, достаточно иметь один АЦП. От автоответчика никогда не потребуются одновременное воспроизведение двух разных сообщений через громкоговоритель и по телефонной линии, поэтому вполне достаточно и одного ЦАП. Вместе оба этих преобразователя фактически представляют

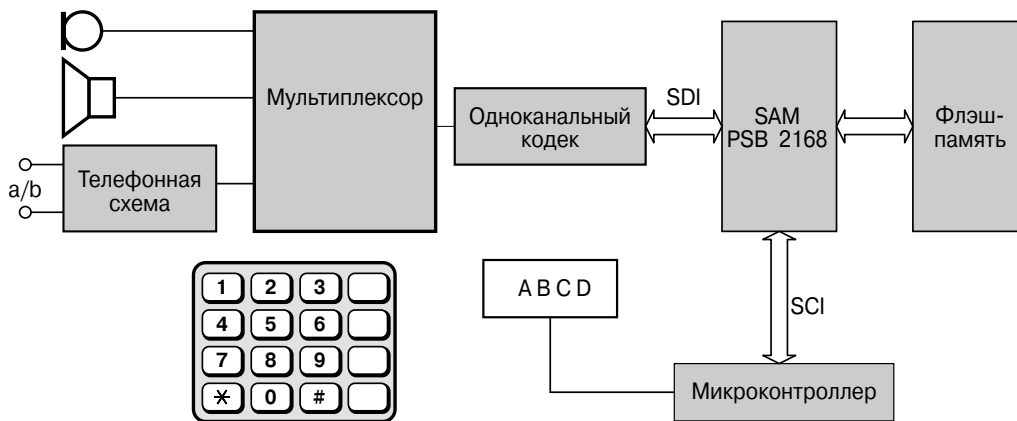


Рис. 11.28. Одноканальный кодек осуществляет соединение между аналоговым и цифровым блоками автоответчика.

собой одноканальный кодек. Вся необходимая коммутация источников и приёмников сигнала может быть осуществлена с помощью аналоговой коммутируемой сети.

Сигналы, представленные в цифровом виде, должны сжиматься при записи с помощью кодера, а при воспроизведении — восстанавливаться с помощью декодера. Далее, для реализации дистанционного запроса автоответчика, сигналы тонального вызова должны опознаваться DTMF-детектором. Двухтональная многочастотная (DTMF) процедура кодирования сигнала состоит в том, что каждой цифре соответствует определённая комбинация пары звуковых частот. Момент окончания входящего сообщения определяет детектор CPT (Call in Progress Tone), который отслеживает появление на линии сигнала «занято». Для идентификации тональных сигналов модема и факса используется соответствующий тоновый детектор CNG (Call-iNG tones), чтобы вовремя отсечь их. Если в автоответчике предусмотрена функция переадресации сообщений, то его необходимо дополнить генератором сигналов тонального вызова (DTMF). Как правило, автоответчик содержит также часы реального времени (RTC). Наконец, автоответчик должен иметь соответствующий объём памяти для записи входящих голосовых сообщений. В том случае, если в автоответчике отсутствует дисплей, следует предусмотреть также возможность записи предварительно запрограммированных фраз-приветствий для синтезатора речи.

Базовая станция DECT поддерживает ряд так называемых функций комфорта, что требует решения дополнительных задач.

Так, для реализации режима громкой связи (hands-free) необходим второй кодек с соответствующими аналоговыми усилителями. Сама функция hands-free реализуется с помощью соответствующего алгоритма обработки сигналов. Кроме того, требуется детектировать и декодировать информацию, передаваемую от АТС к вызываемому абоненту. Эта функция (Caller IDentification — определение номера вызывающего абонента) одно время использовалась в США, а затем получила гораздо более широкое распространение в Европе и странах Юго-Восточной Азии. Для её реализации требуется CID-декодер. По сравнению со стандартными автоответчиками, базовая станция системы DECT может осуществлять различные типы соединений с источниками и приёмниками сигнала, которые требуют использования цифровой коммутационной сети. Административные функции (например, список абонентов телефонной сети) и наличие пользовательского интерфейса (дисплея, клавиатуры) также существенно увеличивают объём ресурсов, требуемых для работы DECT-станции.

11.8.3. Оптимизация стоимости автоответчиков за счёт использования чипсета SAM

Идеальным вариантом было бы оптимизированное по стоимости решение, подходящее для всех применений. Необходимый компромисс находится между несколькими отличающимися вариантами, каждый из которых адаптирован под конкретное приложение, и одним универсальным решением.

ем, подходящим для любого применения. Оптимизация устройств под конкретные задачи часто оказывается нереально дорогой, поскольку требует больших вложений в разработку каждого подобного устройства. С другой стороны, за выгоды, связанные с массовым производством универсальных устройств, приходится платить снижением их функциональности (впрочем, многими из этих функций большинство потребителей и так никогда не пользуется).

Компания Infineon разработала чипсет SAM (Sophisticated Answering Machine — усовершенствованный автоответчик), который позволяет оптимизировать стоимость системы и при этом оптимально распределить выполняемые задачи среди входящих в его состав следующих компонентов:

- PSB 4851 — двухканальный кодек со встроенными усилителями и коммутацией через аналоговую сеть;
- PSB 2168 — DSP-процессор для стандартного цифрового автоответчика;
- PSB 4860 — аналогична PSB 2168, но дополнительно поддерживает функцию hands-free в дуплексном режиме с подавлением акустического эха.

С помощью всего лишь трёх этих интегральных модулей можно построить цифровой автоответчик, оптимизированный практически для любого применения. Если же требуется решение каких-то особых задач, то устройство может быть дополнено другими стандартными модулями (стандартный кодек, модуль памяти, микроконтроллер).

Аналоговые усилители с независимо программируемыми коэффициентами усиления

На Рис. 11.29 приведена структурная схема модуля SAM (PSB 4851), который предназначен для работы в многофункциональных аналоговых телефонах с цифровым автоответчиком. Он содержит два АЦП и два ЦАП, которые обслуживают два независимых друг от друга цифровых канала. Аналоговый интерфейс модуля обеспечивает подключение к нему трёх источников сигнала и трёх приёмников (получателей) сигнала. Подключение осуществляется через аналоговые усилители, которые могут программироваться независимо друг от друга.

Телефонный капсюль и микрофон телефонной трубки, а также динамик и микрофон системы громкой связи могут подключаться к PSB 4851 без использования каких-либо дополнительных активных компонентов. Для подключения телефонной линии а/б обычно требуется стандартная телефонная схема. Порядок подключения отдельных усилителей к АЦП может программироваться. Кроме того, АЦП могут быть совсем отключены. В этом случае источники аналогового сигнала и получатели исходящего сигнала соединяются непосредственно друг с другом с помощью встроенной коммутирующей схемы. В результате потребляемая мощность модуля снижается настолько, что его питание можно осуществлять от магистральной линии. Телефон, использующий эту опцию, сохраняет работос-

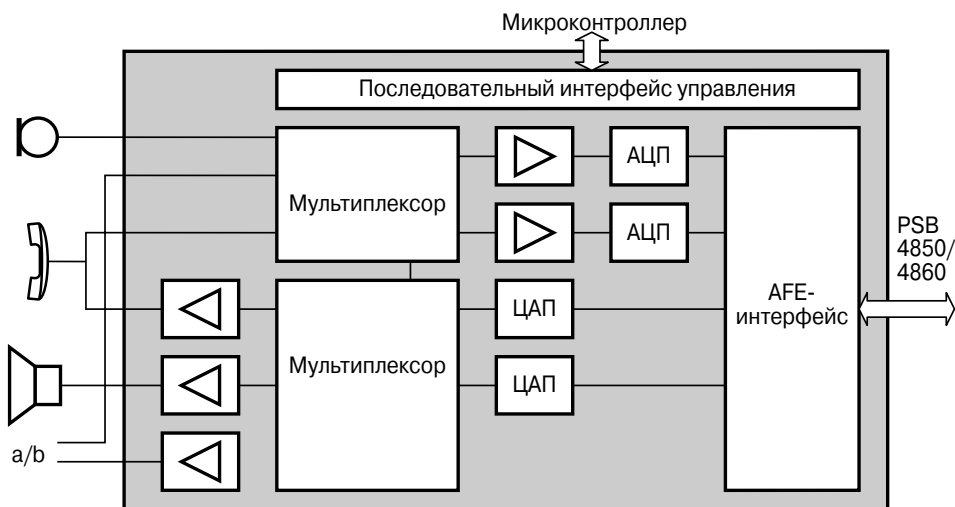


Рис. 11.29. К аналоговому интерфейсу модуля SAM (PSB 4851) можно подключить три источника сигнала и три получателя сигнала.

пособность даже при неисправности в цепи электропитания и может быть использован в качестве аварийного.

PSB 4851 имеет встроенный интерфейс (AFE) для связи с модулем PSB 4860, а также стандартный последовательный интерфейс для связи с микроконтроллером.

Цифровые модули, совместимые снизу вверх

Модули PSB 2168 и PSB 4860 (показан на **Рис. 11.30**) являются совместимыми снизу

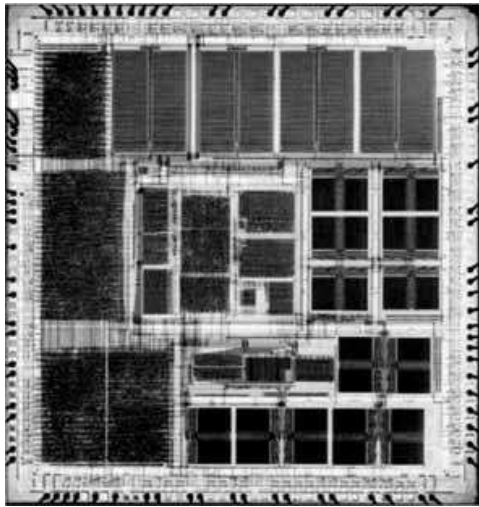


Рис. 11.30. Снизу вверх совместимый цифровой модуль PSB 4860.

вверх. Этим определяются их цоколёвка (назначение выводов) и порядок программирования. Модули отличаются друг от друга лишь количеством интерфейсов и внутренних функциональных блоков. На **Рис. 11.31** приведена структурная схема, которая применима для обоих модулей. ПЗУ программ (PROM), констант (DROM) и оперативная память (XRAM, YRAM) сгруппированы вокруг DSP-ядра. Вся память является масштабируемой, т.е. её размер может изменяться в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к модулю. Внешние соединения устанавливаются с помощью независимых друг от друга интерфейсных модулей.

Параметры почти всех этих модулей могут в широких пределах программироваться с помощью микроконтроллера. Таким образом, данные цифровые модули могут быть интегрированы в состав различных систем; при этом не требуется использования дополнительных внешних компонентов.

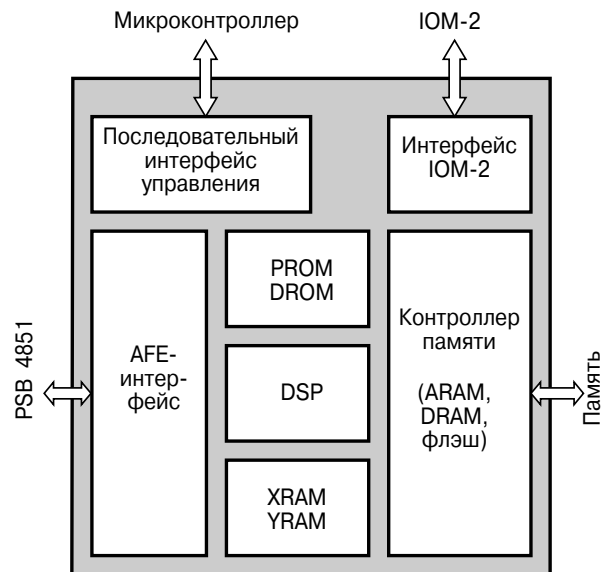


Рис. 11.31. Цифровой процессор обработки сигналов (DSP) — «сердце» обоих цифровых модулей.

Гибкая модульная структура

Каждый из данных цифровых модулей представляет собой работающий независимо от других отдельный модуль обработки сигналов, функции которого реализованы с использованием соответствующего программного обеспечения DSP. Хотя основные функции этих модулей реализованы программно, пользователь может работать с ними, как с аппаратными устройствами. Сточки зрения пользователя, цифровой модуль ассоциируется не с функциональной блок-схемой (приведённой на **Рис. 11.31**), а скорее представляет собой набор блоков, содержащий различные модули (см. **Рис. 11.32**).

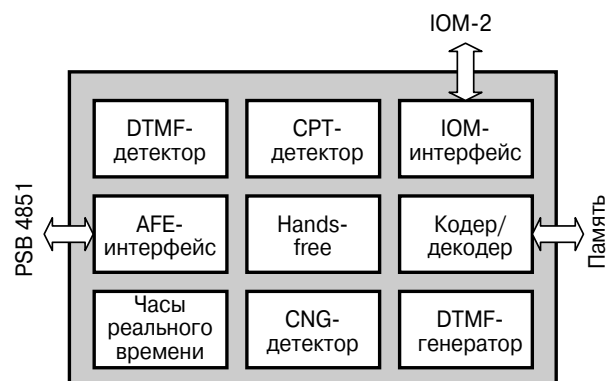


Рис. 11.32. Цифровой модуль как набор функциональных блоков для построения системы.

Каждый модуль, входящий в состав данного набора блоков, может иметь несколько входов сигнала и несколько выходов сигнала. В рамках этой структуры любой вход того или иного модуля может быть независимо от остальных подключён к любому выходу другого модуля. Данную концепцию иллюстрируют несколько примеров, в которых используются описанные выше цифровые модули чипсета SAM.

Тональный набор номера с помощью DTMF-генератора

Два из трёх входов модуля аналогового интерфейса (PSB 4851) остаются неподключёнными, а третий подключается к выходу DTMF-генератора. Под управлением микроконтроллера осуществляется генерация тональных сигналов соответствующей частоты и амплитуды и их пересылка в АТС. Параллельно этот тональный сигнал набора номера можно прослушивать (с пониженной громкостью), используя второй выход DTMF-генератора.

Генерация вызывного сигнала

При поступлении вызова выход DTMF-генератора подключается через аналоговый интерфейс (PSB 4851, 2-й канал) к входу громкоговорителя. Микроконтроллер в данном случае лишь управляет поочерёдным переключением частоты сигнала (с одной на другую из заданной пары частот) на выходе DTMF-генератора через соответствующие временные интервалы.

Генерация тонального сигнала ожидания вызова

Часто бывает, что во время разговора поступает сигнал вызова от другого абонента (например, по сети ISDN). В этом случае, как и при генерации вызывного сигнала, с интервалом в 1 секунду и до тех пор, пока вход модуля аналогового интерфейса не отключится от DTMF-генератора, через громкоговоритель может воспроизводиться тональный вызывной сигнал любой частоты.

Таким образом, концепция, основанная на использовании набора функциональных блоков, обеспечивает построение структуры автоответчика практически для любого применения. В отличие от стандартной «жёстко определённой» процедуры («осуществлять запись сообщения до тех пор,

пока не будет зафиксирован тональный сигнал «линия занята» или отсутствие сообщения (молчание) в течение 3 с, после чего следует удалить последние 3 с записи»), данная концепция подходит и для случаев, когда процедура заранее не определена. Параметры отдельных модулей могут в широких пределах задаваться в процессе работы.

Примером подобного подхода может служить управление работой кодера. Так, коэффициент сжатия сигнала в кодере может принимать три значения. Например, при коэффициенте 6.5 качество записи голоса ещё остается очень хорошим, а при коэффициенте, равном 19, обеспечивается большая (до 20 мин при объёме памяти 4 Мбит) длительность записи и удовлетворительное качество записи голоса. Соответствующие режимы записи обозначаются так же, как это принято для систем видеозаписи: HQ (High Quality — высокое качество), SP (Standard Play — стандартная длительность записи) и LP (Long Play — увеличенная длительность записи). В рамках модульной концепции построения системы цифрового автоответчика могут быть реализованы различные опции, например:

- запись приветствия осуществляется в режиме HQ, а входящих сообщений — в режиме SP или LP;
- режим записи сообщений может изменяться пользователем — при длительном отсутствии владельца автоответчика устанавливается режим LP, в остальных случаях — режим HQ;
- режим записи переключается автоматически, по мере уменьшения доступного объёма памяти, из HQ в SP или в LP;
- рекомпрессия — опция, позволяющая вручную или автоматически осуществлять сжатие сигнала, записанного в режиме HQ, до уровня, соответствующего режимам SP или LP. В рамках модульной концепции к кодеру подключается дополнительный декодер; таким образом, декодер осуществляет восстановление HQ-сигнала, одновременно кодер сжимает этот сигнал в формат SP или LP. Кроме того, производитель может предусмотреть различные варианты использования данного режима. Например, в ходе прослушивания сообщения оно может автоматически перезаписываться с большим коэффициентом сжатия, чтобы высвободить место в памяти автоответчика.

11.8.4. Упрощение процесса разработки

Компания Infineon в помощь разработчикам предлагает ряд решений и инструментов, использование которых ведёт к снижению общих затрат на проектирование систем.

Особо следует отметить:

- образцы для разработки многофункциональных телефонов с цифровым автоответчиком;
- исходные коды программ на языке C, предназначенных для управления модулями; данные программы могут быть выполнены на типовых микроконтроллерах.

Используя работающую систему в качестве базы для начала разработки, с помощью этих решений и программных инструментов производители окончательного оборудования смогут тестировать свои проекты, совершенствовать их и быстро разрабатывать оборудование с требуемыми функциями.

Надёжная основа для будущих разработок

Широкий диапазон применений, начиная от обычных автоответчиков и кончая базовыми станциями DECT с поддержкой ISDN, может быть «покрыт» относительно небольшим количеством вариантов построения этих устройств в рамках модульной концепции. В то же время, указанные модули служат основой для будущих разработок.

Использование модульной концепции упрощает возможность усовершенствования модулей. При этом могут использоваться как ранее разработанные аппаратные, так и новые, уже существующие программные модули. Что особенно выгодно для пользователей — все модули совместимы друг с другом и могут «переноситься», не требуя при этом каких-либо изменений.

Например, ряд модулей SAM был в результате встроен в серию производимых телефонных модулей ISDN (INCA). Если такие функциональные блоки, как DTMF-генератор и генератор вызывного сигнала при этом не претерпели изменений, то алгоритм hands-free был улучшен благодаря более высокой производительности DSP-процессора модуля INCA. Однако важная составная часть этого алгоритма, а именно принцип подавления акустического эха и балансировки уровней (и то, и другое требуется для реализации режима громкоговорящей связи), осталась прежней.

11.9. Алгоритмы hands-free

Со времён изобретения первых телефонов способ их применения практически не изменился. По-прежнему абонент должен при разговоре держать микрофон около рта, а громкоговоритель прижимать к уху. Но с появлением телефонных систем hands-free потребовались новые мощные процессоры обработки сигналов и более сложные алгоритмы обработки сигналов.

Компания Infineon Technologies предлагает полупроводниковые компоненты, предназначенные для разработки высококачественных дуплексных систем hands-free, характеризующихся непревзойдённой производительностью, уникально низкой стоимостью и универсальностью. Но универсальность имеет свою цену — необходимо оптимизировать более 200 параметров.

11.9.1. Системы hands-free

Работа систем hands-free (громкоговорящей связи) построена на использовании трёх основных DSP-алгоритмов:

- подавление акустической обратной связи (эха) путём попеременного ослабления голосов абонентов (подавление эхо-сигнала и балансировка уровней);
- активная компенсация акустической обратной связи с помощью адаптивной фильтрации эхо сигналов (компенсация эхо-сигнала);
- последующая фильтрация с целью улучшения разборчивости речи (например, подавление шумов).

Соответственно, системы hands-free можно разделить на два основных класса (с эхо подавлением и с активной эхокомпенсацией.). При этом не имеет особого значения, где используются эти системы. Они могут быть установлены, например, в автомобиле или использоваться для видеоконференций, в офисных телефонных системах или иметь совершенно иное применение.

11.9.2. Дуплексные системы

Системы, реализующие дуплексный алгоритм hands-free (Full Duplex — FD), содержат как минимум один подавитель эхо-сигнала. Он необходим, чтобы снизить уровень сигнала громкоговорителя, попадающего на микрофон после отражения от стен и окружающих предметов. Обычно для улучшения качества сигнала в начале телефонного разгово-

ра совместно с эхоподавителем используется автоматически регулируемый (адаптивный) алгоритм с переключением затухания. После адаптации фильтра эхо-сигналов, воздействие данного алгоритма постепенно уменьшается, поскольку разговор в дуплексном режиме не может осуществляться при дополнительном переключении затухания.

11.9.3. Полудуплексные системы

Системы, использующие полудуплексный (Half Duplex — HD) алгоритм hands-free, менее сложны, чем дуплексные. Участники разговора поочередно занимают линию и не могут говорить одновременно. Здесь используется так называемый алгоритм «побеждает сильнейший» (Stronger Wins), когда линию занимает тот из собеседников, чей голос звучит громче, а более слабый сигнал дополнительно ослабляется, чтобы уменьшить уровень эхо-сигнала. Это требует от участников разговора соблюдения определённых правил.

Компания Infineon Technologies предлагает широкий ассортимент продукции, предназначенной для реализации систем hands-free:

SCOUT-SX	(PSB 21383)	HD
SCOUT-PX	(PSB 21393)	HD
SAM-EC	(PSB 4860)	FD
ACE	(PSB 2170)	FD
ACE-R	(PSB 2171)	FD
INCA-S	(PSB 21483)	FD
INCA-P	(PSB 21493)	FD

Благодаря гибкости в использовании, данные компоненты идеально подходят для реализации самых разнообразных приложений. Их работа может быть оптимизирована как под акустические характеристики офисного телефона, так и под очень сложную с точки зрения акустики обстановку в салоне автомобиля.

11.9.4. Реализация эхоподавления в дуплексных системах

Нередко возникает вопрос — а зачем, собственно, нужно «давить» эхо-сигнал при разговоре в дуплексном режиме? Самый простой ответ на этот вопрос таков: этого и не требуется! Достаточно посмотреть на обычную телефонную трубку — в ней нет никаких устройств эхоподавления, а разговор с её помощью ведётся в дуплексном режиме. Достаточно положить трубку на стол, и вот он, вариант «громкоговорящей связи»! Есть только одна проблема, и заключа-

ется она в недостаточной громкости громкоговорителя и малом коэффициенте усиления микрофона. Если же увеличивать и то, и другое, то в итоге мы получим очень «некомфортную» систему. Собеседник на противоположном конце провода будет слышать в трубке очень громкий тональный сигнал и эхо от своего собственного голоса. Если задействовать подобную систему с обоих концов телефонной линии, то в результате самовозбуждения будет генерироваться свист. Чтобы избежать этого, необходимо подавлять эхо-сигналы и обеспечить определённый уровень переходного затухания сигнала в оконечном устройстве.

На первый взгляд, самое простое решение состоит в вычитании соответствующим образом масштабированного сигнала на входе громкоговорителя из сигнала на выходе микрофонного усилителя. Однако это возможно, только если акустический сигнал на входе микрофона в точности соответствует акустическому сигналу на выходе громкоговорителя. Конечно, хорошо, если условия помещения соответствуют концертному залу (в котором эхо полностью отсутствует), но чаще всего это не так. Наоборот — обычно приходится учитывать всевозможные эхо-сигналы с различным временем задержки, реверберацией и фазовыми сдвигами.

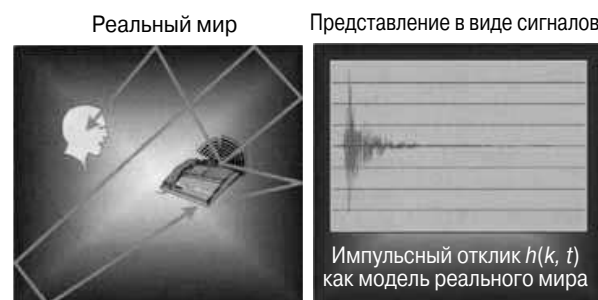


Рис. 11.33. Модель акустического окружения.

Если говорить о том, какая из существующих теоретических моделей наиболее адекватно описывает эти фазовые сдвиги, задержки и реверберацию звукового сигнала, то следует остановиться на импульсном отклике $h(k)$ (Рис. 11.33). При этом мы исходим из допущения, что влияние акустической среды на источник сигнала математически описывается линейным оператором. К счастью, природа была к нам благосклонна, и акустические эффекты в замкнутом пространстве действительно могут быть описаны с помощью линейных операторов.

Что же касается нелинейных эффектов, таких как искажения звука в громкоговорителе или резонансные звуковые колебания, возникающие в корпусе телефона, то их можно избежать за счёт оптимальной с точки зрения акустики конструкции телефона. Следует также принимать во внимание те или иные изменения внутри помещения. Например, импульсный отклик может измениться, если открыть дверь в комнату, где расположен телефон, положить папку на телефон или ходить по комнате. Поэтому следует использовать зависимость импульсного отклика от времени $h(k, t)$. Далее нужно подать на цифровой фильтр, характеристика которого соответствует функции $h(k, t)$, сигнал, поступающий на вход громкоговорителя, и вычесть выходной сигнал этого фильтра из сигнала, поступающего с выхода микрофонного усилителя. В результате, эхо-сигнал и сигнал акустической обратной связи между громкоговорителем и микрофоном будут скомпенсированы, а в линию поступит только речевой сигнал от абонента (Рис. 11.34).

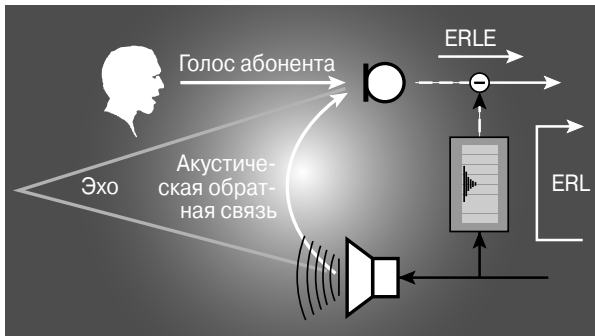


Рис. 11.34. Принцип подавления эха.

Для того чтобы создать систему эхоподавления, необходимо иметь алгоритм, который осуществлял бы адаптивную подстройку коэффициентов фильтрации цифрового фильтра, реализующего функцию импульсного отклика $h(k, t)$ в соответствии с реальным акустическим окружением. Учитывая, что разрешающая способность фильтра имеет конечную величину, а функция импульсного отклика является отнюдь не идеальной моделью окружающего мира, на практике эхоподаватель может лишь ос-

лабить эхо-сигнал. Параметр, характеризующий эффективность этого ослабления, называется относительным коэффициентом подавления эхо-сигнала (Echo Return Loss Enhancement — ERLE¹⁾). Ещё более важным параметром является коэффициент ERL (Echo Return Loss — затухание эхо-сигнала), который представляет собой отношение сигналов на входе громкоговорителя (входной сигнал системы эхоподавления) и на выходе системы эхоподавления. Следует также принимать во внимание эффект акустической обратной связи между громкоговорителем и микрофоном. В результате на значение коэффициента ERLE будут влиять коэффициент усиления микрофона и громкость громкоговорителя.

Существуют два основных метода реализации систем эхоподавления. Полнодиапазонный режим с максимальной длительностью задержки в шлейфе 5 мс и поддиапазонный режим, который обладает значительно более высокими адаптивными возможностями, но длительность задержки при этом составляет до 35 мс. Для стандартного офисного телефона этот параметр составляет 5 мс. Поддиапазонный режим применяется в системе GSM и видеотелефонах.

Полнодиапазонный режим

Данный режим реализуется на основе нормализованного алгоритма по критерию наименьшего среднеквадратичного отклонения (Normalized Least Mean Squares — NLMS), который иногда называют стохастическим градиентным алгоритмом. В качестве фильтра эхо-сигнала используется фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ). Коэффициенты фильтра регулируются таким образом, чтобы обеспечить минимальное среднеквадратичное значение частоты появления ошибок фильтра. Величина коррекции пропорциональна отрицательному значению градиента, что шаг за шагом увеличивает точность работы (качество адаптации) фильтра. Максимальное число отсчётов (tap) фильтра может составлять 768. Количество отсчётов фильтра непосредственно влияет на глубину подавления эха²⁾

¹⁾ Параметр ERLE представляет собой отношение энергий неподавленного и подавленного эхо-сигналов. — Примеч. ред.

²⁾ Необходимая глубина подавления эха определяется временем задержки эхо-сигнала, т.е. расстоянием до источника отражения. — Примеч. ред.

(tail length), которая рассчитывается по формуле «число отсчётов фильтра / 8000». Если длительность эхо-сигнала, вызванного реверберацией в помещении, превышает глубину подавления эха адаптивным фильтром, то подавления данного эхо-сигнала не происходит. Обычно, требуемая глубина подавления эха составляет не более 50 мс.

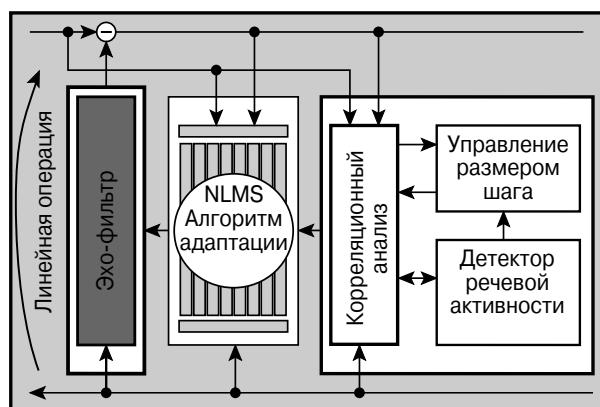


Рис. 11.35. Структурная схема эхоподавителя, работающего в полнодиапазонном режиме.

На Рис. 11.35 приведена структурная схема системы эхоподавления. Точность адаптации системы обеспечивается благодаря блоку корреляционного анализа, который решает, достаточен ли уровень речевой активности на дальнем конце линии, чтобы начать процесс адаптации, а если речевая

активность присутствует и на ближнем конце линии, то адаптация немедленно прекращается. Прерывание этого процесса необходимо потому, что в случае, когда адаптация происходит во время двухстороннего разговора (double talk), алгоритм будет адаптировать импульсный отклик к суммарному сигналу (голос абонента и эхо), что недопустимо.

Шумоподавление

В тракт передачи сигнала после эхоподавителя может быть включён блок шумоподавления. Уменьшение спектрального шума производится в том частотном диапазоне, в котором не обнаружена речевая активность. Максимальный уровень шумоподавления может регулироваться. Не рекомендуется задавать этот уровень большим, чем 15 дБ. В противном случае, голос, передаваемый по линии связи, начинает звучать неестественно.

Поддиапазонный режим

Так же, как и в полнодиапазонном режиме, здесь используется адаптивный алгоритм NLMS. Имеется 8 частот, наименьшая из которых (поддиапазон 0) используется для передачи вещественной части комплексного сигнала. Остальные поддиапазоны делятся на вещественную и мнимую части (Рис. 11.36). Таким образом, в системе ока-

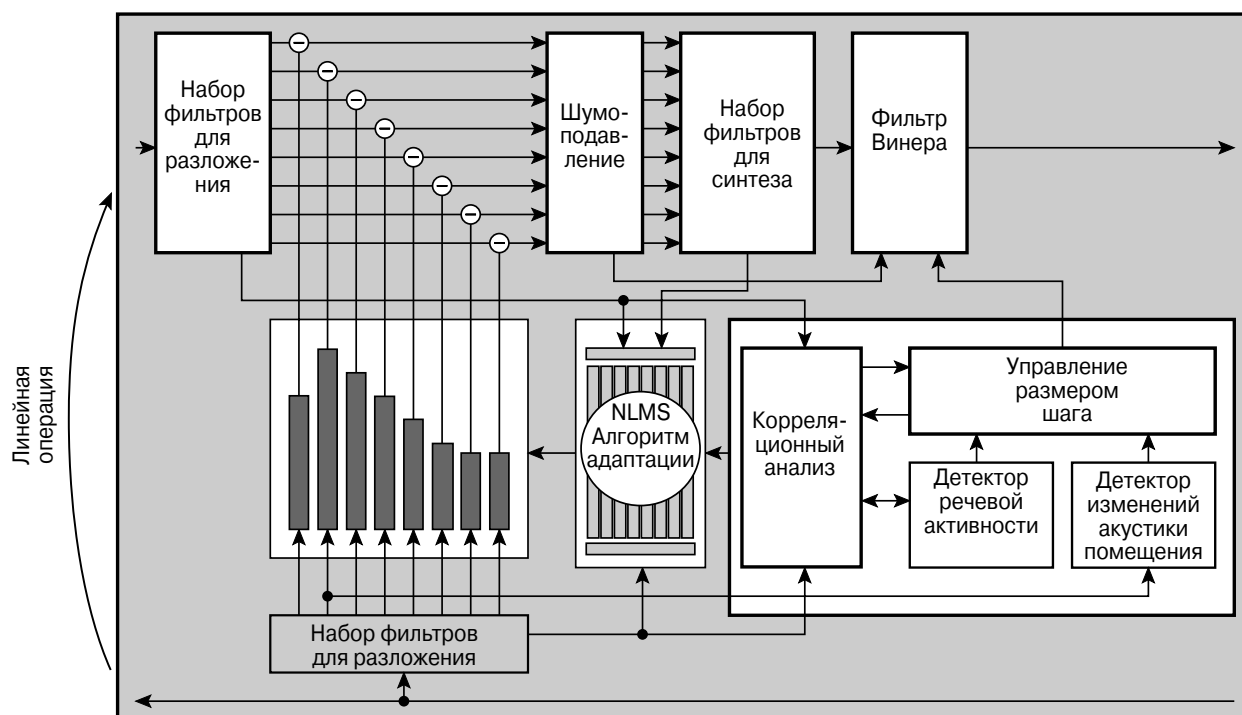


Рис. 11.36. Структурная схема эхоподавителя, работающего в поддиапазонном режиме.

зываются задействованы 15 КИХ-фильтров, и каждый поддиапазонный фильтр адаптируется отдельно.

Поскольку обработка сигналов производится отдельно в каждом поддиапазоне, шумоподавление также осуществляется в поддиапазонах. Программирование этой функции производится так же, как для полнодиапазонного режима. Поскольку адаптация для каждого из поддиапазона происходит последовательно, требования к ресурсам DSP-процессора оказываются ниже, чем в полнодиапазонном режиме. Тем не менее, в целом адаптация фильтра осуществляется значительно быстрее. Изменение акустики в помещении (где находится телефон) отслеживает специальный детектор (room change detector). Он представляет собой небольшой вспомогательный эхоподавитель с цифровым фильтром, который осуществляет всего несколько отсчетов только в поддиапазоне 1. Детектор используется для коррекции ошибок, возникающих в процессе адаптации фильтров эхо-сигнала. Например, пусть в телефон поступил входящий вызов, и фильтры эхоподавателя оптимально адаптировались. Размер шага уменьшается до минимума, чтобы поддерживать хорошую адаптацию фильтра. Если теперь абонент положит какую-либо папку на телефон, то параметры фильтров уже не будут соответствовать изменившейся акустичес-

кой обстановке в помещении, что потребует новой адаптации. Однако поскольку размер шага мал, параметры фильтров будут изменяться очень медленно. Детектор, определяющий изменение акустики в помещении, содержит небольшой фильтр, размер шага которого фиксирован (т.е. не изменяется в процессе адаптации), поэтому он очень быстро адаптируется к новым условиям. Когда разность между сигналом на его выходе и сигналом на выходе основного эхо-фильтра превышает определенное пороговое значение, размер шага всех фильтров для всех поддиапазонов увеличивается до максимума, что позволяет осуществить быструю адаптацию.

11.9.5. Рекомендации ITU-T

Международный союз электросвязи (ITU) в 2000 году обновил большинство рекомендаций, относящихся к системам hands-free. Инженеры-акустики могут использовать их (см. Табл. 11.2) при проектировании соответствующих устройств. Данные рекомендации касаются реализации систем громкоговорящей связи, обеспечивающих хорошее качество передачи речи. Тем не менее, создание высококачественных телефонов требует большого практического опыта.

Таблица 11.2. Рекомендации ITU-T для оконечного оборудования hands-free

Характеристики канала передачи для оконечных устройств hands-free		
P.340	05/2000	Характеристики канала передачи и параметры, определяющие качество передачи речи, оконечных устройств hands-free
P.342	05/2000	Характеристики канала передачи в «телефонной» полосе частот (300...3400 Гц), характеристики цифровых громкоговорящих телефонных аппаратов и телефонных аппаратов с системами hands-free
Опорный (номинальный) уровень громкости		
P.76		Определение опорного уровня громкости: основные принципы
P.79	09/1999	Вычисление опорного уровня громкости для телефонных аппаратов
«Эхо говорящего»		
G.131	08/1996	Управление уровнем сигнала «эхо говорящего»
Методы испытаний и испытательные сигналы		
P.501	05/2000	Испытательные сигналы, используемые в телефонометрии
P.502	05/2000	Методы объективных испытаний для систем передачи речи с использованием сложных испытательных сигналов
P.581	05/2000	Использование модели HATS (Head and Torso Simulator — устройство, имитирующее голову и туловище человека) для испытаний оконечных устройств hands-free
P.832	05/2000	Метод субъективной оценки характеристик оконечных устройств hands-free

11.10. Архитектуры DSL

Технологии и системы DSL (Digital Subscriber Line — цифровая абонентская линия) благодаря широкому разнообразию решаемых ими задач постепенно завоёвывают рынок телекоммуникаций. В процессе своего развития они не только открывают новые возможности и перспективы, но и вносят на рынок дезорганизацию и расте-

рянность. В данном разделе приведено краткое описание технологии, которая позволяет передавать информацию по медной абонентской линии, а также дан обзор ряда DSL-технологий.

В Табл. 11.3 представлены различные стандарты, а также соответствующие им параметры, такие как скорость передачи данных, методы передачи и максимальная длина шлейфа.

Таблица 11.3. Основные характеристики DSL-технологий

Параметры DSL-трансиверов		DMT ADSL	CAP RADSL	CAP S/HDSL	2B1Q S/HDSL	2B1Q IDSL	CAP SDSL	G.shdsl	ReachDSL
Симметричные	128 Кбит/с	×	×	×	×	×	×	×	×
	384 Кбит/с	×	×	×	×		×	×	×
	512 Кбит/с	×	×	×	×		×	×	×
	768 Кбит/с		х	×	×		×	×	×
	1 Мбит/с		х	×	×		×	×	×
	T1 1.544 Мбит/с			×	×		×	×	
	E1 2.048 Мбит/с			×	×		×	×	
Асимметричный нисходящий поток		×	×						
Поддержка аналоговых телефонных линий		×	×	×					×
Возможность выбора скорости передачи данных		×	×	планируется в будущем	планируется в будущем		×	×	×
Автоподстройка скорости передачи данных		×	×				×	×	×
Эхоподавление		*		×	×	×	×	×	
FDM		*							
Длина шлейфа (кабель AWG24**)		5.4 км (1.5 Мбит/с)	5.4 км (1.5 Мбит/с)	4.2 км (HDSL)	3.0 км	7.9 км	9 км (128 Кбит/с)	4.5 км (1.5 Мбит/с)	5.4 км (512 Кбит/с)***
		1.8 км (7 Мбит/с)	1.8 км (7 Мбит/с)	3.6 км (SDSL)			6.4 км (768 Кбит/с)		
Длина шлейфа (кабель Ø 5 мм)		5.5 км (1.5 Мбит/с)	5.5 км (1.5 Мбит/с)	4.3 км (HDSL)	3.0 км	8.0 км	8.9 км (128 Кбит/с)	4.4 км (1.5 Мбит/с)	
		1.8 км (7 Мбит/с)	1.8 км (7 Мбит/с)	3.6 км (SDSL)			6.4 км (768 Кбит/с)		
* Данная опция поддерживается только некоторыми производителями. ** Американский стандарт соединительного кабеля. *** При скорости передачи 128 Кбит/с длина шлейфа не ограничена (для существующих телефонных служб).									

11.10.1. Основные понятия

Коммутируемая телефонная сеть общего пользования (Public Switched Telephone Network — PSTN) и сеть локального (абонентского) доступа спроектированы таким образом, что максимальная частота передаваемого по ним аналогового речевого сигнала не превышает 3400 Гц. Соответственно, частотный спектр сигналов, передаваемых по телефонным абонентским линиям такими устройствами, как телефоны, модемы для коммутируемых (dial-up) соединений, факс-модемы или модемы для выделенных линий, лежит в диапазоне от 0 до 3400 Гц. Максимально достижимая скорость передачи данных при этом составляет не более 56 Кбит/с. Каким же образом при использовании технологии DSL можно передавать по тем же самым медным проводам данные со скоростью в миллионы битов в секунду? Ответ на этот вопрос очень прост — надо выйти за границу 3400 Гц. При DSL используется гораздо более широкий диапазон частот, чем диапазон речевого канала. Реализация этого метода требует передачи информации в широком диапазоне частот с одного конца медной линии к расположенному на другом конце линии дополнительному устройству, которое принимает широкополосный сигнал на дальнем конце медного шлейфа.

При этом необходимо минимизировать влияние ряда следующих эффектов:

1. Затухание — ослабление сигнала при передаче его по медной абонентской линии. Величина затухания сигнала зависит также и от разводки телефонных проводов внутри помещения.
2. Потери из-за дополнительных подключений (bridged taps) — несогласованные параллельные подключения (отводы) к абонентской линии являются причиной дополнительных потерь сигнала при его передаче по шлейфу. Максимальное ослабление сигнала наблюдается на частоте, длина волны которой в четыре раза превышает длину параллельного подключения.
3. Перекрёстные помехи — интерференция (взаимные помехи), возникающая между двумя проводами в одном жгуте при передаче по ним электрических сигналов.

Затухание и связанные с ним ограничения длины абонентской линии

Процесс передачи электрического сигнала можно сравнить с ездой на автомобиле. Чем быстрее вы едете, тем больше топлива расходуется на преодоление заданной дистанции и тем скорее придётся производить дозаправку. Так и при передаче электрического сигнала по медной линии связи — использование более высоких частот (что требуется для поддержки высокоскоростных сервисов) приводит к уменьшению длины абонентского шлейфа. Это связано с тем, что при прохождении электрических сигналов по медным проводам высокочастотные сигналы затухают быстрее, чем низкочастотные.

Потери из-за дополнительных подключений

Несогласованные параллельные подключения к абонентской линии являются причиной дополнительных потерь сигнала при его передаче по шлейфу. Максимальное ослабление сигнала наблюдается на частоте, длина волны которой в четыре раза превышает длину параллельно подключённого провода. Поскольку длина волны обратно пропорциональна частоте, наличие коротких параллельных отводов в наибольшей степени сказывается на величине потерь при использовании широкополосных услуг, в то время как длинные параллельные отводы оказывают влияние на работу узкополосных сетей. Большинство абонентских шлейфов содержат как минимум один дополнительный параллельный отвод, а при наличии большого количества таких отводов (подключений) наблюдается эффект накопления потерь. Телефонные кабели, проложенные в зданиях и помещениях, также имеют дополнительные параллельные отводы, при этом максимальные потери возникают на коротких отводах. Следовательно, указанные потери в меньшей степени оказывают воздействие на работу тех служб, которые используют более низкие частоты.

Влияние перекрёстных помех

При прохождении модулированного сигнала по медной линии связи часть его электромагнитной энергии излучается и попадает в соседние абонентские линии, нахо-

дящиеся в том же жгуте проводов. Эти взаимные электромагнитные наводки называются перекрёстными помехами. В телефонной сети используются изолированные витые пары медных проводов, объединённые в общий кабель (bonded cable). Если по двум соседним линиям этого кабеля передаётся информация в одном и том же частотном диапазоне, то в результате интерференции сигналов могут возникнуть значительные перекрёстные помехи. Сигнал, наведённый с соседней линии, накладывается на исходный сигнал, передаваемый по медному абонентскому шлейфу, в результате чего форма исходного сигнала изменяется.

11.10.2. Использование оборудования ADSL

Увеличить дальность действия телефонной сети с различными линейными кодами можно лишь в результате тщательного исследования работы линии как таковой. Такие исследования показывают, что передача сигнала от АТС к удалённому абоненту может осуществляться на гораздо большее расстояние, чем передача сигнала в обратном направлении, поскольку воздействие перекрёстных помех в медных шлейфах значительно сильнее проявляется на стороне АТС, чем на стороне удалённого абонента. Это связано с тем, что по мере приближения к АТС увеличивается количество медных проводов, плотно «упакованных» в большие жгуты и потому подверженных влиянию перекрёстных помех. И наоборот, по пути от АТС к конечным пользователям абонентские шлейфы обычно разветвляются в различных направлениях, поэтому проводов в жгуте становится всё меньше и меньше. Таким образом, передатчики, расположенные на дальнем конце медной линии связи, вносят меньшие перекрёстные помехи. Ещё один полезный результат исследования физических характеристик телефонной линии состоит в том, что низкочастотные сигналы ослабляются меньше, чем высокочастотные, поэтому для передачи сигналов в направлении к АТС используется низкочастотный сигнал. Это гарантирует, что сигнал от удалённого абонента, поступающий на телефонную станцию, где уровень перекрёстных помех максимален, будет достаточно сильным и подвергнется меньшему влиянию помех.

Итак, следует запомнить, что сигнал высокой частоты более надёжно передаётся от АТС к удалённому абоненту, нежели в обратном направлении. Устройства, которые реализуют данную концепцию (передача данных на высокой частоте от АТС к получателю услуг и на низкой частоте — в обратном направлении), относятся к так называемому ADSL-оборудованию (Asymmetric Digital Subscriber Line — асимметричная цифровая абонентская линия). Диапазон рабочих частот ADSL-служб показан на Рис. 11.37.

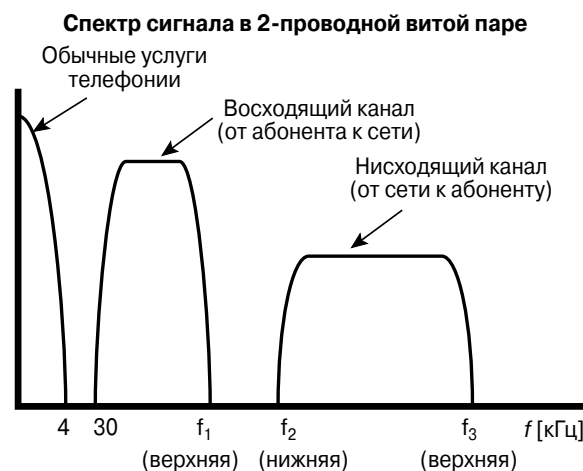


Рис. 11.37. Диапазон рабочих частот ADSL-служб.

Повышение экономической эффективности ADSL-оборудования связано с выполнением следующих основных требований:

- создание новых первоклассных услуг и расширение существующих услуг, обеспечивающих, например, повышенную скорость передачи данных, возможность работы с потоковым видео и голосовыми услугами;
- увеличение базы пользователей за счёт расширения зоны действия сети;
- снижение расходов на системное проектирование, внедрение и обслуживание оборудования, а также снижение непроизводительных эксплуатационных расходов.

В середине 2002 года Международный союз электросвязи одобрил стандарт ADSL2, выпустив рекомендации ITU-T G.992.3 (G.dmt.bis) и G.992.4 (G.lite.bis), Данные рекомендации направлены на решение перечисленных выше вопросов, без привлечения (и это главное требование) до-

полнительных дорогостоящих аппаратных и программных средств. Таким образом, обеспечение совместимости стандарта ADSL2 с существующими и хорошо известными стандартами ADSL позволяет уменьшить стоимость ADSL-услуг; при этом у провайдеров появляется возможность предоставления новых, более эффективных ADSL-услуг большему количеству пользователей.

В области перспективных технологий, не основанных на инфраструктуре ATM (Asynchronous Transfer Mode — асинхронный режим передачи), использование стандарта ADSL2 открывает путь к созданию «чистой» IP-инфраструктуры (поскольку в новом стандарте, в отличие от ATM-ориентированного старого стандарта ADSL, отсутствует необходимость использования оконечного оборудования ATM и инкапсуляции данных по ATM-протоколу).

Начиная с первого квартала 2003 года, компания Infineon Technologies, один из ведущих производителей полупроводниковых компонентов для АТС и абонентского оконечного оборудования (Customer-Premises Equipment — CPE) разрабатывает решения, направленные на поддержку стандарта ADSL2. Производители системного оборудования заинтересованы в использовании чипсетов Infineon в таких системах, как DSLAM ((Digital Subscriber Line Access Multiplexer — цифровой абонентский концентратор доступа), DCL (Digital Loop Carrier — цифровая система уплотнения абонентских линий) и ONU (Optical Network Unit — блок оптоволоконной сети), что расширяет их функциональность и востребованность на уже существующих и перспективных рынках. Наконец, конечные пользователи также остаются в выигрыше, получая новые, улучшенные услуги по более привлекательным ценам.

Достоинства ADSL2 с точки зрения пользователей, провайдеров и операторов местной связи

С целью удовлетворения упомянутых выше требований в стандарт ADSL2 были внесены технические улучшения, к которым относятся:

- увеличение скорости передачи данных и повышение производительности, особенно для длинных шлейфов;
- режимы энергосбережения;

- режим диагностики;
- плавная подстройка скорости передачи (Seamless Rate Adaptation — SRA);
- объединение каналов, IMA (Inversed Multiplexing for ATM — инверсное мультиплексирование для ATM);
- передача голоса по DSL (Voice Over DSL — VoDSL) и передача голоса по DSL в отдельных каналах (Channelized Voice Over DSL — CVoDSL);
- поддержка услуг, основанных на пакетной передаче данных.

Ниже описываются технические подробности реализации данных функций и преимущества их использования для конечных пользователей и производителей оборудования. Следует отметить, что в большинстве случаев для этого требуется совместимость со стандартом ADSL2 как со стороны оборудования АТС, так и со стороны абонентского оконечного оборудования (CPE). Если в ходе процедуры квитирования выясняется, что с одной из сторон отсутствует поддержка ADSL2, то в качестве запасного варианта может использоваться «облегченный» протокол G.dmt/lite.

ADSL2 обеспечивает значительное увеличение скорости передачи данных и дальности действия для длинных абонентских линий и при наличии узкополосных помех, т.е. при низком отношении сигнал/шум. Это достигается, главным образом, за счёт одноканальной QAM-конstellляции и обязательного решётчатого кодирования (в стандарте ADSL данный метод планировался как дополнительная опция). Кроме того, приёмник может переупорядочивать тональные сигналы, благодаря чему обеспечивается повышенная устойчивость к высокочастотным помехам, поскольку приёмник может рассредотачивать энергию нестационарного шума, вызванного высокочастотными помехами, чтобы повысить эффективность работы декодера Витерби.

В соответствии со стандартным протоколом ADSL, передача определённого числа служебных (дополнительных) битов в каждом кадре «съедает» 32 Кбит/с от заявленной скорости передачи данных (в случае же длинных линий с малой скоростью передачи нисходящих данных это составляет «львиную долю» полезного трафика). Протокол ADSL2 позволяет программно задавать количество служебных битов в кадре (их поток регулируется от 4 до 32 Кбит/с).

Благодаря этому, удаётся снизить указанные выше потери в скорости передачи. Дополнительное увеличение пропускной способности длинных линий связано с усовершенствованием структуры кадра, что позволяет повысить эффективность использования кода Рида-Соломона.

Ещё одним достоинством стандарта ADSL2 являются многочисленные усовершенствования алгоритма инициализации, такие как снижение передаваемой мощности на обоих концах линии с целью уменьшить уровень эхо-сигнала на ближнем конце и перекрёстные помехи; повышенная устойчивость к влиянию дополнительных параллельных подключений благодаря способности приёмника определять положение пилот-тона; режим отключения поднесущей во время инициализации системы (с целью измерения уровня ВЧ помех для схемы помехоподавления); оптимизированное обучение и режим ускоренной инициализации, необходимый для быстрого восстановления системы после ошибок.

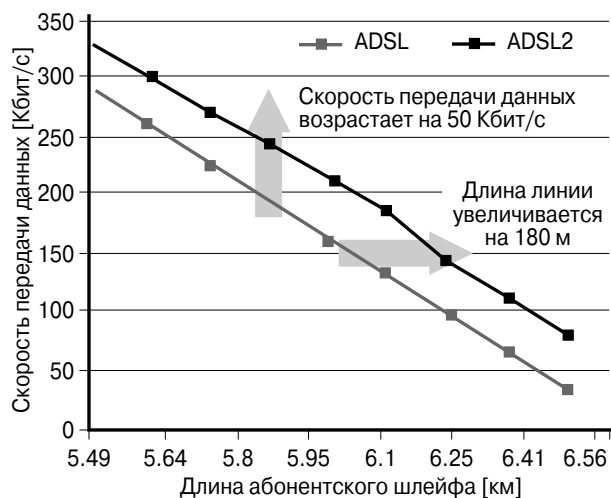


Рис. 11.38. Зависимость скорости передачи данных от дальности действия сети (длины линии) для стандартов ADSL и ADSL2.

Первоочередная цель всех перечисленных усовершенствований состоит в повышении производительности и надёжности работы длинных абонентских линий и, следовательно, в увеличении числа пользователей ADSL-услугами. На **Рис. 11.38** приведены зависимости скорости передачи данных от дальности действия сети для стандартов ADSL и ADSL2. Как видно из данного рисунка, следствием улучшений

стандарта стало расширение зоны обслуживания сети примерно на 6%, что является хорошим результатом, поскольку позволяет увеличить количество абонентов. Необходимо отметить, что приведённые на рисунке данные по улучшению характеристик длинных шлейфов получены в условиях «реальных» сетей, а не в лаборатории. Теоретический максимум для скорости передачи нисходящих данных ADSL2 составляет 15.3 Мбит/с, однако в условиях реальной абонентской линии такая скорость никогда не будет достигнута. Если не учитывать возможность появления кардинально новых инженерных решений, то существенного повышения скорости передачи восходящих и нисходящих потоков данных можно ожидать лишь за счёт расширения полосы пропускания ADSL-систем (как это и запланировано в стандарте ADSL+).

Режимы энергосбережения

Помимо предусмотренного стандартом ADSL режима снижения мощности на 12 дБ, а также ряда различных «спящих» и экономичных режимов питания, которые обычно широко используются в устройствах, предлагаемых на рынке телекоммуникаций, методы уменьшения потребляемой мощности ADSL-систем до сих пор не стандартизированы. Например, это относится к случаю, когда модем, входящий в абонентское оконечное оборудование, включён, но не передаёт данные (что, как правило, и происходит, когда модем круглосуточно работает в режиме он-лайн). Потери мощности и связанный с этим перегрев оборудования представляет собой огромную проблему, особенно если речь идёт о системах DLC или блоках с дистанционным управлением, характеризующихся жёсткими требованиями к уровню выделения тепловой энергии. Данная проблема в стандарте ADSL2 решается за счёт наличия двух режимов пониженного энергопотребления. Режим L2 активируется в том случае, когда модем на АТС обнаруживает, что трафик на активной ADSL-линии передачи данных недостаточно интенсивный. В режиме L2 центральная АТС ограничивает передаваемую мощность, однако ADSL-соединение остаётся активным и система, в случае необходимости, может очень быстро переключиться в полнофункциональный режим питания L0. Данный механизм не является

прозрачным для пользователя. Использование режима L2 может дать очень большой энергосберегающий эффект для систем АТС. Например, чипсет GEMINAX производства Infineon в режиме L2 рассеивает в 2 раза меньшую мощность, чем в режиме L0 при максимальной передаваемой мощности. Режим L3 стандартизирован в качестве «спящего» режима, который используется, когда абонент отключён от линии. Переход в режим L0 (режим диагностики шлейфа) возможен после короткой 3-секундной перезагрузки системы.

Поскольку технология ADSL получила широкое распространение в различных странах, особое значение для повышения её экономической эффективности приобретают оценка качества работы абонентской линии, контроль предоставляемых ADSL-услуг и организация жгутовых соединений, так как этим обеспечивается снижение затрат на подготовку к работе и техническое обслуживание сети. Стандарт ADSL2 определяет новые процедуры диагностики линии, к которым относятся измерения уровня шума в линии, затухания сигнала в шлейфе и отношения сигнал/шум. Эти измерения параметров линии могут производиться как со стороны АТС, так и со стороны абонентского оконечного оборудования (CPE). В последнем случае, результаты измерений в заданном формате пересылаются в АТС. Эти данные затем используются при количественной оценке качества работы линии, её шумовых характеристик и искажений сигнала в ходе испытаний. Испытания могут проводиться при установке, после установки либо в режиме активного ADSL-соединения параллельно с передачей данных.

Интерпретация полученных при испытаниях данных может осуществляться на уровне ADSL-трансивера, на уровне цифровой линейной карты или на уровне системы управления сетью (Network Management System — NMS). Однако сам по себе интерпретатор в ADSL не входит. В ADSL2 предусмотрен режим диагностики шлейфа (Loop Diagnostic Mode), который поддерживает разработанную совместно компаниями Aware и Infineon процедуру двухстороннего измерения параметров соединения и квитирования DrDSL. Данный программный пакет включает в себя совместимый с ADSL2 алгоритм интерпретации результа-

тов, который, в зависимости от требований производителя системы и поддерживаемых функций, может быть реализован либо в информационном ядре модема (блок приёма-передачи модулированных данных) ADSL, либо на уровне NMS.

Плавная подстройка скорости передачи

Другой аспект реализации систем ADSL массового доступа, связанный с прокладкой кабелей и выявлением неисправностей, состоит в возрастании уровня перекрёстных помех. Чем большее количество витых пар, которые используются для передачи широкополосных сигналов, объединены в кабельный жгут, тем выше оказывается уровень перекрёстных помех между ними. Эти помехи не только ухудшают качество предоставляемых ADSL-услуг, но и могут привести к потере активного ADSL-соединения. Помимо перекрёстных помех в кабеле, существуют внешние факторы, вызывающие искажения сигналов (например, помехи от АМ-радиостанций).

Стараясь обойти указанные проблемы, провайдеры часто ограничивают максимальное количество витых пар в одном ADSL-кабеле, за счёт чего уменьшаются накладные расходы, которые не могут быть точно определены и отслежены. Такой подход, однако, приводит к неполному использованию пропускной способности сети, что может создать эффект «бутылочного горлышка» и вызвать проблемы с организацией сети в районах с высокой плотностью населения. Кроме того, не всегда можно идентифицировать и принять в расчёт временные нарушения (помехи).

Для решения этой проблемы в стандарте ADSL2 в качестве опции предусмотрена плавная подстройка скорости передачи (Seamless Rate Adaptation — SRA), позволяющая ADSL-системе динамически изменять скорость передачи данных во время работы. С этой целью в стандарте ADSL2 уровни модуляции сигналов и синхронизации кадров не связаны друг с другом, т.е. параметры, определяющие скорость передачи данных, могут быть модифицированы без изменения параметров кадровой синхронизации (в противном случае, в модеме мог бы произойти сбой кадровой синхронизации). Режим SRA используется для оптимизации распределения кабелей (управления соединениями, организации кабельной сети);

благодаря чему можно избежать проблем, возникающих в процессе реализации ADSL-услуг и связанных с воздействием постоянных или временных помех, а также с увеличением количества абонентов сети.

Объединение каналов

ADSL2 поддерживает стандарт инверсного мультиплексирования для ATM (Inverse Multiplexing for ATM — IMA), т.е. две или более медные витые пары могут быть с помощью чипсета объединены в один ADSL-канал с целью увеличения скорости передачи данных. Благодаря этой возможности провайдеры могут предлагать своим пользователям более развитые высококачественные услуги, при этом не требуется вносить изменения в другие стандарты или модифицировать оборудование.

Передача голоса по DSL

В настоящее время интерес к проблеме передачи голоса и видео по DSL несколько снизился, поскольку реализация такой функции связана с большими капитальными затратами для провайдеров и альтернативных сетевых операторов (Competative Local Exchange Carrier — CLEC). Несмотря на это, будущие системы должны поддерживать услуги одновременной передачи голоса и данных.

Метод передачи голоса по DSL в отдельных каналах (CVoDSL) состоит в следующем: полоса пропускания, выделенная для ADSL, «разбивается» на физическом уровне на ряд речевых 64-Кбит/с каналов, разделённых по времени (Time Division Multiplexing — TDM). За счёт этого удаётся избежать дополнительных издержек, связанных с пакетированием речевых сигналов в ATM или IP (как это происходит при VoDSL). При этом могут быть использованы существующие TDM-коммутаторы и межсетевые интерфейсы, осуществляющие адаптацию передаваемых данных для ATM на 2 уровне (ATM Adaptation Layer 2 — AAL2). Таким образом, поддержка технологии CVoDSL представляет собой интересную опцию стандарта ADSL2, которая позволяет одновременно передавать голос и данные, обеспечивая при этом высокую экономическую эффективность.

Аппаратную поддержку CVoDSL осуществляет информационное ядро ADSL-модема (data-pump), которое через выде-

ленный PCM-интерфейс доставляет голосовые PCM-данные на объединительную плату.

Требования, предъявляемые к передаче голоса и данных, различаются с точки зрения качества обслуживания (Quality of Service — QoS), например по времени задержки и частоте появления ошибок. В связи с этим, ADSL2 предлагает гибкий режим кадровой синхронизации, включая поддержку до 4 каналов однонаправленной передачи кадров (frame bearer) и 4 каналов latency parth. Таким образом, можно разделить полосу пропускания ADSL на несколько каналов с различными характеристиками и использовать их для организации трафика различных типов данных.

Услуги пакетной передачи данных

Существующие стандарты G.dtm/lite определяют ATM как базовую технологию транспортного (Layer 2) уровня передачи данных, даже для «чисто» IP/Ethernet-ориентированных инфраструктур, активно развивающихся в настоящее время. По этой причине все современные ADSL-модемы, предназначенные для АТС и абонентского оконечного оборудования (CPE), используют протокол ATM (однако этот протокол не поддерживается DSLAM и не используется при организации восходящего канала от CPE к АТС).

В связи с этим в ADSL2, в дополнение к стандартным для ADSL функциям STM (Synchronous Transfer Mode — режим синхронной передачи) и ATM TSP-TC, дополнительно предусматривается трансконвергентный уровень пакетной передачи данных (Packet Mode Transmission Trans-Convergence layer — PTM-TC). Соответственно, поддерживаются обязательная, минимальная, максимальная и резервная скорости передачи данных, а также усовершенствованные возможности конфигурации для времени задержки и коэффициента ошибок (BER). Таким образом, внедрение ADSL2 открывает прямой путь к исключению ATM-протоколов не только из восходящих (uplink), но и из нисходящих (downlink) каналов связи, тем более, что уже появились модемы для АТС и CPE с поддержкой ADSL2. Это особенно важно для реализации перспективных IP/Ethernet-ориентированных сетевых инфраструктур, которые не предусматривают

совместимости с устаревшими ATM-протоколами. Тем не менее, вследствие широкой распространённости устаревших ATM-модемов для CPE, данный протокол ещё применяется в абонентских линиях ADSL, однако с развитием стандарта ADSL2 технология IP/Ethernet будет применяться при передаче данных в обоих направлениях.

Другие усовершенствования стандарта ADSL

Помимо описанных выше основных улучшений, отличающих новый протокол ADSL2 от его предшественника, существует ряд менее заметных дополнений, которые, тем не менее, также могут иметь существенное значение:

- усовершенствована процедура инициализации системы, которая обеспечивает возможность программного и аппаратного взаимодействия между чипсетами различных производителей;
- режим быстрого запуска позволяет снизить время инициализации до 3 с;
- в «полностью цифровом» режиме полоса частот речевых сигналов может быть использована для передачи данных, что увеличивает скорость восходящего ADSL-трафика до 256 Кбит/с.

ADSL+ и полупроводниковые интегральные модули нового поколения

Стандарт ADSL2 не следует рассматривать как окончательный итог развития стандарта ADSL с точки зрения производительности и «дружественности» предоставляемых услуг по отношению к пользователю.

В начале 2003 года на телекоммуникационном рынке была представлена усовершенствованная версия стандарта ADSL2 — ADSL+, которая обеспечивает значительно более высокие скорости передачи данных. Ожидается, что при длине линии менее 1 км скорость нисходящего трафика может составлять до 25 Мбит/с. Это достигается за счёт расширения частотного спектра ADSL с 1.1 МГц до 2.2 МГц. Другим существенным усовершенствованием явилось включение в стандарт режима двойного восходящего потока, который в настоящее время опционально входит в протокол ADSL (Annex B) и поддерживается целым рядом чипсетов. Для сетевых инфраструктур с большим количеством коротких абонент-

ских линий использование стандартов ADSL2 и ADSL+ открывает хорошие бизнес-перспективы, связанные с поддержкой новых первоклассных «пакетов» широкополосных услуг. Такие пакеты сетевых услуг могут включать в себя высокоскоростной доступ в Интернет, а также передачу голоса и видео.

Производители чипсетов, разрабатывая решения по аппаратной реализации усовершенствованных протоколов ADSL2 и ADSL+, берут за основу полупроводниковые ADSL-ориентированные компоненты нового поколения. При их проектировании особое внимание уделяется второму, после производительности и дальности действия, важному требованию к системам ADSL — малой потребляемой мощности и малым габаритам. Благодаря этому, производство ADSL-чипсетов и систем набирает ход, тем самым открывая перед телефонными компаниями и производителями систем возможность проводить более взвешенную ценовую политику и предлагать более широкий спектр широкополосных услуг на рынке телекоммуникаций.

Стандарт VDSL с более высокой пропускной способностью и возможностью передачи видеоинформации

VDSL (Very high speed DSL — сверхвысокоскоростная DSL) — это наиболее современная версия цифровой абонентской линии. VDSL-системы продолжают развиваться, поэтому трудно сказать, каковы будут их окончательные возможности, однако предполагаемая скорость передачи нисходящего потока данных может достигать 52 Мбит/с, а в симметричном режиме — 26 Мбит/с.

Высокая скорость передачи данных, обеспечиваемая VDSL, позволит сетевым операторам предлагать пользователям DSL-услуги нового поколения, при этом особое внимание будет уделено видеоприложениям. При скорости передачи данных 52 Мбит/с VDSL-линия может обеспечить пользователю доступ к многоканальному потоковому видео высокого разрешения в формате MPEG-2 и даже к одному или нескольким каналам полноэкранного (full quality) телевидения высокой чёткости (High Definition TeleVision — HDTV). Ряд провайдеров уже предлагает пользователям

тестовые версии VDSL-систем, реализующих указанные функции; при этом в доме у абонента устанавливается устройство, напоминающее абонентскую ТВ приставку системы кабельного телевидения, которая содержит Ethernet-совместимый или другой интерфейс для подключения к компьютеру (это позволяет параллельно с видео получать другие услуги по передаче данных).

Основой технологии DSL является абонентский шлейф, к обоим концам которого

подключаются совместимые устройства. Поэтому наверняка в течение ещё многих лет будут появляться всё новые и новые DSL-технологии. Следовательно, провайдер при выборе DSL-технологии или сетевой инфраструктуры, соответствующих требованиям сегодняшнего дня, должен принимать в расчёт возможность их адаптации к новым технологиям, которые появятся в будущем.

12. ЗАКАЗНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Введение

В отличие от стандартных интегральных схем (ИС), заказные интегральные схемы (Customer Specific Integrated Circuit — CSIC) разрабатываются в соответствии с требованиями заказчика и предназначены для специального применения. Иногда эти компоненты называют также специализированными интегральными схемами (Application Specific Integrated Circuit — ASIC).

Микросхемы CSIC могут быть полностью заказными (full-custom) и полужаказными (semi-custom). Первые разрабатываются производителем полупроводниковых компонентов на уровне транзисторов. Полужаказные ИС базируются на вентильных (логических) матрицах или на наборах ячеек и могут разрабатываться пользователем при технической поддержке со стороны производителя полупроводниковых компонентов (Рис. 12.1).

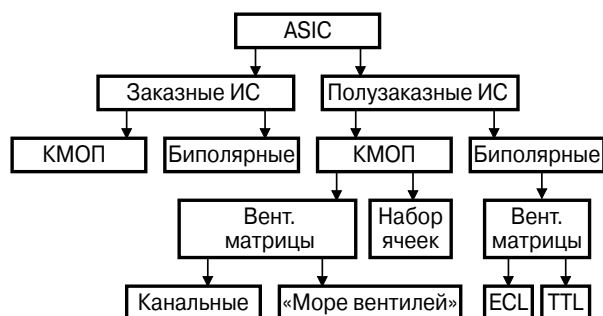


Рис. 12.1. Технологические варианты реализации полужаказных ИС.

Разработка полностью заказных ИС обычно занимает больше времени, зато такие микросхемы имеют несколько меньшие размеры кристалла, чем сопоставимые с ними по характеристикам полужаказные ИС. Поскольку сроки разработки и габаритные размеры существенно влияют на цену прибора, полностью заказные ИС предпочтительно использовать в недорогих устройствах, особенно в случае их массового производства. Главным достоинством полужаказных ИС являются более короткие сроки получения готовой продукции. Ведь чем быстрее новая продукция появится на рын-

ке, тем выше шансы на коммерческий успех. Поэтому указанное достоинство полужаказных ИС часто компенсирует их недостатки (в первую очередь, высокую стоимость).

Разработчикам электронных устройств нередко приходится задавать себе вопрос: «Какие компоненты — стандартные, заказные или полужаказные, — следует выбрать для реализации экономически наиболее эффективного системного решения?» Самые важные факторы, которые следует принимать во внимание в таких случаях, — это системные затраты, сроки разработки, надёжность и гибкость системы.

12.1. Полужаказные ИС

Полужаказные интегральные схемы могут быть построены на основе вентильных матриц либо ИС, представляющих собой набор стандартных ячеек. Приборы данного типа могут разрабатываться заказчиком при технической поддержке производителя ИС.

12.1.1. Вентильные матрицы

Структура вентильной матрицы состоит из так называемых базисных ячеек (вентилей) и связей между ними, реализованных на кристалле посредством канальной технологии. Ячейки содержат от 2 до 8 транзисторов. В ИС на основе КМОП вентильных матриц применяется другая структура, которая позволяет отказаться от технологии канальных логических матриц. Вместо этого используются межэлементные соединения ячеек (логические ячейки). Данная технология называется «море вентиляей», и её применение позволяет уменьшить поверхность кремниевого кристалла (следовательно, и его стоимость).

Пользователь программирует полужаказные ИС с помощью персонального компьютера или рабочей станции. При этом вентили соединяются друг с другом таким образом, чтобы получить требуемые логические функции. Системы автоматизированного проектирования (САПР) содержат библиотеки стандартных элементов (наборы логических функций), использование которых позволяет реализовывать высокоуровневые функции, та-

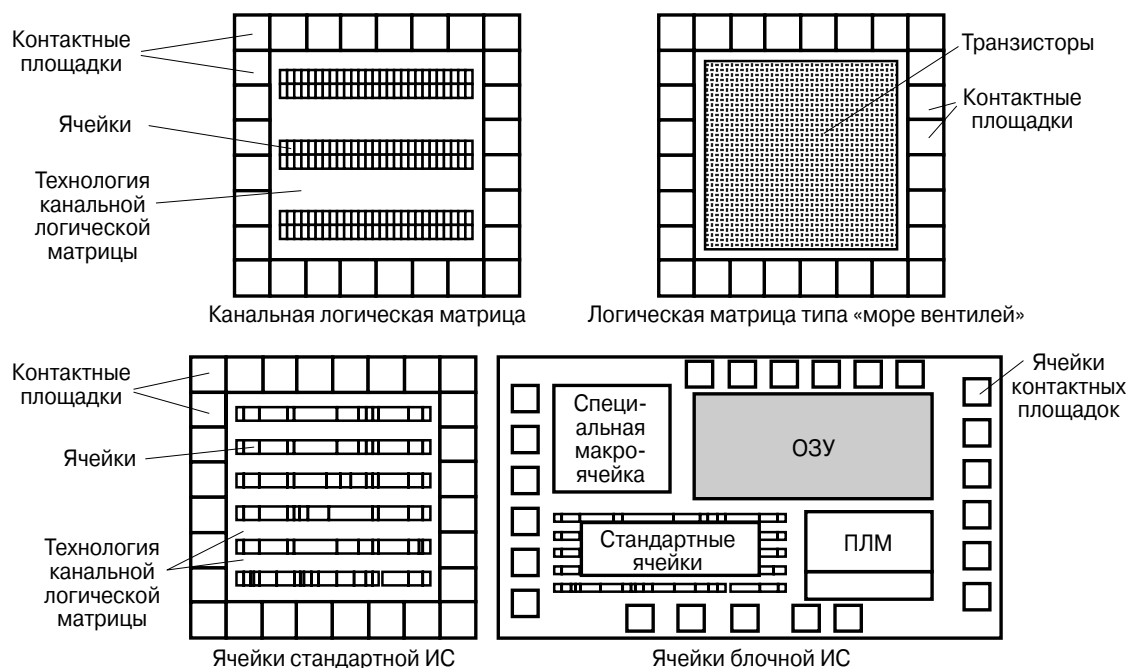


Рис. 12.2. Различные типы полузаказных интегральных схем.

кие как логические вентили, счётчики, мультиплексоры и т.д. В процессе производства полузаказной ИС изготавливается кремниевая пластина, содержащая нескоммутированные вентиляльные матрицы (master — оригинал фотошаблона, так называемый базовый кристалл). Изготовление такого «полуфабриката» обходится дешевле, чем производство готовой полнофункциональной ИС. На последнем этапе производства осуществляется «персонализация» базового кристалла путём выполнения требуемых соединений как внутри ячеек, так и одних ячеек с другими. Таким образом, заказная схема разрабатывается на основе универсального базового кристалла.

12.1.2. ИС на основе готовых ячеек

При проектировании структуры ячеек полузаказных ИС больше не применяются технологии, использующие готовые шаблоны. Расположение и размеры ячеек выбираются индивидуально. Применяется также опция восстановления макроструктуры, сохранённой в библиотеке стандартных элементов (такая макроструктура может включать в себя DRAM, SRAM, процессорное ядро, АЦП/ЦАП и т.п.).

На Рис. 12.2 показаны различные типы полузаказных модулей.

12.1.3. Вентильная матрица или набор готовых ячеек?

Ответ на этот вопрос, прежде всего, определяют следующие факторы:

- время, необходимое для создания опытного образца изделия (с учётом возможных доработок);
- общие затраты на разработку продукции и запуск её в серийное производство.

Фактор времени

Опытные образцы ИС на основе вентиляльных матриц (базовых матричных кристаллов) могут быть изготовлены значительно быстрее, чем ИС на основе готовых ячеек. В первом случае используются «полуфабрикаты» (базовые кристаллы), к которым требуется лишь добавить слой металлизации¹⁾, в то время как для изготовления ИС с готовыми ячейками необходим полный производственный цикл. Соответственно, с момента окончательного утверждения топологии будущей полузаказной ИС до изготовления опытных образцов в первом случае пройдёт от 4 до 7 недель, а во втором — от 12 до 16 недель.

¹⁾ Эти слои, собственно, и осуществляют коммутацию между ячейками матрицы, формируя тем самым компоненты с заданными логическими функциями. — *Примеч. пер.*

Фактор цены

Для сопоставимых проектов разработка ИС на вентильных матрицах стоит в два с лишним раза дешевле, чем разработка ИС на готовых ячейках. При массовом производстве продукции ситуация меняется. В случае мелкосерийного производства (приблизительно 1000...10 000 шт.) стоимости ИС обоих типов одинаковы (либо ИС на вентильных матрицах обходятся чуть дешевле вследствие небольшой стоимости полуфабрикатов базовых кристаллов). При средних объёмах производства (10 000...100 000 шт.) благодаря меньшей площади поверхности кристалла преимущество оказывается у ИС на готовых ячейках, поэтому в данном случае выгоднее использовать именно такие ИС.

12.2. Используемые технологии

Независимо от выполняемых заказными ИС логических функций, характеристики этих приборов в значительной степени определяются технологиями, используемыми при их производстве. Классификация биполярных и КМОП-технологий, представленных на рынке заказных ИС на основе вентильных матриц и готовых ячеек, приведена на **Рис. 12.1**.

12.2.1. Биполярные полузаказные ИС

Биполярные (вентильные) матрицы особенно хорошо подходят для работы на высоких частотах и с малыми задержками переключения вентилях (порядка 30...100 пс). Типичными сферами их применения являются следующие:

- Передача данных:
 - ЦПУ больших компьютеров;
 - периферийные процессоры;
 - управление модулями памяти.
- Информационные технологии:
 - широкополосные системы связи;
 - цифровые системы передачи данных, использующие различные среды (волоконная оптика, коаксиальный кабель, направленная радиосвязь);
 - передача/коммутация сообщений.
- Медицинские технологии:
 - процессоры цифровой обработки сигналов (DSP) в системах сонографии и томографии.
- Метрология:
 - логические анализаторы;
 - тестеры интегральных схем.

Максимальное количество элементов биполярных вентильных матриц семейства SH100G производства Infineon составляет приблизительно 10 000 вентилях (см. **Табл. 12.1**).

Таблица 12.1. Обзор полузаказных ИС семейства SH100G

Базовый матричный кристалл	SH 100 G1	SH 100 G2/G4*	SH 100 G3
Максимальное количество вентилях	3300	1000	10000
Максимальное количество контактных площадок входов/выходов	100	66	144
Максимальное количество контактных площадок для подключения питания	32	20	64
Встроенные в кристалл линейные массивы: количество линейных массивов	2	2	4
количество линейных компонентов	2800	2800	5600
Варианты корпусов (доступны в настоящее время)	C-PGA 88C-PGA 144C-MQFP 152P-TQFP 100PQ2	C-PGA 64C-PGA 88P-TQFP 64PQ2P-TQFP 80PQ2P-TQFP 100PQ2	P-MQFP 208PQ2
Варианты корпусов (планируются в будущем)	P-TQFP 144 PQ2		
Номинальная рассеиваемая мощность	2.5 Вт	0.9 Вт	7.0 Вт
Наличие на рынке	Есть	Есть	Есть
* Только для напряжения питания –3.3 В.			

12.2.2. Полузаказные КМОП ИС

В настоящее время на рынке представлены оба типа полузаказных КМОП ИС — и на основе вентильных матриц, и на основе готовых ячеек, при этом используются современные 0.8-мкм и 0.5-мкм технологии (или даже с меньшими технологическими нормами). Чем меньше расстояние между элементами структуры, тем выше возможная степень (плотность) интеграции и тем выше рабочая частота ИС. В настоящее время наблюдается тенденция к разработке структур с нормой < 0.1 мкм.

При разработке полузаказных ИС следует использовать только такие программные инструменты САПР, в которых гарантированно отсутствуют собственные ошибки. В этом отношении важную роль играет интерфейс пользователя. Для ИС на готовых ячейках особое значение имеет гибкость в процессе разработки схемы. При этом программными средствами могут быть созданы шаблоны для ОЗУ, ПЗУ, программируемых логических матриц (ПЛМ) и других компьютерных структур с индивидуальной архитектурой, а также микропроцессорных ядер и устройств, выполняющих аналоговые функции. Технологии иерархического проектирования позволяют осуществлять разработку, программную симуляцию и тестирование различных подсистем.

12.2.3. Биполярные вентильные матрицы

В настоящее время Infineon производит ИС на основе биполярной технологии В6НФ с временем задержки переключения вентилях около 30 пс. Библиотеки стандартных элементов (макроячеек) содержат макросы, которые определяют логические функции схем, выполненных по технологии ЭСЛ (emitter-coupled logic — эмиттерно-связанная логика) или ТПЛ (current-mode logic — токопереключающая логика, логические схемы на переключателях тока) (Рис. 12.3). Логические функции, задаваемые макросами, протестированы с использованием контрольных микросхем. Могут быть реализованы как простые элементы, например И-НЕ и ИЛИ-НЕ, так и функционально сложные, например счётчики или мультиплексоры. Компания Infineon в помощь разработчикам предлагает библиотеку стандартных функций, в ко-

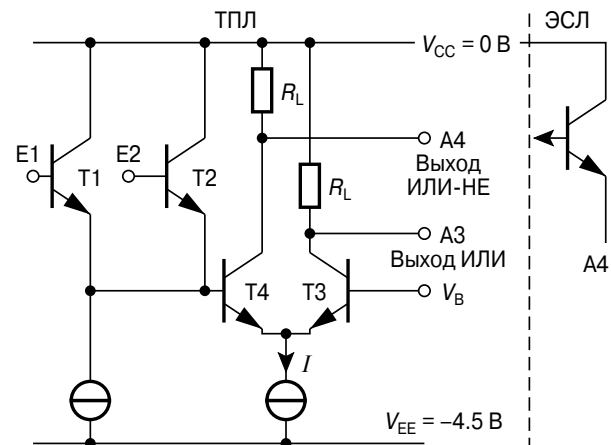


Рис. 12.3. Схемные различия между технологиями ЭСЛ и ТПЛ.

торой собраны более 100 различных вариантов реализации макроячеек.

Компания Infineon производит семейство интегральных микросхем SH100G, которые поддерживают две технологии схемотехнической реализации логических элементов. Выбор наиболее подходящей технологии следует осуществлять, исходя из конкретной области применения.

Логические схемы на переключателях тока (ТПЛ)

Рекомендуется использовать в следующих областях:

- метрология;
- системы передачи данных;
- медицинские приборы.

Это те области, где требуется симметричность выходного сигнала, высокая точность и низкая рассеиваемая мощность. Все эти требования наилучшим образом удовлетворяются при использовании технологии Three Level Series Gating и ТПЛ-технологии.

Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ)

Использовать ЭСЛ-технология особенно выгодно там, где от ИС требуется повышенная нагрузочная способность (например, в системах с шинами обмена данными). Высокая нагрузочная способность ЭСЛ обеспечивается подключением дополнительного эмиттерного повторителя на транзисторе.

Сочетание ЭСЛ/ТПЛ

ИС семейства SH100G позволяют сочетать на одном кристалле технологии ЭСЛ и ТПЛ, чем обеспечивается максимальная гибкость при разработке устройств.

Использование дифференциальных логических схем

Дифференциальные логические схемы имеет смысл применять в быстродействующих каскадах ИС. Они обеспечивают обработку высокочастотных сигналов (для семейства SH100G — до 6 ГГц). Максимальные входная и выходная рабочие частоты зависят от типа корпуса интегральной микросхемы.

Внутрисхемное программирование параметров быстродействия/мощности

Чем выше рабочая частота схемы, тем больший ток она потребляет. Однако при этом увеличивается и рассеиваемая мощность. Исходя из этого, компания Infineon, с одной стороны, производит продукцию, оптимизированную по быстродействию и потребляемой мощности. С другой стороны, имеется возможность индивидуально программировать быстродействие и ток нагрузки каждой из ячеек (элементов) схемы таким образом, чтобы уменьшить общую мощность рассеяния. Данная опция может быть задействована в любой момент в течение всего периода разработки ИС.

Функциональные возможности вентилярных матриц расширяются благодаря использованию принципа series gating. Комбинируя большое количество простых элементов И, ИЛИ, И-НЕ и ИЛИ-НЕ, можно строить сложные структуры, однако это неблагоприятно сказывается на быстродействии схемы и увеличивает рассеиваемую мощность. За счёт «многократного» использования противоточного тока (cross-current) (до 3 дифференциальных усилительных каскадов) площадь, занимаемая логическими элементами на кристалле, и рассеиваемая ими мощность могут быть минимизированы, а время задержки существенно уменьшено.

12.2.4. Биполярные транзисторные матрицы (линейные матрицы)

При производстве ИС на основе транзисторных матриц структура ячеек изначально задана, поэтому нет необходимости обеспечивать поддержку библиотеки стандартных элементов САПР. В качестве специальной опции, микросхемы семейства SH100G содержат 2 или 4 линейные матрицы (Рис. 12.4).

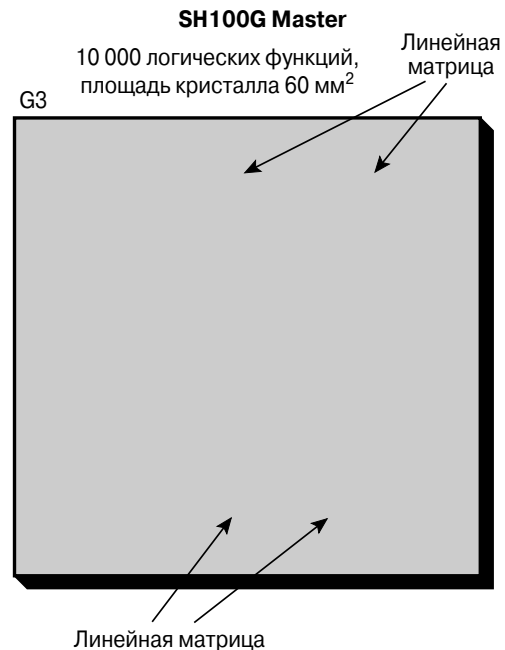


Рис. 12.4. Базовый матричный кристалл семейства SH100G имеет площадь 60 мм² и представляет собой линейную матрицу с 10 000 логическими функциями.

Каждая линейная матрица состоит из:

- 600 транзисторов;
- 800 резисторов;
- 20 конденсаторов;
- 1 драйвера смещения.

Линейная матрица может использоваться для построения аналоговых и цифровых схем, работающих в диапазоне частот до 6 ГГц. Разработчики схем могут спроектировать их самостоятельно или воспользоваться поставляемыми компанией Infineon «аппаратными макросами», предназначенными для реализации таких устройств, как ФАПЧ, ГУН, мультиплексоры и т.д., которые уже испытывались в составе других схем.

12.3. Варианты используемых корпусов

Полузаказные ИС могут поставляться в различных корпусах, ассортимент которых весьма широк. Оптимальный выбор корпуса осуществляется с учётом количества выводов ИС, потребляемой ею мощности и требований монтажа.

Infineon предлагает следующие типы корпусов:

- C-PGA (до 144 выводов);

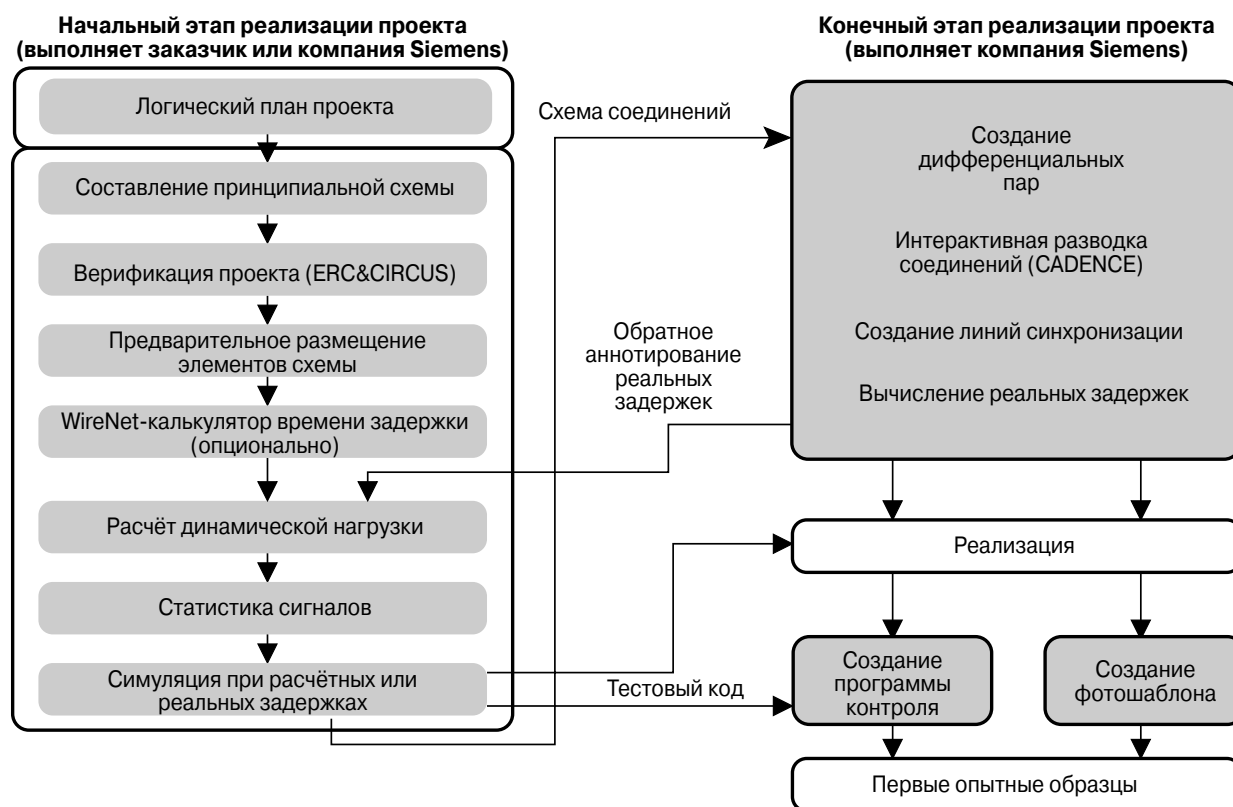


Рис. 12.5. План разработки для микросхемы SH100G.

- P-TQFP — плоский корпус с четырёхсторонним расположением выводов (до 208 выводов);
- PSSOP (до 32 выводов);
- BGA (матричный с шариковыми выводами) — отличается особенно большой плотностью выводов при компактных размерах корпуса.

12.4. Сотрудничество между производителями ИС и заказчиками

Сотрудничество между заказчиком и производителем ИС при необходимости может осуществляться на различных стадиях разработки полузаказной ИС в соответствии с требованиями заказчика. В качестве примера можно привести процесс разработки ИС на основе вентильных матриц (Рис. 12.5).

Основой разработки для каждого проекта является индивидуальный план (логическая блок-схема), предоставляемый заказчиком. Дальнейшие шаги состоят в следующем:

- реализация схемы на базе библиотеки стандартных элементов, предоставляе-

мой производителем полупроводниковых компонентов;

- интеграция схемы в системе САПР;
- предварительная разводка критических узлов схемы;
- программная симуляция;
- программа контроля;
- размещение элементов схемы в интерактивном режиме;
- программная симуляция схемы с учётом реальных временных задержек (обратное аннотирование);
- создание опытных образцов для испытаний (test bit samples);
- изготовление опытных образцов для производства.

Затем осуществляется доработка опытного образца. Она состоит в следующем:

- изготовление комплекта фотошаблонов;
- металлизация базового матричного кристалла;
- тестирование и сборка микросхемы;
- окончательное тестирование;
- передача продукции заказчику.

Кто и как будет выполнять все эти работы — определяет заказчик в индивидуальном порядке. Существует два отработанных подхода к решению этой проблемы.

Передача индивидуального плана ИС (согласование логического плана проекта)

Заказчик обращается в центр разработки, курируемый компанией-производителем полупроводниковых компонентов. После этого производитель осуществляет для заказчика все необходимые работы. У компании Infineon есть центры разработки, расположенные в головном офисе в Мюнхене, а также в офисах её подразделений и региональных торговых представительств.

Передача таблицы соединений (согласование схемы соединений)

Заказчики, которые имеют собственные

системы САПР и обладают необходимым опытом работы с ними, получают (на любом удобном для них носителе данных) библиотеки стандартных элементов от производителя ИС. После интеграции и симуляции (обработки) схемы в системе САПР, заказчик посылает полученный результат производителю ИС. Производитель изготавливает образец разводки соединений, измеряет реальные времена задержки и вновь отправляет результаты измерений заказчику (так называемое обратное аннотирование). Заказчик осуществляет окончательную «доводку» схемы, после чего производитель изготавливает первый опытный образец продукции.

13. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

13.1. Основные понятия

Электромагнитная совместимость (Electro-Magnetic Combatibility — EMC) — это способность электрооборудования удовлетворительно функционировать в условиях электромагнитных воздействий со стороны окружающей среды, а также не оказывать недопустимого воздействия на эту окружающую среду, которая включает в себя другое электрооборудование.

В последнее время пристальное внимание уделяется вопросам обеспечения электромагнитной совместимости электронных устройств и модулей с их отдельными узлами и компонентами. В данной главе мы рассмотрим эти вопросы применительно к полупроводниковым интегральным схемам (ИС), поскольку они часто являются источниками (излучателями) или приёмниками электромагнитных помех в электронных устройствах. Рост требований к дальнейшему улучшению характеристик электромагнитной совместимости обусловлен тем, что область применения электронных устройств постоянно расширяется. Системные решения на основе микроэлектроники и полупроводниковой электроники применяются во всех сферах промышленности, домашнего хозяйства и на транспорте. В настоящее время оценка продукции с точки зрения EMC необходима в ещё большей степени, чем на ранних этапах развития электроники.

Основные понятия электромагнитной совместимости рассматривают воздействие как излучаемых, так и кондуктивных помех (наводки), распространяющихся по проводникам (например, наводки по цепям питания), а также чувствительность электрооборудования к воздействию помех (помехоустойчивость). При этом характеристики электромагнитной совместимости могут определяться в полосе частот 0...400 ГГц. Взаимосвязь основных понятий электромагнитной совместимости приведена на **Рис. 13.1**.

13.1.1. Природа электромагнитных помех

Электромагнитные помехи возникают вследствие природных явлений или как ре-



Рис. 13.1. Различные аспекты электромагнитной совместимости.

зультат технических процессов. Примерами естественных помех могут служить атмосферные разряды (электромагнитные импульсы, возникающие при ударе молнии) или электростатические разряды (Electro-Static Discharge — ESD). Последние имеют особенно большое значение в полупроводниковой электронике. В промышленном оборудовании основным источником помех являются процессы переключения в электрических цепях, связанные с очень быстрым изменением токов и напряжений, что, в свою очередь, ведёт к появлению электромагнитных помех, которые могут быть периодическими или случайными. Воздействие этих помех может носить как кондуктивный (в виде наводки на токи или напряжения в проводниках), так и излучательный (под влиянием переменного электромагнитного поля) характер.

Тип кондуктивной помехи, когда наведённый в проводниках ток имеет знак, т.е. с одинаковой амплитудой протекает как в прямом, так и в обратном направлении, называется симметричной, или дифференциальной, помехой. Если ток помехи замыкается на землю или протекает по проводнику в одном направлении, то такая помеха называется асимметричной, или синфазной.

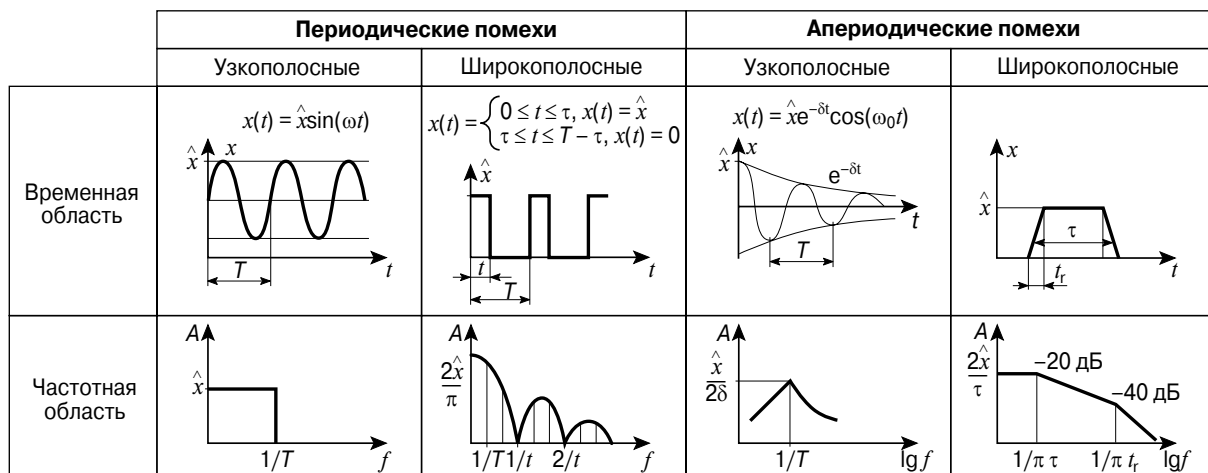


Рис. 13.2. Представления различных сигналов помех в частотной и временной области.

Электромагнитная связь между источником и приёмником помех может возникать в результате:

- гальванической связи (наиболее распространённый случай), которая создаёт симметричные помехи;
- ёмкостной связи, возникающей в результате воздействия переменного электрического поля на паразитные конструктивные ёмкости;
- индуктивной связи, вызванной нахождением проводника, по которому течёт ток, в переменном магнитном поле;
- электромагнитной связи, которая может иметь кондуктивный характер (возникает как наводка на проводники в кабельных жгутах или на проводящие дорожки печатной платы) либо распространяется путём излучения (если ширина зазора между источником и приёмником помехи превышает 0,1 длины волны излучения λ).

Формы представления сигналов помехи

Помехи, имеющие периодический или апериодический характер в определённом временном интервале, могут быть математически представлены в виде наложения синусоидальных и косинусоидальных сигналов различной частоты и амплитуды. На Рис. 13.2 показаны типичные виды сигналов помехи и их спектральные представления.

Полупроводниковые ключи, логические интегральные схемы, микроконтроллеры являются источником широкополосных помех, вызванных внутренними процессами в этих устройствах и работой тактовых генераторов. Сигналы указанных помех имеют периодический характер и могут быть «разло-

жены» в частотный спектр с помощью преобразования Фурье. Ниже в данном разделе приведены аппроксимирующие выражения, которые можно использовать при расчёте амплитуд и частот излома для трапецидальных сигналов. Пример такого сигнала показан на Рис. 13.3, а соответствующая ему аппроксимирующая огибающая спектра представлена на Рис. 13.4. От основной частоты сигнала до первой из частот излома f_{g1} график спектральной зависимости амплитуды сигнала от частоты идёт параллельно оси частот. На участке между первой и второй (f_{g2}) частотами излома амплитуда уменьшается с крутизной 20 дБ/дек, а на последнем участке — с крутизной 40 дБ/дек.

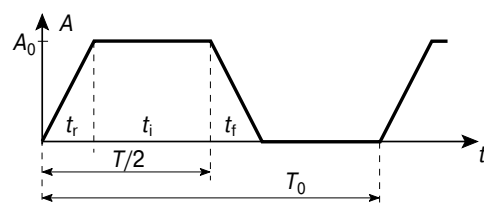


Рис. 13.3. Представление процесса переключения сигналов в виде трапецидальной функции.

В приведённых ниже формулах используются следующие обозначения:

- A_0 — амплитуда исходного сигнала;
- A_n — амплитуда n -й гармоники;
- T_0 — период основной частоты сигнала;
- t_i — длительность импульса;
- t_s — время переключения ($t_r = t_f$);
- n — номер гармоники основной частоты;
- n_{g1} — номер гармоники частоты 1-го излома;
- n_{g2} — номер гармоники частоты 2-го излома;
- f_0 — основная частота;

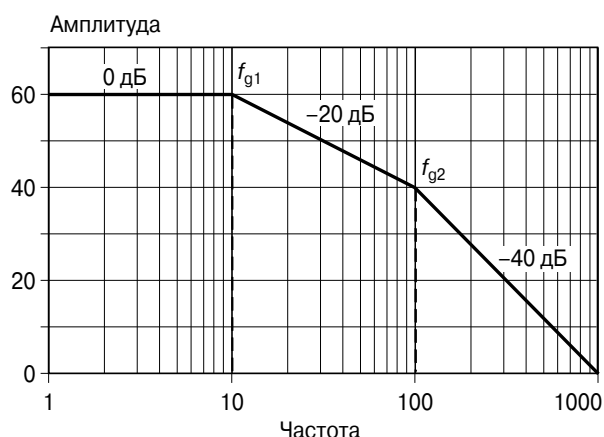


Рис. 13.4. Форма огибающей спектральной характеристики.

f_{g1} — частота 1-го излома;

f_{g2} — частота 2-го излома.

На первом участке спектра в диапазоне частот $f_0 \dots f_{g1}$ амплитуда сигнала не зависит от частоты:

$$A_n \approx \frac{2 \cdot A_0 \cdot t_i}{T_0}. \quad (1)$$

На втором участке в диапазоне частот $f_{g1} \dots f_{g2}$ амплитуда сигнала падает с крутизной 20 дБ на декаду:

$$f_{g1} = \frac{1}{\pi \cdot t_i}, \quad (2)$$

$$A_n \approx A_0 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{n}. \quad (3)$$

На третьем участке (частота выше f_{g2}) амплитуда сигнала падает с крутизной 40 дБ на декаду:

$$f_{g2} = \frac{1}{\pi \cdot t_s}, \quad (4)$$

$$A_n \approx A_0 \cdot \frac{2}{\pi^2} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \frac{T_0}{t_s}. \quad (5)$$

Измерение электромагнитного излучения

Измерения электромагнитного излучения проводятся в частотной области с помощью тестового приёмника или анализатора спектра. Данные приборы позволяют производить оценку различных характеристик

помех путём измерения их пикового, квазипикового, среднего или эффективного значения. При этом измерения проводятся относительно определённого уровня, что позволяет осуществлять удобную индикацию при измерении физических величин от мкВ до В. Показания прибора соответствуют логарифмическому отношению амплитуды сигнала к опорному значению (это опорное значение в технике связи принято называть эффективной мощностью или мощностью помех). Уровень мощности определяется как умноженный на десять десятичный логарифм отношения мощности измеряемого сигнала к эффективной мощности и выражается в децибелах:

$$p = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_x}{P_0}, \text{ дБ.}$$

В технике связи принято считать, что величина опорной (эффективной) мощности P_0 составляет 1 мВт. Чтобы подчеркнуть это, к единице измерения уровня мощности добавляется буква «м» (дБм, т.е. децибелы, отсчитываемые относительно уровня 1 мВт). Уровень напряжения или напряжённости поля, полученный в ходе измерения электромагнитного излучения, имеет размерность дБмкВ или дБмкВ/м соответственно, а формула для него может быть выведена из выражения для уровня мощности. Величине 0 дБмкВ соответствует опорное значение 1 мкВ. Следовательно, для систем с волновым сопротивлением 50 Ом измеренное значение уровня мощности 0 дБм соответствует уровню напряжения 107 дБмкВ.

Формула для уровня напряжения:

$$p = 20 \cdot \log \frac{U_x}{U_0}, \text{ дБмкВ.}$$

Чувствительность тест-приёмников электромагнитных помех зависит от рабочей частоты, которая устанавливается в соответствии с требованиями стандарта CISPR16. Выбор частоты осуществляется с помощью различных полосовых фильтров, в зависимости от требуемого диапазона рабочих частот, как это указано в Табл. 13.1.

Таблица 13.1. Выбор полосы пропускания измерительных полосовых фильтров в соответствии с рабочим диапазоном частот

Ширина полосы (B_W)	200 Гц	9 кГц	120 кГц
Диапазон частот	0.01...0.15 МГц	0.15...30 МГц	30...1000 МГц

Если приёмный канал приёмника «захватывает» лишь одну гармонику сигнала помехи, то измеренное значение не зависит от ширины полосы пропускания (B_W) и характеристик индикатора. Такая помеха называется узкополосной. Напротив, широкополосная помеха имеет место в тех случаях, когда основная частота сигнала низкая, поэтому в полосе частот тестового приёмника оказываются сразу несколько гармоник сигнала, и измеряемое значение будет зависеть от ширины полосы пропускания приёмника (B_W) и качества гармонического анализа сигнала. В этой ситуации «интегральная» процедура измерения сигнала уже неприменима, поскольку не отражает его реальную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Такая помеха наблюдается, когда при измерении широкополосных сигналов в районе границ между рабочими диапазонами частот тестового приёмника (0.15 МГц и 30 МГц) происходят скачкообразные изменения их амплитуды.

13.1.2. Нормы и стандарты электромагнитной совместимости

Существует большое количество норм и требований, относящихся к обеспечению электромагнитной совместимости оборудования. Они подразделяются на нормы, регламентирующие характеристики измерительного оборудования, параметры тестовых систем и методику измерений помех различной природы. Определяя методику испытаний электрических устройств на электромагнитную совместимость, эти нормы устанавливают критерии, на основании

которых может быть сделан вывод, что испытываемые устройства удовлетворяют требованиям EMC.

Работа по стандартизации требований по электромагнитной совместимости ведётся на международном, европейском и национальных уровнях. На мировом уровне основную нагрузку несут на себе ISO (Международная организация по стандартизации) и IEC (Международная электротехническая комиссия, МЭК), подразделением которой является CISPR (International Special Committee on Radio Interference — Международный специальный комитет по борьбе с радиопомехами). На европейском уровне данную работу осуществляют CEN (Европейский комитет по стандартизации) и CENELEC (Европейский комитет по электротехническим стандартам), а также ETSI (Европейский институт по стандартизации в области телекоммуникаций).

Полупроводниковые интегральные микросхемы являются относительно новым объектом EMC-стандартизации, что требует введения особых нормативов, относящихся исключительно к этим приборам. Требования электромагнитной совместимости для них примерно те же, что и для других устройств и компонентов, однако как индивидуальные компоненты ИС редко используются исключительно в одной области применения. В настоящее время МЭК разработаны две группы нормативов, стандартизирующих методики измерения излучаемых помех (стандарт IEC 61967) и помехоустойчивости ИС (стандарт IEC 62132). В Табл. 13.2 представлен обзор данных стандартов. Указанные методики имеют существ-

Таблица 13.2. Стандарты по методам измерения электромагнитной совместимости для ИС

МЭК 61967	Интегральные схемы — Измерение электромагнитного излучения
МЭК 61967-1	Основные условия и определения
МЭК 61967-2	Метод измерения электромагнитного излучения с помощью ТЕМ-камеры
МЭК 61967-3	Метод поверхностного сканирования
МЭК 61967-4	Метод прямого соединения 1 Ом/150 Ом
МЭК 61967-5	Стендовый метод с применением клетки Фарадея
МЭК 61967-6	Метод магнитного зонда
МЭК 62132	Интегральные схемы — Измерение электромагнитной помехоустойчивости
МЭК 62132-1	Основные условия и определения
МЭК 62132-2	Метод измерения с помощью ТЕМ-камеры
МЭК 62132-3	Метод инъекции объёмного тока
МЭК 62132-4	Метод прямого введения мощности
МЭК 62132-5	Стендовый метод с применением клетки Фарадея

венное значение на ранних этапах проектирования устройств (иногда даже на этапе выбора их компонентов). Благодаря использованию этих методов, можно оценивать характеристики излучаемых помех и помехоустойчивости ИС с точки зрения наилучшей электромагнитной совместимости устройств и их соответствия специфическим требованиям пользователей.

13.1.3. Методы измерения электромагнитной совместимости для интегральных схем

Методы измерения излучаемых помех

Стандарт IEC 61967 претендует на роль общепотребительного стандарта, определяющего характеристики помех, излучаемых интегральными схемами любого типа в диапазоне 150 кГц...1 ГГц. Он включает в себя 5 методов измерения (Табл. 13.3).

Метод ТЕМ-камеры (измерение излучаемых помех по стандарту IEC 61967-2) используется для измерения электромагнитного излучения в окружающую среду, создаваемого внутренней структурой и выводной рамкой ИС. Камера поперечной электромагнитной волны (ТЕМ-камера) представляет собой клинообразный коаксиальный волновод, состоящий из плоского внутреннего проводника (перегородки) и внешнего коаксиального проводника (экрана), и в данном случае используется в качестве экранированной приёмной антенны. Указанный метод измерений электромагнитного излучения требует разработки специальной тестовой платы для испытуемой ИС (Рис. 13.5). Испытуемая ИС, электромагнитное излучение которой требуется измерить, помещается с нижней стороны тестовой платы. За исключением контактных площадок для подсоединения ИС, эта сто-

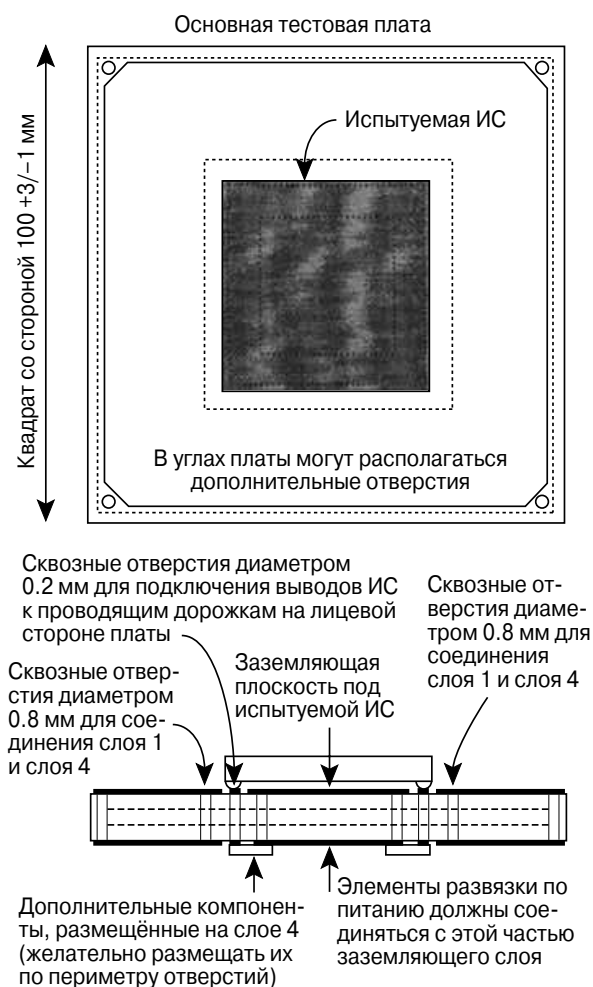


Рис. 13.5. Тестовая плата, используемая совместно с ТЕМ-камерой.

рона полностью металлизирована и служит в качестве «земли» (GND — отрицательное опорное напряжение, которое обычно равно 0 В). На лицевой стороне платы размещаются периферийные компоненты, необходимые для работы испытуемой ИС, а также проводники сигналов и земли. Для разводки цепей питания используются допол-

Таблица 13.3. Методы измерения помех, излучаемых ИС

	Метод ТЕМ-камеры	Сканирование поверхности	Прямое соединение 1 Ом/150 Ом	Метод клетки Фарадея	Метод магнитного зонда
Диапазон частот	0.15...1000 МГц	1...1000 МГц	0.15...1000 МГц	0.15...1000 МГц	0.15... 1000 МГц
Измеряемые физические величины	Напряжённость электромагнитного поля	Напряжённость электромагнитного поля	Ток ВЧ Напряжение ВЧ	Напряжённость электрического и магнитного полей Напряжение ВЧ	Напряжённость магнитного поля Ток ВЧ

нительные слои печатной платы. На **Рис. 13.6** показан вариант подключения испытательного оборудования. Тестовая плата располагается поверх раструба ТЕМ-камеры таким образом, чтобы испытуемая ИС находилась внутри ТЕМ-камеры.

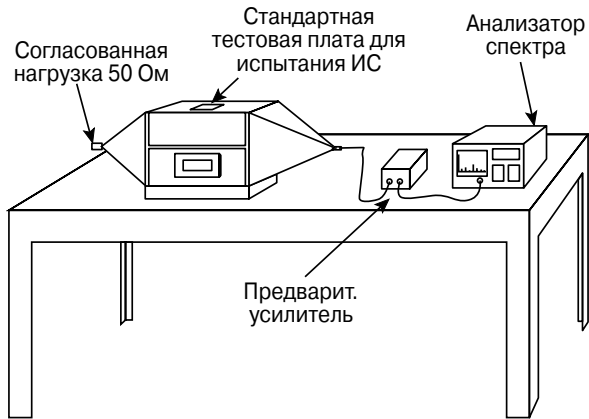


Рис. 13.6. Подключение испытательного оборудования при тестировании ИС с помощью ТЕМ-камеры.

Земляной слой на нижней стороне тестовой платы с помощью пружинных контактов подключается к внешнему экрану ТЕМ-камеры, что обеспечивает надёжное экранирование от ВЧ излучений. Спектр электромагнитных помех, излучаемых микроконтроллером с системной частотой 40 МГц и принимаемых внутренним проводником (перегородкой) ТЕМ-камеры, приведён на **Рис. 13.7**. Уровень помех, излучаемых внутренними «антеннами» ИС, зависит от их ориентации в пространстве ТЕМ-камеры, поэтому измерения проводятся в двух положениях тестовой платы (0° и 90°).

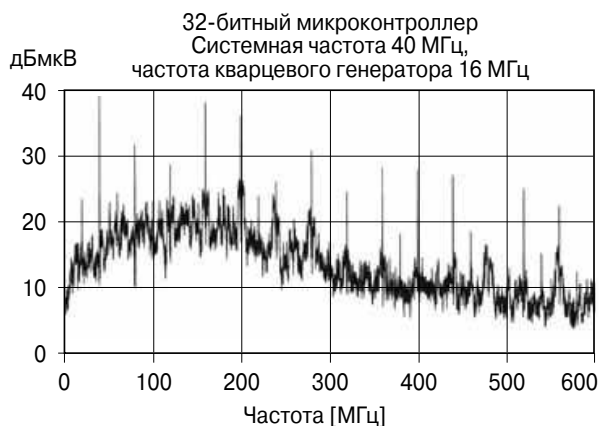


Рис. 13.7. Спектр электромагнитного излучения микроконтроллера в положении 1 (0°).

ТЕМ-камера особенно хорошо подходит для определения характеристик электромагнитного излучения у интегральных схем, работающих на высоких частотах и/или отличающихся большими размерами структурных и конструктивных элементов (что способствует повышенному электромагнитному излучению). Результаты измерений относятся к ИС в целом, т.е. нельзя измерить излучение её отдельных компонентов.

Метод поверхностного сканирования (согласно стандарту IEC 61967-3) предназначен для измерения напряжённости электрических и магнитных полей, излучаемых ИС, путём сканирования её поверхности с помощью электрических и магнитных зондов, работающих в ближнем поле. Такой зонд представляет собой определённым образом ориентированную штыревую или рамочную антенну, которая движется в плоскости, параллельной поверхности испытуемой ИС, и на определённом расстоянии от неё. Управление шаговым приводом антенны осуществляется программно. В процессе сканирования записываются значения напряжённости поля на заданной частоте. Разрешающая способность измерительной системы зависит от размеров зонда и величины шага привода. Во время измерений испытуемая ИС размещается на тестовой плате, которая закрепляется на плоскости опорной земли (но не имеет электрического контакта с ней).

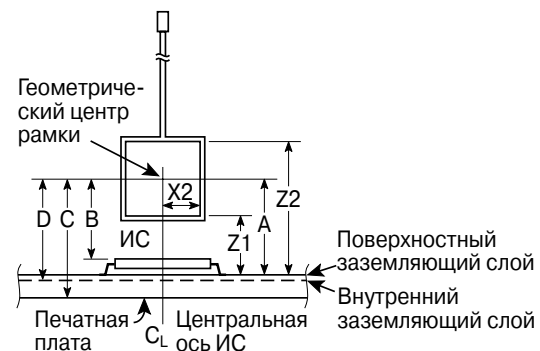


Рис. 13.8. Принцип реализации метода поверхностного сканирования.

На **Рис. 13.8** схематично изображена структура измерительной системы, а **Рис. 13.9** иллюстрирует полученную в результате измерений картину распределения электромагнитного поля вдоль поверхности ИС. Данный метод хорош в тех случаях, когда необходимо уточнить (локализовать) положение источника электромагнитной

помехи заранее известной частоты на поверхности ИС. Однако для измерений в широком диапазоне частот потребуется слишком много времени.

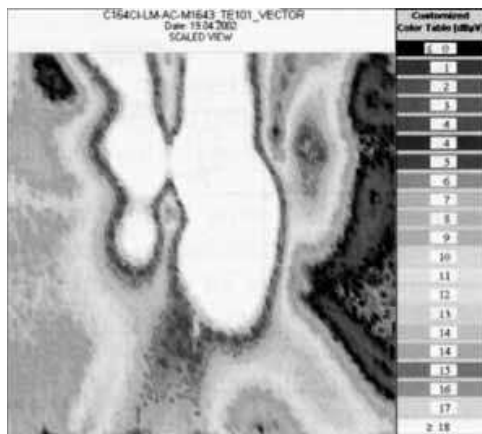


Рис. 13.9. Распределение электромагнитного поля вдоль поверхности ИС.

Метод прямого соединения 1 Ом/150 Ом (согласно стандарту IEC 61967-4) является комбинацией двух методов, предназначенных для определения уровня генерируемых ИС кондуктивных электромагнитных помех, которые могут проявляться в виде тока высокой частоты (для его измерения используется шунт сопротивлением 1 Ом) или высокочастотного напряжения (используется согласующая цепь с импедансом 150 Ом). Когда речь идёт об излучении помех, следует учитывать, что внутри ИС наведённые токи помех возбуждаются только в замкнутых контурах. Путь протекания наведённого тока для различных типов ИС зависит от величины опорного потенциала и может проходить либо по общей земляной шине, либо по цепи питания ИС. Это позволяет измерять суммарный ток кондуктивной помехи путём измерения суммарного тока, протекающего в цепи питания или земли, с помощью токового пробника сопротивлением 1 Ом. Кроме того, таким способом можно отдельно определять токи помех, протекающие через те или иные выводы ИС, представляющие особый интерес для разработчика. Схема одноомного токового пробника, используемого для измерения токов высокой частоты, приведена на Рис. 13.10. Напряжение, падающее на прецизионном резисторе сопротивлением 1 Ом, поступает на тестовый приёмник сигналов, который анализирует данное напря-

жение и выдаёт результат, характеризующий уровень помех, генерируемых ИС. Резистор сопротивлением 49 Ом служит для согласования с входным импедансом измерительного устройства. Разделительный конденсатор на выходе токового пробника защищает вход тестового приёмника от повышенных напряжений постоянного тока.

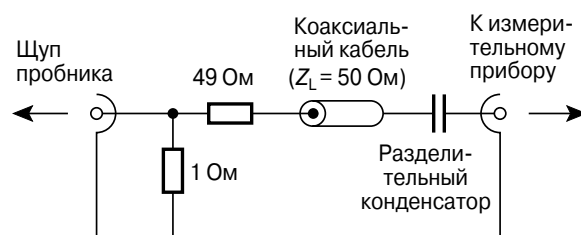


Рис. 13.10. Схема одноомного пробника тока.

Схема с использованием 150-омной цепи согласования импедансов, приведённая на Рис. 13.11, предназначена для измерения напряжения высокочастотной помехи на выводах ИС, к которым подключены соединительные провода, либо на проводниках печатной платы или кабельных жгутах длиной более 10 см. В процессе измерений указанные выводы ИС подключаются к типичной антенной нагрузке с импедансом 150 Ом (в соответствии со стандартом IEC 61000-4-6). На Рис. 13.12 приведена комбинированная схема, сочетающая токовый пробник 1 Ом и 150-омную цепь.

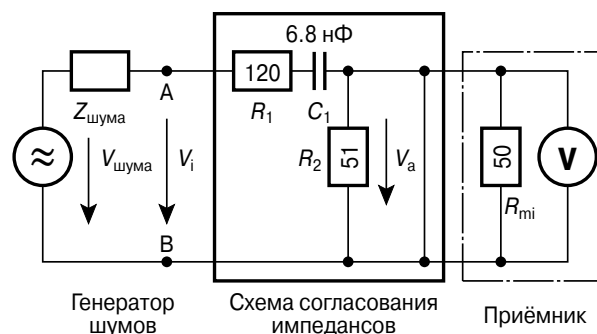


Рис. 13.11. Схема 150-омного пробника напряжения.

Спектры узкополосной и широкополосной помехи, генерируемой силовой ИС и измеренной с помощью 150-омного пробника напряжения, приведены на Рис. 13.13. Поскольку метод прямого соединения обеспечивает практически постоянную передаточную характеристику, он может быть использован для измерения

меха представляет собой высокочастотный синфазный ток, протекающий на землю (GND), а также вызванные быстрыми изменениями напряжения (dv/dt) токи, которые через паразитные ёмкости замыкаются на экранирующие стенки клетки Фарадея. Контуры, в которых наводятся токи помехи, через 150-омную согласующую цепь замыкаются на синфазную (общую) точку источника помехи. Принцип измерения поясняет изображённая на **Рис. 13.15** модель с сосредоточенными параметрами.

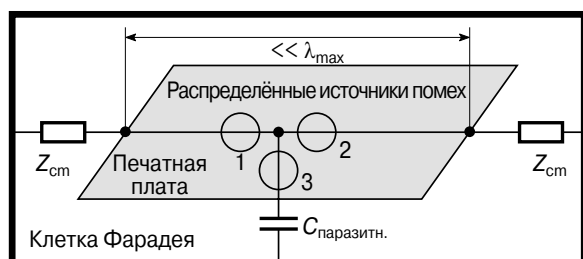


Рис. 13.15. Пояснение принципа измерения синфазной помехи.

Метод магнитного зонда (согласно стандарту IEC 61967-6) представляет собой метод измерения высокочастотного тока кондуктивной помехи. С помощью магнитного датчика (зонда) измеряется напряжённость магнитного поля на определённом расстоянии от соединительного проводника, подключённого к соответствующему выходу испытуемой ИС (в том случае, когда этот проводник выполнен в виде полосковой линии). Данный метод позволяет оценить уровень высокочастотных токов, которые создают электромагнитные помехи, излучаемые через проводящие дорожки печатной платы, земляной слой и шины питания.

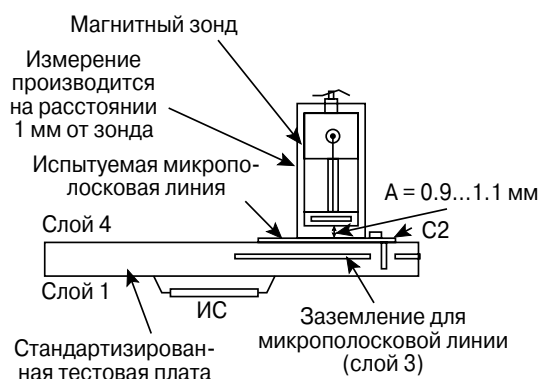


Рис. 13.16. Метод магнитного зонда.

Метод магнитного зонда предпочтительнее использовать для измерения уровня электромагнитных излучений, генерируемых ИС, рабочая частота которых достаточно высока (находится в верхней части мегагерцового диапазона). Преимуществом магнитного зонда по сравнению с ТЕМ-камерой является возможность выборочного измерения уровня помех на отдельных выводах испытуемой ИС. Получаемые при этом результаты сравнимы с результатами, которые даёт метод одноомного токового пробника.

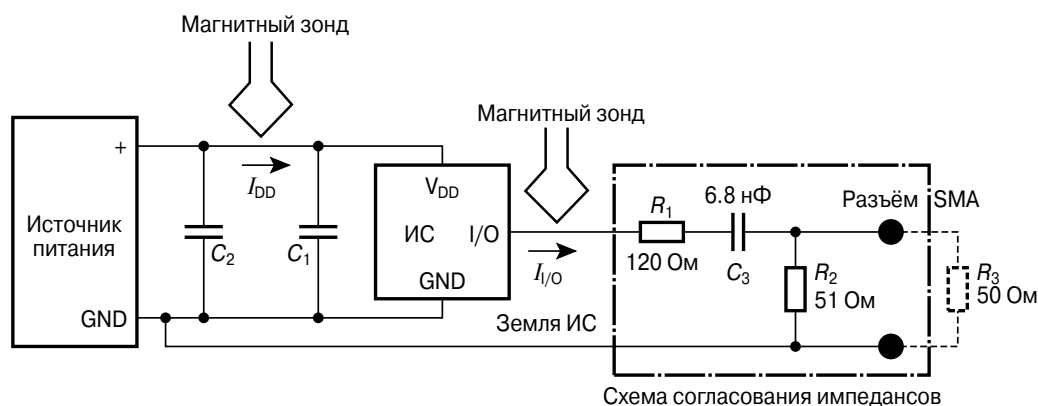


Рис. 13.17. Схема испытаний при измерениях методом магнитного зонда.

Методы измерения помехоустойчивости ИС

Стандарт IEC 62132 является основным стандартом, определяющим характеристики помехоустойчивости интегральных схем любого типа в диапазоне 150 кГц...1 ГГц. В Табл. 13.4 перечислены различные методы измерения помехоустойчивости и указаны физические величины, связанные с использованием этих методов.

Метод ТЕМ-камеры (согласно стандарту IEC 62132-2) предназначен для определения помехоустойчивости ИС и применяется в тех случаях, когда приёмниками помех являются исключительно элементы внутренней структуры и выводной рамки ИС. Данный метод работает по тому же принципу, что и одноимённый метод измерения электромагнитного излучения. Отличие состоит в том, что в ТЕМ-камере размещается не тестовый приёмник излучения, а высокочастотный генератор с соответствующим усилителем сигнала, что позволяет воздействовать на испытуемую ИС высокочастотным излучением заданной мощности. При этом используется та же самая тестовая плата. В процессе измерений определяется максимально допустимый уровень напряжённости электромагнитного поля, воздействие которого не приводит к сбою функционирования ИС.

Метод инъекции объёмного тока (согласно стандарту IEC 62132-3) применяется для определения устойчивости ИС к высокочастотным токам помех (наводкам), возникающим в проводниках, которые подключены к соответствующим выводам ИС и служат для соединения ИС с периферийными устройствами. Данный метод разработан в соответствии со стандартом испытаний компонентов на устойчивость к воздействию кондуктивных помех (ISO 11452-4). Он основан на том, что соединительные проводники, подключённые к отдельным электронным компонентам ИС, представ-

ляют собой антенны, которые улавливают из окружающей среды высокочастотные сигналы электромагнитных помех и в форме токов высокой частоты передают их по указанным соединительным проводникам на входы ИС, которая работает как приёмник данных помех. ВЧ ток «инжектируется» в подключённые к выводам испытуемой ИС проводники с помощью бесконтактного (надевающегося сверху на проводник) токового пробника. Второй токовый пробник используется для измерения ВЧ тока в проводнике. Блок-схема установки, реализующей данный метод измерений, приведена на Рис. 13.18.

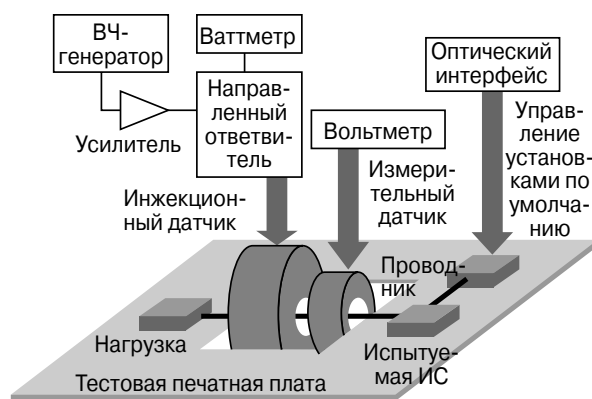


Рис. 13.18. Схема установки для измерения помехоустойчивости методом инъекции объёмного тока.

Для проведения измерений методом инъекции объёмного тока нужна специальная тестовая плата, которая имеет посередине вырез для размещения «передающего» и измерительного токовых пробников. Испытуемая ИС вместе с остальными компонентами схемы, в которой она используется, размещается с одной стороны тестовой платы. Периферийные устройства, источники сигналов и т.п. размещаются с обратной стороны платы; для развязки от помех используются ВЧ фильтры. Испытуемая ИС под-

Таблица 13.4. Методы измерения помехоустойчивости ИС

	Метод ТЕМ-камеры	Метод инъекции объёмного тока	Метод прямого введения ВЧ мощности	Стендовый метод с использованием клетки Фарадея
Диапазон частот	0.15...1000 МГц	1...4000 МГц	0.15...1000 МГц	0.15...1000 МГц
Измеряемые физические величины	Напряжённость электромагнитного поля	Ток ВЧ	Ток ВЧ Напряжение ВЧ	Напряжённости электрического и магнитного полей Напряжение ВЧ

ключается к периферийным устройствам соединительными проводами. На провод, подключённый к выводу ИС, который требуется протестировать, надеваются зажимы токовых пробников. На той стороне тестовой платы, где размещена испытываемая ИС, контур протекания высокочастотного тока замыкается непосредственно через ИС, а на «периферийной» стороне тестовой платы — через проходной конденсатор или за счёт прямой гальванической связи с шиной опорной земли. Данный метод позволяет выборочно инжектировать электромагнитную ВЧ энергию в те или иные выводы ИС и даже в несколько выводов одновременно. Помехоустойчивость ИС можно охарактеризовать путём сравнения уровней инжектированной в ИС высокочастотной мощности и измеренного ВЧ тока.

Метод прямого введения мощности (согласно стандарту IEC 62132-4) представляет собой метод определения устойчивости ИС к кондуктивным помехам, когда электромагнитная мощность высокой частоты инжектируется в конкретный вывод ИС. В основе данного метода измерений лежит предположение, что энергия внешнего электромагнитного поля улавливается,

главным образом, подключёнными к тестируемому выводу ИС соединительными проводами или «квазиантеннами», образованными проводниками печатной платы, и затем передаётся в указанный вывод ИС. Тестовым критерием при определении степени помехоустойчивости ИС является уровень прямой ВЧ мощности, поступающей в вывод ИС через разделительный конденсатор. На **Рис. 13.19** приведена схема соответствующей измерительной установки. Реализация данного метода требует наличия специальной тестовой платы, имеющей, как минимум, два слоя. Выбор точек подключения к тестовой плате для ввода ВЧ мощности должен осуществляться на основании тех же критериев, что и при реализации метода измерения электромагнитного излучения путём прямого соединения и использования 150-омной согласующей цепи. Развязка периферийных нагрузок или источников сигналов от высокочастотных помех осуществляется за счёт высокого импеданса соответствующих цепей ($Z \geq 400 \text{ Ом}$). На **Рис. 13.20** показаны способы подключения измерительного сигнала в симметричном (дифференциальном) и асимметричном (синфазном) режимах.



Рис. 13.19. Схема испытаний для измерения помехоустойчивости методом прямого введения мощности.

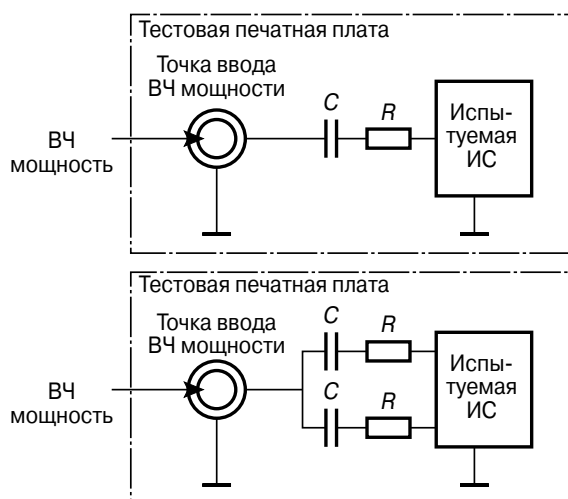
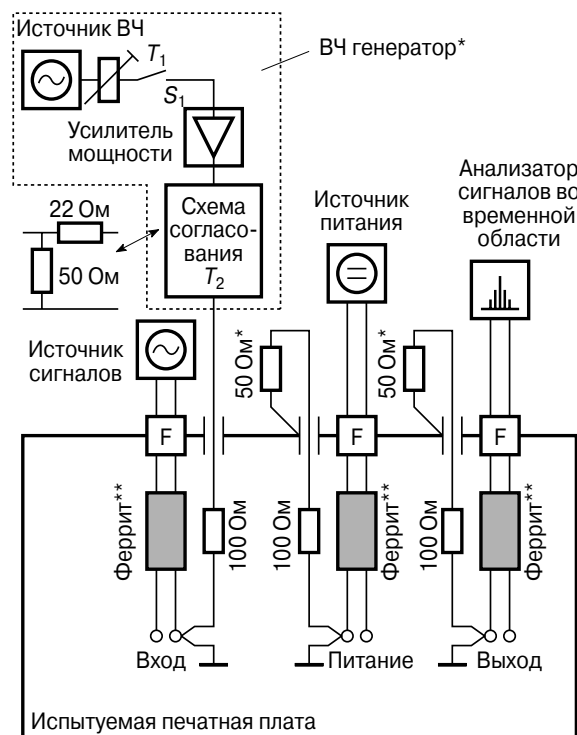


Рис. 13.20. Точки прямого введения мощности в синфазном (верхняя схема) и дифференциальном (нижняя схема) режимах.

Данный метод используется как для селективных измерений (конкретно для выбранного вывода испытуемой ИС), так и для одновременной подачи ВЧ мощности на несколько выводов. В зависимости от назначения тестируемого вывода (внутренний, защищённый, внешний), входная мощность может варьироваться от 50 мВт до 5 Вт.

Стендовый метод с применением клетки Фарадея (согласно стандарту IEC 62132-5) предназначен для измерения помехоустойчивости ИС; при этом входная ВЧ мощность прикладывается к тем же синфазным точкам тестовой или рабочей платы, к которым в рассмотренной выше одноимённой схеме измерения электромагнитного излучения прикладывалось входное ВЧ напряжение. Цепь подачи ВЧ мощности состоит из резистора сопротивлением 100 Ом, подключённого через отверстие в стенке клетки Фарадея к выходу усилителя (внутреннее сопротивление усилителя $R_i = 50$ Ом), на вход которого поступает сигнал с ВЧ генератора. Цепь протекания тока помехи образована вторым резистором сопротивлением 100 Ом, который через 50-омный эквивалент нагрузки подключается к корпусу клетки Фарадея, стенки которой используются в качестве опорной земли. Проводники, соединяющие тестовую плату с внешними источниками питания, входами и выходами, вводятся внутрь клетки Фарадея через проходные фильтры и синфазные дроссели, импеданс которых на частоте

150 кГц должен составлять 280 мкГн ($Z = 263$ Ом). Блок-схема установки, реализующей данный метод измерений помехоустойчивости, приведена на **Рис. 13.21**.



* Подлежащие проверке линии (сигнальные или питания), к которым в данный момент не подключён ВЧ генератор, заземляются через согласующий резистор 50 Ом

** Импеданс ферритового дросселя > 150 Ом

Рис. 13.21. Схема испытаний для измерения помехоустойчивости стендовым методом с применением клетки Фарадея.

13.1.4. Модели, используемые при оценке устойчивости ИС к электростатическим разрядам (ESD)

Помимо частотно-зависимых характеристик электромагнитной совместимости, в основном связанных с процессом функционирования электронных устройств, на работоспособность отдельных их компонентов могут негативно влиять электростатические явления. Ток, возникающий при электростатическом разряде (ElectroStatic Discharge — ESD), может вывести компонент из строя. Проверка устойчивости компонентов со встроенными схемами защиты к воздействию электростатического разряда осуществляется с использованием моделей, соответствующих международным стандартам. К наиболее известным из них

относятся модель человеческого тела (Human Body Model — HBM), механическая модель (Machine Model — MM) и модель заряженного устройства (Charged Device Model — CDM) или, как вариант, модель съёмного устройства (Socketed Device Model — SDM). Если модели HBM и MM предназначены для симуляции процесса электростатического разряда заряженного объекта (человека или механического устройства) при его соприкосновении с электронным компонентом, то в моделях CDM/SDM рассматривается процесс быстрого разряда электростатически заряженного электронного компонента.

Модель человеческого тела (HBM) и механическая модель (MM)

Модель человеческого тела является наиболее хорошо известной и широко распространённой моделью для оценки устойчивости электронных компонентов к воздействию электростатического разряда. В ней рассматривается случай, когда носитель электростатического заряда (человек) разряжается через заземлённый компонент (Рис. 13.22). Здесь предполагается, что человеческое тело обладает электрической ёмкостью 100 пФ. Резистор $R = 1500 \text{ Ом}$ представляет собой контактное сопротивление между человеческим телом и поверхностью подвергнувшегося воздействию ESD электронного компонента.

В принципе, следовало бы производить испытания на устойчивость к воздействию электростатического разряда для каждого из выводов испытуемого электронного компонента по отношению ко всем другим его выводам (комплексное тестирование выводов). Если устройство имеет много выводов, то проведение таких испытаний оказывается чересчур дорогостоящим. Поэтому существующие стандарты предусматривают также варианты испытаний для так называемых комбинаций выводов. Эти варианты включают в себя проверку ESD-устойчивости различных выводов (как правило, это порты ввода/вывода и выводы питания) по отношению к питающим напряжениям. Кроме того, часто проводят так называемый тест ввода/вывода, когда испытательное напряжение прикладывается между каждым из портов ввода/вывода ИС и всеми остальными (соединёнными накоротко) выводами порта.

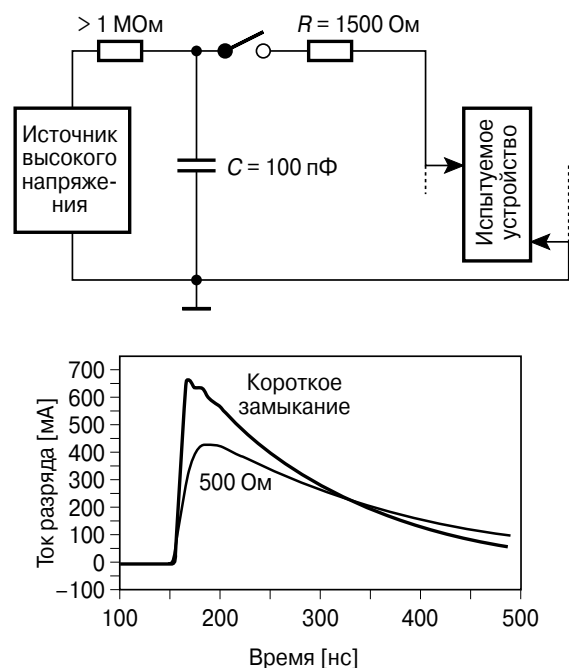


Рис. 13.22. Эквивалентная схема (вверху) и график зависимости разрядного тока от времени (внизу) для HBM-тестера при напряжении заряда 1 кВ.

Первый стандарт, описывавший метод испытаний с применением модели HBM (MIL-STD883D, метод 3015), в настоящее время вышел из употребления, хотя и часто цитируется. Компания Infineon в своих разработках следует требованиям стандарта JEDEC «Испытание на чувствительность к электростатическому разряду, модель человеческого тела» (JESD22-A114-B), который определяет как стандартные комбинации выводов, так и количество импульсов напряжения и форму этих импульсов для HBM-тестера (см. Рис. 13.22).

В отличие от HBM-модели, учитывающей электростатический разряд, возникающий при контакте обладающего электростатическим зарядом человека с испытуемым электронным компонентом, в так называемой механической модели объектом, воздействующим на компонент, является другое заряженное устройство или машина. Эквивалентная схема для данной модели отличается от уже рассмотренной выше (см. Рис. 13.22) лишь величинами собственной ёмкости объекта ($C = 200 \text{ пФ}$) и разрядного сопротивления ($R = 0 \text{ Ом}$). Вследствие малости разрядного сопротивления, форма разрядного импульса (Рис. 13.23) определяется лишь величинами паразитных элемен-

тов схемы. Следовательно, повторяемость и взаимная совместимость результатов испытаний при использовании модели ММ оказывается значительно ниже, чем при использовании модели НВМ.

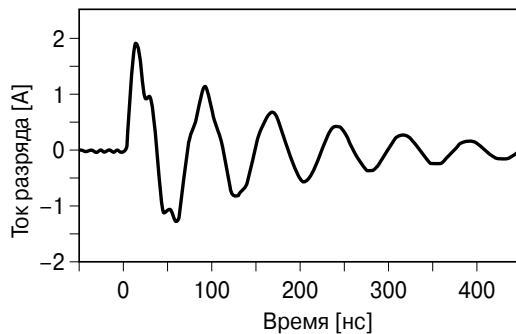


Рис. 13.23. Разрядный ток при испытаниях по модели ММ и напряжении 100 В.

Сама процедура испытаний (комбинации выводов, оценка результатов воздействия электрического напряжения) практически идентична процедуре испытаний для модели НВМ и осуществляется в рамках международных стандартов. Компания Infineon следует требованиям стандарта JEDEC «Испытания на чувствительность к электростатическому разряду, механическая модель» (JESD22-A115-A). Разрядные импульсы для каждой из рассматриваемых тест-моделей (НВМ и ММ) имеют близкие значения времени нарастания и несущественно различаются по длительности. Обе модели предполагают, что результатом воздействия электростатического разряда на испытуемое устройство будет возникновение одной и той же неисправности (тепловая перегрузка схемы защиты от ESD). Поскольку использование модели ММ не даёт никакой дополнительной тестовой информации, а повторяемость результатов испытаний для неё существенно ниже, чем для модели НВМ, компания Infineon при определении чувствительности электронных компонентов к воздействию электростатического разряда, как правило, использует модель НВМ.

Модель заряженного устройства (CDM) и модель съёмного устройства (SDM)

Модель заряженного устройства (CDM) подробно описывает другой тип электростатического разряда, который может стать причиной неисправностей устройства, от-

личающихся от описанных выше. В ней рассматривается случай, когда устройство (ИС) ещё в процессе его производства приобретает электростатический заряд, а затем разряжается на объект, обладающий высокой проводимостью (например, на землю). Этот чрезвычайно быстрый разряд не приводит к перегреву схемы защиты ИС от ESD (как это происходит при использовании моделей НВМ или ММ), зато он вызывает пробой изолирующего оксидного слоя. На **Рис. 13.24** показана типичная форма разрядного импульса при испытаниях по модели CDM. Его нарастающий фронт гораздо короче (время нарастания приблизительно 300 пс), а общая длительность импульса существенно ниже (приблизительно 0,5 нс), чем соответствующие параметры импульсов в моделях НВМ и ММ. Это означает, что, хотя амплитуда тока в импульсе достигает нескольких ампер даже при низких напряжениях разряда, при использовании модели CDM уровень мощности, рассеиваемой в устройстве, оказывается ниже, чем при использовании моделей НВМ и ММ.

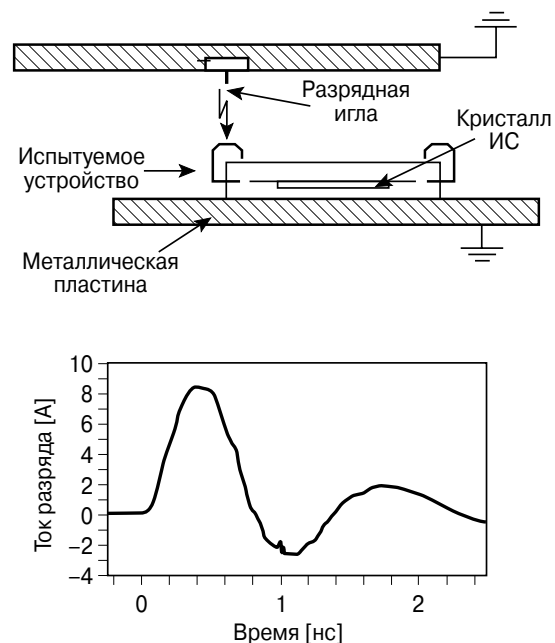


Рис. 13.24. Типичная схема установки для CDM-испытаний и форма разрядного тока (ИС в корпусе PLCC-44, напряжение заряда 500 В).

В процессе тестирования, когда ИС испытывается на устойчивость к воздействию электростатического разряда, она вынута из панельки и лежит на металлической плас-

тине выводами вверх. Сначала ИС заряжается посредством подачи заряда на земляной вывод через высокоомный резистор либо за счёт электростатической индукции от заряженной подложки. Затем выводы ИС поочередно разряжаются (при касании их заземлённой иглой). Как видно из **Рис. 13.24**, кристалл ИС и металлическая пластина, на которой лежит ИС, образуют конденсатор. Ёмкость этого конденсатора зависит от геометрии корпуса ИС. Значение данной ёмкости определяет величину электрического заряда, который может быть «запасён» кристаллом ИС, и, следовательно, амплитуду разрядного тока. Поскольку процесс разряда начинается с того, что между тестируемым выводом ИС и заземлённой иглой возникает искра (ещё до того, как они соприкасаются друг с другом), повторяемость теста CDM также невысока. Однако данное испытание очень хорошо моделирует реальные ситуации, возникающие при различных манипуляциях с ИС.

Стандарты для модели CDM проработаны ещё не столь подробно, как для HBM-модели. Существующие ныне рекомендации различаются не только методами заряда испытываемых устройств, но и в отношении других параметров, таких как величина пикового тока разряда или методы калибровки. Компания Infineon придерживается разработанных JEDEC нормативов согласно JESD22-C101-A.

Значительно лучшую воспроизводимость результатов испытаний обеспечивает модель съёмного устройства (SDM), когда испытываемая ИС вставлена в панельку, а разряд осуществляется через реле. Однако при этом электростатически заряжается не только сама ИС, но и панелька и вся установка для испытаний. Поскольку такая установка обладает большей ёмкостью, чем при испытаниях по модели CDM, при том же зарядном напряжении величина «запасённого» заряда оказывается больше, соответственно, увеличивается и разрядный ток. Таким образом, испытания по модели SDM являются более критичными к параметрам испытываемой ИС, чем при использовании модели CDM. Кроме того, вследствие большой величины зарядной ёмкости, она не зависит от типа корпуса ИС. Стандарты SDM-испытаний в настоящее время только разрабатываются (например, этим занимаются в МЭК), поэтому в качес-

тве таковых можно рекомендовать Технический отчёт, опубликованный Американской Ассоциацией по ESD (ESD TR 08-00: Socket Device Model (SDM) Tester). Учитывая рассмотренные выше преимущества модели SDM, для слаботочных CDM-устройств производства Infineon используется модель SDM, а их CDM-испытания осуществляются лишь в тех случаях, когда тест SDM показывает низкую устойчивость к воздействию электростатического разряда.

13.2. Электромагнитная совместимость автомобильных силовых ИС

Сфера применения автомобильных силовых ИС охватывает широкий диапазон функций и приложений устройств автомобильной электроники. Основной их функцией является распределение, преобразование или передача электрической мощности от единиц милливатт (мВт) до нескольких киловатт (кВт). Диапазон рабочих напряжений этих ИС адаптирован с учётом автомобильных бортовых напряжений 12 В, 24 В или 42 В. Автомобильные силовые ИС представляют собой целый большой класс приборов, куда входят как простые МОП/ДМОП-компоненты, так и нижние и верхние ключи и мостовые переключатели со встроенными защитными и диагностическими функциями, линейные и ключевые (импульсные) стабилизаторы напряжения, коммуникационные ИС и даже специализированные интегральные схемы высокой степени интеграции (ASIC/ПЛИС), предназначенные для выполнения таких прикладных задач, как реализация систем ABS или управление подушками безопасности. Совершенствование ИС направлено, в том числе, и на снижение излучаемых ими электромагнитных помех до минимально возможного уровня, а также на обеспечение наилучшей внутренней устойчивости ИС к воздействию внешних электромагнитных помех. При этом требования по электромагнитной совместимости, относящиеся к системе в целом, следует применять и к входящим в её состав ИС, чтобы те или иные меры по улучшению EMC-характеристик интегральных схем оказывали как можно меньшее влияние на внешние схемы. Для определения характеристик автомобильных силовых ИС с точки зрения их соответствия стандартам EMC ис-

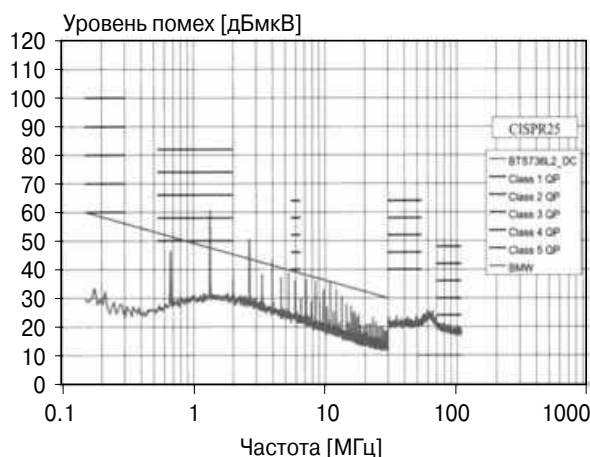


Рис. 13.26. Спектр электромагнитных помех, излучаемых генератором подкачки заряда.

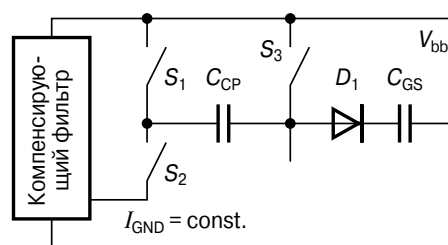


Рис. 13.27. Схема генератора подкачки заряда с внутренним фильтром.

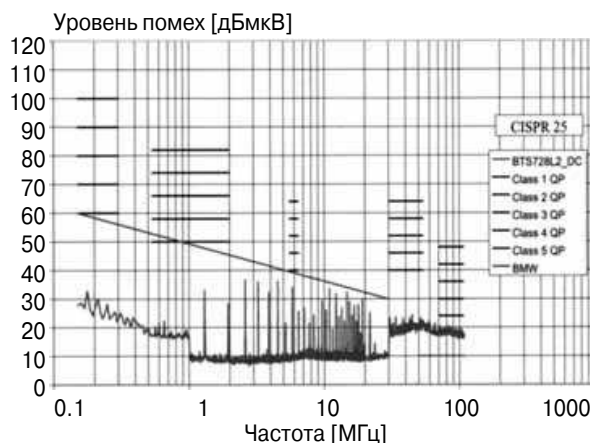


Рис. 13.28. Спектр электромагнитных помех, излучаемых генератором подкачки заряда с внутренним фильтром.

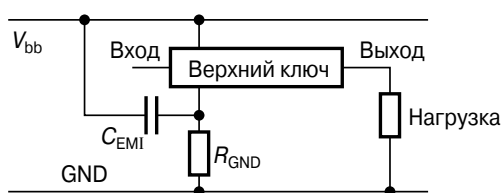


Рис. 13.29. Внешние цепи подавления помех, создаваемых генератором подкачки заряда.

Внешние цепи, предназначенные для снижения уровня узкополосных кондуктивных помех, распространяющихся по шине питания, могут включать в себя фильтрующие конденсаторы или RC -фильтры. Рекомендуемая схема включения этих фильтров приведена на Рис. 13.29.

Между шиной питания и земляным выводом ИС следует включить керамический конденсатор (C_{EMI}) ёмкостью приблизительно 10 нФ, а между земляным выводом ИС и опорной землёй схемы — резистор сопротивлением 150 Ом. Помимо ограничения тока ВЧ помехи, добавление этого резистора повышает защищённость ИС от воздействия ISO-импульсов. В случаях, когда использовать этот резистор не представляется возможным, следует увеличить ёмкость конденсатора до 1...10 мкФ, чтобы получить тот же фильтрующий эффект (Рис. 13.30).

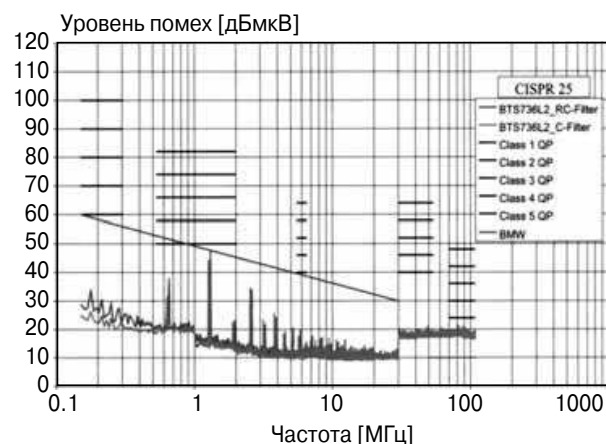


Рис. 13.30. Спектр электромагнитных помех, излучаемых ИС BTS736L2 при работе в режиме постоянного тока с внешним фильтром.

Электромагнитные помехи, излучаемые мощными ключевыми ИС в режиме ШИМ

При работе в режиме ШИМ силовые ключи генерируют широкополосные помехи, которые могут быть измерены, если частота переключения ниже верхней граничной частоты измерений тестового приёмника. Эти электромагнитные помехи распространяются от ключа по входным и выходным линиям ИС в соединительные кабельные жгуты. Особенно высокий уровень энергии данных помех сосредоточен в нижней и средней областях частотного

спектра. Характеристики источников подобных помех определяются формой сигналов тока и напряжения, их амплитудой, временем переключения и длительностью периода этих сигналов. При использовании ИС в конкретном устройстве частота переключения и ток нагрузки обычно заданы заранее. Поэтому минимизация помех возможна лишь путём управления временем переключения ИС или оптимизации (с точки зрения электромагнитной совместимости) формы фронта сигнала переключения. Большее время переключения означает меньший уровень излучаемых помех, однако это и большие потери мощности при переключении, связанные со снижением крутизны фронта сигнала переключения. Другой путь снижения ШИМ-помех заключается в проектировании ИС таким образом, чтобы при переключении сигналов в их спектре не появлялись высокочастотные гармоники. Это достигается путём селективной коррекции формы фронта сигнала переключения тока или напряжения. Идеальный с точки зрения ЭМС процесс коммутации сигналов означает максимальную скорость переключения и низкие потери при переключении, при этом не должны превышать заданные значения уровня излучаемых помех.

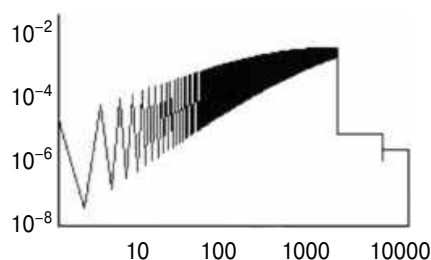


Рис. 13.31. Идеальный спектр ВЧ шумов.

На Рис. 13.31 показан идеальный спектр помех, генерируемых силовой ИС в режиме ШИМ. Зная, что мощность ИС в режиме ШИМ составляет, например, 60 Вт при напряжении питания 12 В, можно рассчитать параметры идеального процесса переключения. В данном случае, в диапазоне свыше 150 кГц все частотные составляющие сигнала помех не превышают значений, заданных стандартом CISPR 25. Время переключения, соответствующее теоретически достижимому пределу минимизации уровня излучаемых помех, составляет около 10 нс (Рис. 13.32), а частота ШИМ — около 1 кГц.

В области перехода от статического к динамическому режиму затем происходит сглаживание фронтов. При более высоких частотах переключения ШИМ и более крутых фронтах сигнала переключения требуется использование внешних компонентов фильтра для того, чтобы уровень излучаемых помех не превышал заданных значений. Одна из форм выходного сигнала, подходящая для реализации в мощной ИС, показана на Рис. 13.33, а соответствующее ей снижение уровня помех — на Рис. 13.34. По сравнению с аналогичной ИС, в которой режим сглаживания фронтов сигналов не реализован, достигнуто снижение уровня излучаемых помех на 15 дБ (за счёт того, что переключение происходит в области более низких частот), при этом общие потери мощности возрастают незначительно.

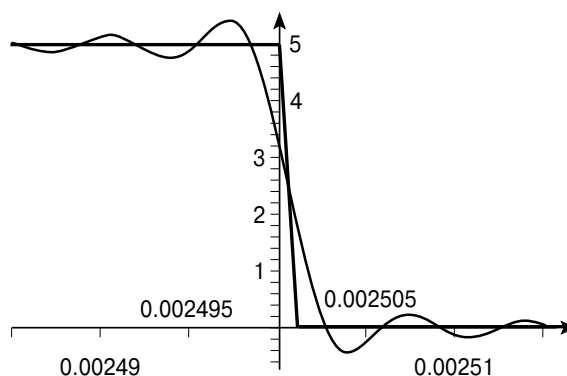


Рис. 13.32. Реальная и идеальная формы фронта сигнала при переключении.

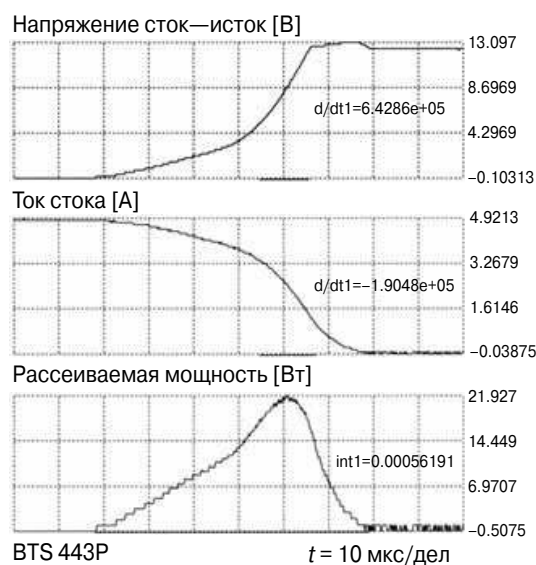


Рис. 13.33. Сглаживание фронтов сигналов.

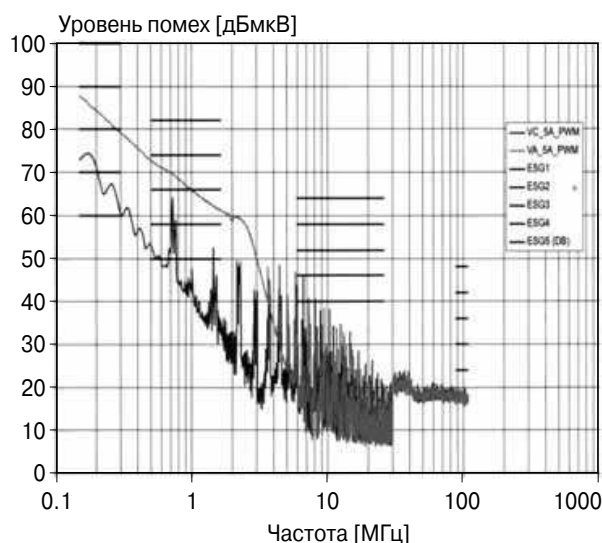


Рис. 13.34. Спектр излучения при сглаживании фронтов сигналов и без него.

В зависимости от тока нагрузки и времени переключения, для снижения уровня помех в цепях питания, вызванных процессами переключения при работе ИС в ШИМ-режиме, могут быть использованы такие внешние компоненты фильтров, как накопительные конденсаторы, подключаемые между выводами питания и опорной землёй, LC - или π -фильтры. Одновременно эти фильтры подавляют и узкополосные помехи (например, подобные рассмотренным в предыдущем подразделе).

13.2.2. Помехи, создаваемые DC/DC-преобразователями

Электромагнитные помехи, излучаемые при работе DC/DC-преобразователей, как и помехи, излучаемые при работе силовых ключей, возникают как следствие быстрых переключений токов и напряжений. Однако, в отличие от силовых ключей, выходные каскады DC/DC-преобразователей работают при значительно более высоких частотах переключения. Это связано с тем, что в целях снижения стоимости и габаритов DC/DC-преобразователей все пассивные накопители энергии (дроссели сглаживающих фильтров, входные и выходные конденсаторы) стараются выбирать как можно меньшими. Таким образом, наиболее предпочтительными являются частоты переключения в диапазоне 100...500 кГц. Можно сказать, что работа DC/DC-преобразователей на высоких частотах переключения позволяет снизить потери мощности на пере-

ключение. По отношению к излучаемым электромагнитным помехам, которые в данном случае распространяются по цепи питания и через выходные соединители, это означает, что основную роль играют узкополосные помехи с высокой энергией, спектр которых простирается далеко в область частот 100 МГц и выше. В спецификациях на DC/DC-преобразователи содержатся типовые схемы их включения (Рис. 13.35).

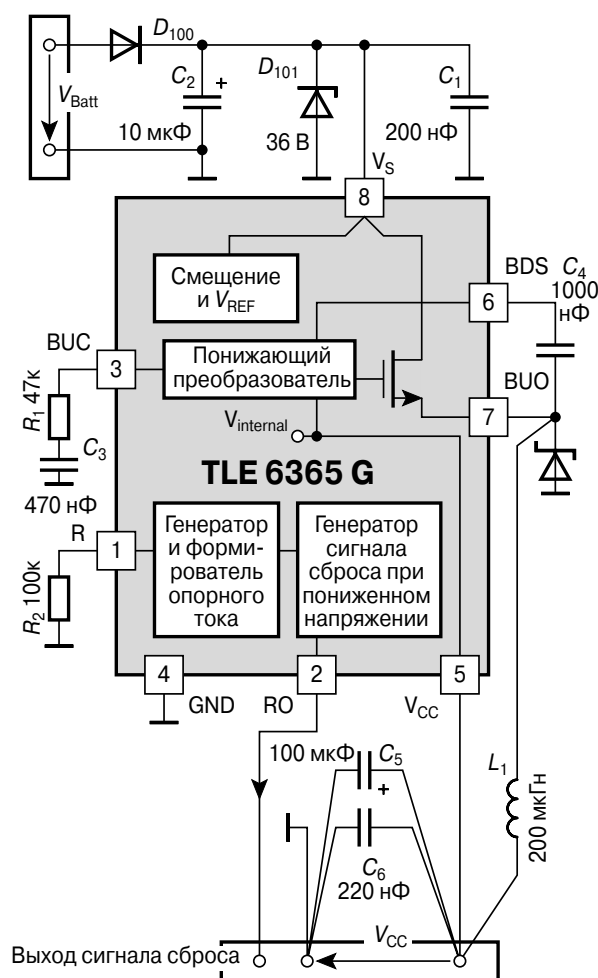


Рис. 13.35. Схема DC/DC-преобразователя.

Особенно большое значение для обеспечения электромагнитной совместимости имеет разводка печатной платы устройств. Рекомендуется производить её таким образом, чтобы обеспечить минимальную паразитную индуктивность в цепи питания, минимизировать площадь токоведущих дорожек, предназначенных для сигналов переменного напряжения (dv/dt), реализовать заземление в виде отдельного слоя печатной платы (этот слой будет также использо-

ваться в качестве экранирующего), а также обеспечить оптимальный способ подключения фильтров к земле. Дополнительные меры, снижающие потери мощности и повышающие эффективность системы, предусматривают подключение к затвору дополнительных резисторов (gate dropping resistors), конденсаторов между затвором и стоком и RC -демпферов, включаемых параллельно с защитными (обратными) диодами. На Рис. 13.36 приведён пример такой оптимизированной печатной платы.

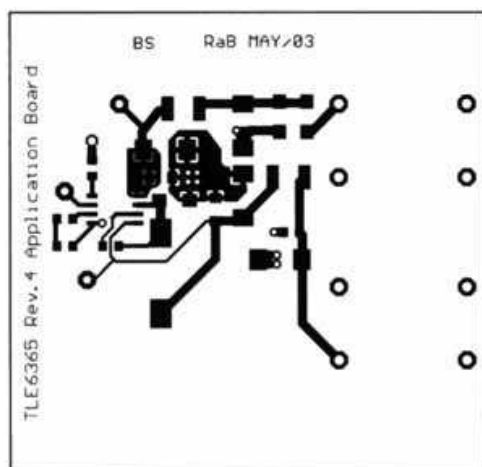


Рис. 13.36. Оптимизированная с точки зрения электромагнитной совместимости разводка печатной платы.

Если не принимать дополнительных мер по фильтрации помех, то уровень электромагнитных излучений, генерируемых DC/DC-преобразователем, превысит границы допустимого (Рис. 13.37).

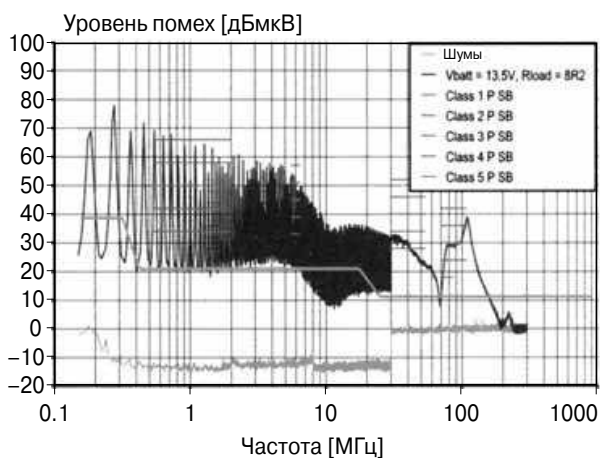


Рис. 13.37. Спектр помех, излучаемых DC/DC-преобразователем без дополнительного π -фильтра.

Лишь дополнив схему дросселем и конденсатором, которые в совокупности с разделительным конденсатором образуют так называемый π -фильтр, можно надёжно гарантировать, что уровень помех останется в пределах, рекомендованных стандартом CISPR 25 (Рис. 13.38).

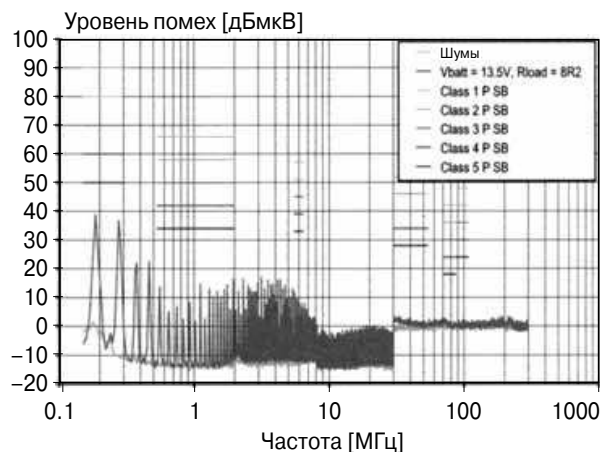


Рис. 13.38. Спектр помех, излучаемых DC/DC-преобразователем с дополнительным π -фильтром.

13.2.3. Помехи, создаваемые коммуникационными ИС (CAN-трансиверами)

Помехи, излучаемые CAN-трансиверами, возникают вследствие того, что данные передаются по коммуникационным линиям на высокой частоте. Существуют высокоскоростные (High Speed — HS) CAN-трансиверы (скорость передачи данных до 1 Мбод) и низкоскоростные (Low Speed — LS) CAN-трансиверы (скорость передачи данных до 120 Кбод). В обоих вариантах для передачи данных используются две линии. В состоянии ожидания (idle) напряжение на них составляет 2.5 В; в активном режиме путём переключения соответствующих транзисторов драйвера HSCAN напряжение на линии CAN High устанавливается в 5 В, а на линии CAN Low — в 0 В. Следовательно, изменение сигнала в каждой из линий составляет 2.5 В. Аналогичным образом работает и шина LSCAN, но здесь линия CAN High переключается из 0 В в 5 В, а линия CAN Low — из 5 В в 0 В. Теоретически, если сигналы на выходах транзисторов драйвера CAN идентичны по форме, то протекающие в линиях токи (противофазные друг другу) и вызванные ими помехи

должны взаимно компенсироваться. На практике, возможности ИС ограничены характеристиками переключения, которые могут быть обеспечены соответствующей полупроводниковой технологией. На **Рис. 13.39** показаны сигналы в коммуникационных линиях и суммарный сигнал для трансивера LSCAN. Видно, что по форме сигналы не совпадают друг с другом, и эта асимметрия вызывает появление синфазной излучаемой помехи (**Рис. 13.40**). Уровень этой помехи может быть измерен методом 150-омного пробника, подключаемого по синфазной схеме.

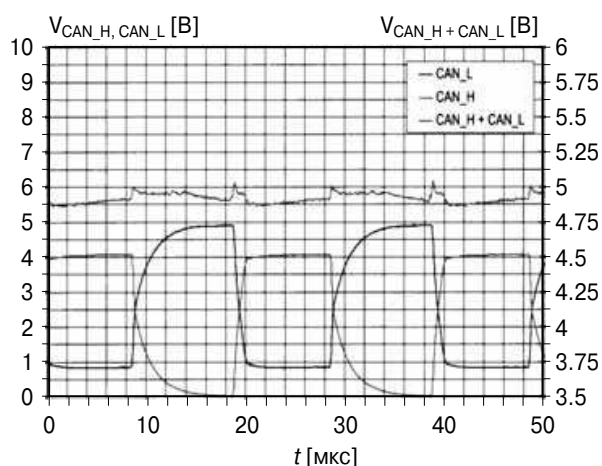


Рис. 13.39. Сигналы на низкоскоростной шине LSCAN.

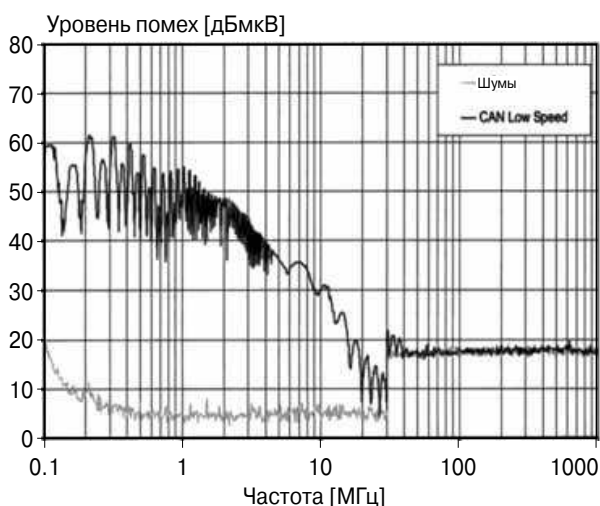


Рис. 13.40. Спектр помех, излучаемых низкоскоростной шиной LSCAN.

Принцип работы CAN-трансиверов включает возможность системного использования внешних устройств, предназначенных для ограничения уровня излучаемых

ими электромагнитных помех. Необходимость обеспечить высокую скорость передачи данных означает, что для низкоскоростной шины LSCAN, в зависимости от требуемой функциональности и уровня максимальной загрузки шины, следует ограничиться применением таких компонентов, как конденсаторы ёмкостью 150...330 пФ. Кроме того, используются синфазные дроссели индуктивностью 51 мкГн, которые предотвращают распространение синфазной помехи в обоих направлениях. Уровень синфазных помех может быть снижен за счёт использования витых пар или экранированных кабелей, однако из соображений экономии такие кабели редко используются в автомобильных системах.

13.2.4. Помехоустойчивость автомобильных мощных ключевых ИС

Мощные ключевые ИС, работающие в качестве верхних или нижних ключей в схемах автомобильных устройств, часто питаются непосредственно от бортового напряжения питания. Следовательно, они подвержены воздействию ISO-импульсов, которые проникают в ИС через внешние соединения и вызывают перенапряжения, превышающие номинальное рабочее напряжение ИС (**Рис. 13.41**). Это, в свою очередь, вынуждает при разработке ИС предусматривать встроенные схемы защиты, которые отключают ИС от внешних цепей и ограничивают ток или напряжение.

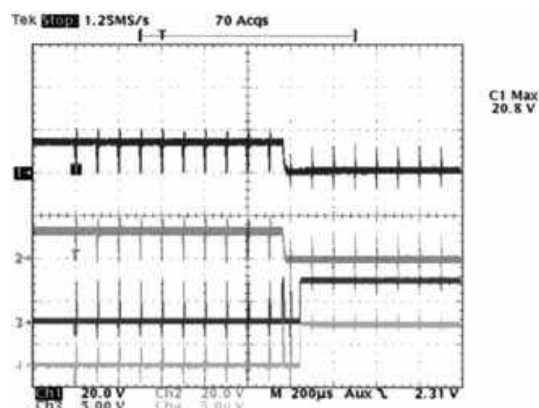


Рис. 13.41. Ввод импульсов по стандарту ISO.

Высокочастотные электромагнитные помехи проникают в ИС тем же путём, через соединительные кабели, которые работают

как антенны. Для оценки устойчивости ИС к высокочастотным излучениям применяется метод прямого введения мощности; ВЧ мощность инжектируется непосредственно в заданный вывод ИС во время её обычной работы (пример получаемого при этом спектра приведён на Рис. 13.42). На выводы ИС, которые соединены с печатной платой короткими проводниками, подаётся испытательная прямая ВЧ мощность 50 мВт (17 дБм), а выводы ИС, к которым подключены длинные соединительные проводники, идущие к внешним устройствам, подвергаются воздействию ВЧ излучения мощностью 5 Вт (37 дБм).

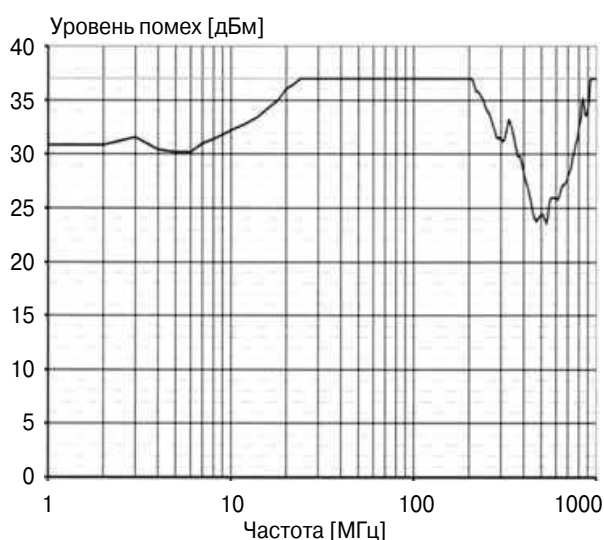


Рис. 13.42. Помехоустойчивость силовой ИС.

Есть немало различных методов повышения внутренней устойчивости ИС к воздействию электромагнитных помех импульсного или высокочастотного происхождения и различной мощности. Эффективность этих мер зависит от применяемой схемотехники, качества монтажа элементов и полупроводниковой технологии, по которой выполнена та или иная ИС.

При оценке воздействия ISO-импульсов на ИС можно выделить три основных категории:

- **Динамическое воздействие** — определяется скоростью нарастания напряжения в импульсе (dv/dt). Снизить его можно за счёт повышения рабочего тока ИС и минимизации внутренних паразитных ёмкостей. Кроме того, можно использовать внешние конденсаторы.
- **Воздействие энергии импульса** — может привести к разрушению полупроводни-

ковой структуры ИС. На уровне проектирования ИС проблема решается путём реализации встроенных схем защиты от перенапряжений, перегрузок по току и перегрева. В качестве внешних защитных устройств могут применяться диоды и ограничители пиковых напряжений.

- **Воздействие отрицательного напряжения** — если импульсное отрицательное напряжение превышает величину падения напряжения на диоде, то, в зависимости от полупроводниковой технологии ИС, через транзисторы выходных каскадов начинает протекать обратный ток неосновных носителей заряда. Чтобы обезопасить ИС от такой ситуации, следует встроить в неё защитные структуры, которые способны выборочно шунтировать путь протекания этого тока, подключая к нему канал с малым омическим сопротивлением. Внешняя защита может осуществляться с помощью обратно-включённых диодов.

Ослабление влияния ВЧ помех в ИС достигается путём использования фильтров, встроенных в её внутреннюю структуру и направляющих ВЧ энергию помех в опорную землю или отражающих её в обратном направлении. В зависимости от концепции построения ИС, эти фильтры могут работать с большими ВЧ токами или высокими ВЧ напряжениями и могут быть как активными, так и пассивными. Чем выше допустимый рабочий ток ИС, тем выше её помехоустойчивость. В качестве внешней защиты могут использоваться фильтрующие конденсаторы, а в некоторых случаях — дроссели.

13.2.5. Помехоустойчивость коммуникационных ИС (CAN-трансиверов)

Исследования устойчивости CAN-трансиверов к воздействию электромагнитных помех сконцентрированы, как и в случае с определением уровня их электромагнитного излучения, на обеспечении помехоустойчивости при передаче сигналов по линиям CANHigh и CANLow. ВЧ энергия помех воздействует на выводы ИС непосредственно, по линиям передачи данных, которые работают как приёмные антенны. Указанный эффект может быть смоделирован с помощью метода прямого введения мощ-

ности (DPI) в соответствии со стандартом IEC 62132-4. В ходе этой процедуры имитирующий синфазную помеху испытательный ВЧ сигнал прямой мощностью 4 Вт (36 дБм) накладывается на полезный сигнал, проходящий по линиям CAN (Рис. 13.43), при этом производится контроль работы ИС трансивера, т.е. отслеживаются ошибки приёма или передачи данных. Типичная частотная характеристика, полученная при оценке помехоустойчивости высокоскоростного CAN-трансивера, приведена на Рис. 13.44.

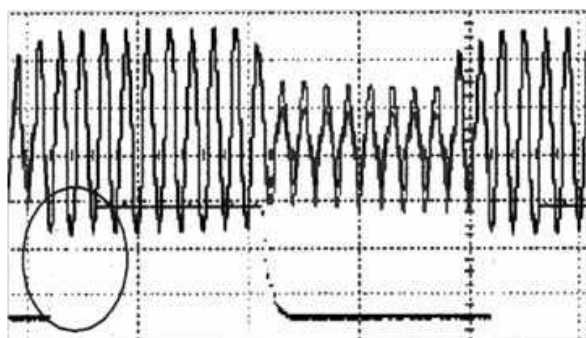


Рис. 13.43. Наложение ВЧ сигнала помехи на полезный сигнал.

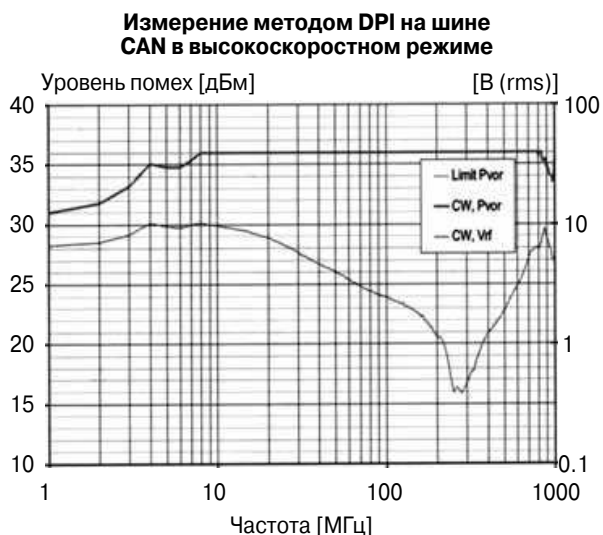


Рис. 13.44. Ограничение помехоустойчивости CAN-трансивера.

Как видно из рисунка, в области частот около 1 МГц наблюдаются ошибки при передаче данных. Поскольку указанный диапазон частот слишком близок к частотному диапазону передачи данных по шине CAN, фильтрация помех здесь вряд ли возможна. С возрастанием частоты испытательного

ВЧ сигнала среднееквадратичное значение напряжения помехи, измеряемое на выходах ИС, уменьшается (что и показывает нижний график на Рис. 13.44). С помощью этого графика можно получить информацию о характеристиках импеданса ИС в данном диапазоне частот. Для того чтобы достичь высокой устойчивости к воздействию синфазной помехи, следует уделить особое внимание обеспечению симметричности входных импедансов. Использование внешних фильтров зависит от обстоятельств; ограничения на их применение были упомянуты выше (см. подраздел 13.2.3).

Поскольку CAN-трансиверы работают в качестве драйверов линий, они часто размещаются непосредственно (и без защитных схем) на разъёмах устройств управления (блоков управления) и, следовательно, могут подвергаться воздействию электростатических разрядов. Типичные трансиверы характеризуются пробивным ESD-напряжением 4 кВ по линии CANHigh и 8 кВ по линии CANLow (при испытаниях с помощью HBM-модели, соответствующей стандарту IEC 1000-4-6, и параметрах $R = 330 \text{ Ом}$, $C = 150 \text{ пФ}$).

13.2.6. Меры по обеспечению электромагнитной совместимости ИС в прикладных схемах с использованием внешних компонентов

Выполнение требований EMC для электронных устройств или систем не ограничивается лишь EMC-характеристиками ИС как источников или приёмников помех. Данная проблема должна рассматриваться с системной точки зрения, с учётом требований, предъявляемых к конкретному устройству, и его электромагнитного окружения. В зависимости от параметров того или иного приложения, меры по обеспечению EMC могут включать в себя рекомендации по разводке соединений и расчёт фильтров с использованием внешних конденсаторов и катушек индуктивности. Необходимо подчеркнуть, что любой компонент фильтра обладает паразитными свойствами, которые проявляются, как правило, с увеличением рабочей частоты. Стоит также сказать, что на EMC-характеристики устройства оказывают влияние как тип фильтрующего компонента, так и способ его

размещения на печатной плате. Например, конденсаторы способны сохранять ёмкость лишь при работе в определённом частотном диапазоне. Верхняя граничная частота зависит от типа конденсатора (электролитический, керамический, металлоплёночный) и его внутренней структуры и вычисляется по формуле:

$$f_g = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}.$$

Граничная частота конденсатора определяется его ёмкостью и собственной индуктивностью. На частотах выше граничной основной вклад в импеданс конденсатора начинает вносить не ёмкостная, а индуктивная составляющая. Следует также учитывать ненулевое омическое сопротивление контактов и сопротивление утечки.

Схожие соображения применимы и к дросселям фильтров. Паразитные межобмоточные ёмкости дросселей ограничивают индуктивную составляющую импеданса так же, как собственная индуктивность ограничивает ёмкостную составляющую импеданса конденсаторов. Эквивалентная схема включает в себя активное (омическое) сопротивление обмоток, индуктивность и включённые параллельно с ней паразитные межобмоточные ёмкости. Значения этих паразитных элементов определяются исполнением дросселя. Паразитные ёмкости выходных (нагрузочных) и сглаживающих дросселей могут составлять 10 пФ...1 нФ. У предназначенных для подавления симметричных электромагнитных помех высокочастотных дросселей со стержневым сердечником и многосекционными обмотками величина паразитной ёмкости не превышает 2 пФ. Примерно такую же паразитную ёмкость имеют и тококомпенсирующие дроссели, используемые для ослабления синфазной помехи.

Проблема повышения устойчивости ИС к высокочастотным помехам, проникающим по цепи питания или по выходным соединительным линиям, как правило, решается путём использования низкоиндуктивного керамического конденсатора ёмкостью 10...100 нФ, который включается между защищаемым выводом ИС и землёй. Применение конденсаторов подобного типа не только улучшает помехоустойчивость, но и снижает уровень помех, излучаемых самой

ИС. В зависимости от требований, предъявляемых к конкретному устройству, эти конденсаторы могут быть учтены при разводке монтажа.

13.3. Электромагнитная совместимость микроконтроллеров

13.3.1. Автомобильные микроконтроллерные системы и тенденции развития их технологий

Диапазон применения микроконтроллеров в автомобильной электронике очень широк и включает в себя простые устройства управления, например стеклоподъёмниками или осветительными приборами, более сложные модули, реализующие функции безопасности (например, управление подушками безопасности) и, наконец, системы комплексного регулирования таких функций, как впрыск топлива, управление зажиганием или управление торможением. Многоплановость требований к вычислительной мощности микроконтроллера и поддержке таких периферийных функций, как таймеры, последовательные и параллельные интерфейсы передачи данных, CAN-контроллеры и быстрые обработчики прерываний, является причиной постоянного усложнения микроконтроллерной архитектуры. Современные микроконтроллеры высшего класса сложности с 32-битной архитектурой содержат более 10 миллионов транзисторов. Параллельно растут требования и к величинам рабочего тока микроконтроллеров, что выражается не только в повышении нагрузочной способности стабилизаторов напряжения, но также и в увеличении уровня помех, генерируемых источником питания (вследствие возрастания коммутлируемых токов). Поэтому требования, относящиеся к разработке оптимальной концепции подавления высокочастотных электромагнитных помех, также неуклонно возрастают. К сожалению, повышение производительности ИС не способствует хорошей электромагнитной совместимости. На Рис. 13.45 показано, как улучшение некоторых важных, с технологической точки зрения, параметров микроконтроллеров соотносится с характеристиками ЕМС.

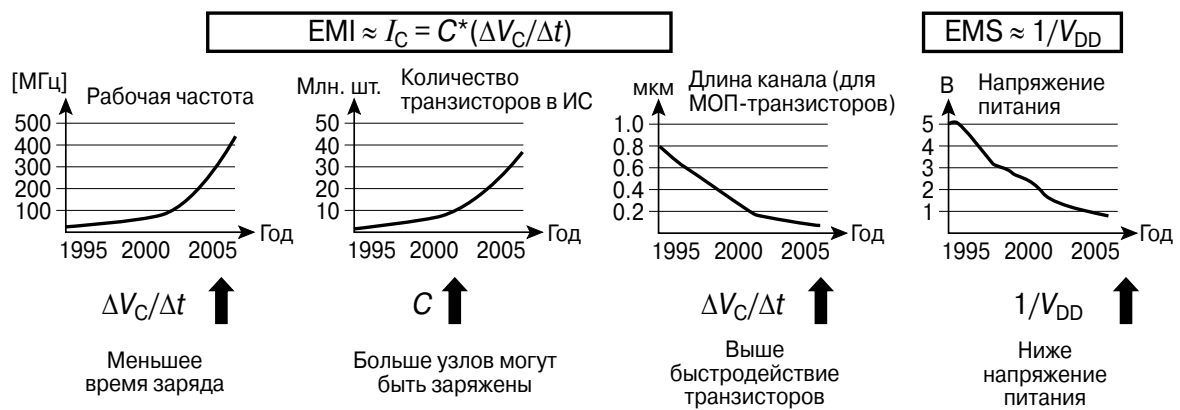


Рис. 13.45. Развитие полупроводниковых технологий и их влияние на характеристики ЕМС.

В результате развития технологий производства и продолжающейся дальнейшей миниатюризации интегральных транзисторов, на одном полупроводниковом кристалле может размещаться всё большее количество транзисторов. Например, в настоящее время на кремниевом кристалле площадью менее 100 мм^2 может быть размещено более 20 млн транзисторов. В связи с этим можно ожидать постоянного повышения токов переключения в ИС и, следовательно, возрастания уровня излучаемых помех.

Это, в свою очередь, снижает помехоустойчивость сложных электронных схем, поскольку помехи, вызываемые токами переключения (так называемый шум одновременного переключения, Sumultineos Switching Noise — SSN), становятся сравнимы по амплитуде с полезным сигналом (т.е. отношение сигнал/шум оказывается недопустимо малым). Поэтому необходимо принимать меры по снижению фоновому уровню SSN в источниках помех, чтобы не только уменьшить уровень излучаемых помех, но и повысить помехоустойчивость. Помимо мер, связанных с улучшением электромагнитной совместимости на уровне печатной платы, не меньшее значение имеет оптимизация ЕМС-характеристик на уровне ИС. Таким образом, оптимизированные с точки зрения электромагнитной совместимости схемотехнические решения в настоящее время играют ключевую роль в сфере разработки систем обеспечения безопасности, особенно в области автомобильной электроники.

Чем большее количество электронных систем размещается в автомобиле, тем выше оказываются требования к каждой из этих систем с точки зрения минимизации

электромагнитного излучения и минимальной чувствительности (восприимчивости) к воздействию электромагнитных помех или, другими словами, максимальной помехоустойчивости. По способу своего распространения, ВЧ помехи подразделяются на наведённые (кондуктивные) и излучаемые. Характерная длина выводов в микросхемах микроконтроллеров такова, что на частотах ниже 1 ГГц они вряд ли способны излучать помехи непосредственно в эфир, однако генерируемая ими электромагнитная энергия может возбуждать подключённые к выводам ИС структуры на печатной плате (например, шины питания или соединительные токопроводящие дорожки), которые имеют достаточно большие геометрические размеры и могут действовать как передающие антенны. Длина таких «антенных» структур определяется как $l > \lambda/20$, что соответствует 15 см на частоте 100 МГц и 15 мм на частоте 1 ГГц.

Архитектура микроконтроллерных систем такова, что практически все подключения к выводам микроконтроллера являются внутренними (пути прохождения сигналов локализованы в пределах печатной платы). Линии связи с внешними устройствами не подключаются напрямую к выводам микроконтроллера. Существует, однако, одно исключение из этого правила. Напряжение питания поступает в микроконтроллер от бортовой сети автомобиля через ИС стабилизатора напряжения, который не блокирует высокие частоты. Поэтому ВЧ помехи, которые генерируются в микроконтроллере и вследствие неоптимальной развязки распространяются по его цепи питания, через стабилизатор напряжения проникают в бортовую электрическую сеть автомобиля.

Результатом этого является появление помех в бортовой сети питания, которые могут проникать в другие устройства, подключённые к этой сети, или воздействовать на окружение таких электронных систем, как, например, автомобильное радио.

Итак, электромагнитные ВЧ помехи следует подавлять в их источнике (на уровне полупроводникового компонента), поскольку в противном случае придётся принимать меры по их ослаблению либо на схемном уровне, либо в том оконечном устройстве, которое подвергается воздействию этих помех. Только стоит это будет уже гораздо дороже. Хотя проектирование ИС с учётом концепции встроенного (on-chip) подавления помех требует определённых затрат, такое решение всегда эффективнее любых экстренных мер по защите внешних устройств от помех. Подытоживая всё вышесказанное, следует подчеркнуть, что оптимизация параметров ЕМС для микроконтроллерных систем должна проводиться как на уровне микросхемы, так и на уровне печатной платы.

Прежде чем приступить к оптимизации ЕМС-характеристик автомобильных электронных систем, необходимо провести целый ряд испытаний на уровне конкретных ИС, отдельных модулей и систем автомобиля, принимая во внимание следующие факторы:

- уровень электромагнитных помех, генерируемых интегральными схемами;
- помехоустойчивость на уровне компонентов (интегральных схем);
- уровень помех, генерируемых отдельными системами и устройствами;
- помехоустойчивость на системном уровне;
- уровень помех, генерируемых при работе автомобильной электроники;
- помехоустойчивость всего электрооборудования автомобиля в целом.

13.3.2. Проектирование печатной платы, оптимизированной с точки зрения электромагнитной совместимости

Современные микроконтроллерные архитектуры используют синхронное тактирование. Это означает, что активный фронт импульса системной тактовой частоты, по которому происходит переключение логических схем микроконтроллера, должен

приходить одновременно (насколько это возможно) во все точки печатной платы. Поэтому в системе будут иметь место очень короткие и крутые импульсы тока с высокой скоростью нарастания di/dt , достигающей 100 мА/нс. Для того чтобы сгенерировать импульсы тактовой частоты прямоугольной формы (на практике эти импульсы имеют трапецеидальную форму с максимально крутыми нарастающими и спадающими фронтами), требуются высокие токи перезаряда. Указанное требование применимо ко всем транзисторам, которые должны переключаться одновременно. Вследствие протекания больших токов переключения генерируется высокочастотное электромагнитное излучение, которое тем больше, чем больше энергия, потребляемая системой от внешнего источника питания. Следует напомнить, что высокочастотная составляющая этой энергии рассеивается в окружающее пространство, при этом роль передающих антенн играют токопроводящие дорожки и другие элементы печатной платы. Поэтому очень важно, чтобы источник большого зарядного тока, способный обеспечить требуемую скорость переключения импульсов тактовой частоты микроконтроллера, располагался как можно ближе к источнику излучения, т.е. к микроконтроллеру. Тогда энергия, излучаемая структурными элементами печатной платы, будет ниже, чем в ситуации, когда источником энергии «переключения» является расположенный на определённом расстоянии от микроконтроллера стабилизатор напряжения. В последнем случае, ВЧ помеха распространяется по следующему пути: внутренняя шина питания ИС — корпус ИС — шина питания на печатной плате (Рис. 13.46).

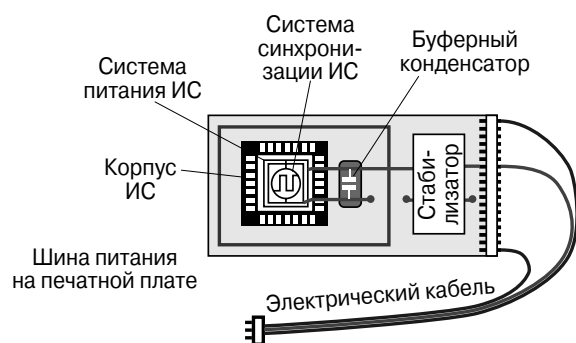


Рис. 13.46. Пути распространения помех в синхронизированных системах.

По этой причине между шинами питания и земли в непосредственной близости от микроконтроллера на печатной плате обычно размещают большое количество буферных конденсаторов, которые обеспечивают необходимый ток переключения. В промежутке времени между двумя активными фронтами тактовых импульсов конденсаторы перезаряжаются. К сожалению, использование на печатной плате дискретных конденсаторов имеет тот недостаток, что они обладают ненулевыми контактной индуктивностью (ESL — эквивалентная последовательная индуктивность) и контактным сопротивлением (ESR — эквивалентное последовательное сопротивление). Их значения (составляющие приблизительно 2 нГн и 30 мОм) достаточно велики для того, чтобы на наиболее высоких частотах конденсатор практически терял свои ёмкостные свойства. Напротив, контактная индуктивность встроенного конденсатора, размещённого в непосредственной близости от внутренней шины питания ИС, оказывается пренебрежимо малой. Следовательно, чем большее количество таких внутренних конденсаторов может быть интегрировано непосредственно в микросхему, тем выше будет эффект подавления ВЧ излучения.

Снижение уровня электромагнитных излучаемых помех также может быть достигнуто путём использования соответствующих схемотехнических и конструктивных решений при разработке печатной платы. К их числу можно отнести: применение индуктивных фильтров (например, дросселей и ферритовых бусин), работающих как фильтры нижних частот; выполнение печатной платы с дополнительным заземлённым слоем без сквозных отверстий в нём; выполнение подводов ВЧ сигнала в виде полосковых линий; использование дополнительных конденсаторов и электромагнитных экранов. Однако все эти дополнительные элементы повышают стоимость электронных устройств, что весьма существенно, особенно если речь идёт о массовом производстве.

Если, по соображениям экономии средств, решено использовать печатную плату лишь с двумя слоями, то один из этих слоёв должен (насколько это возможно) быть выделен под землю (GND и V_{SS}). Если это не представляется возможным, то шины

положительного питающего напряжения (V_{DD}) и V_{SS} следует прокладывать как можно ближе друг к другу или одну над другой, чтобы минимизировать путь протекания возвратного тока и, следовательно, уменьшить уровень синфазных помех (Рис. 13.47).

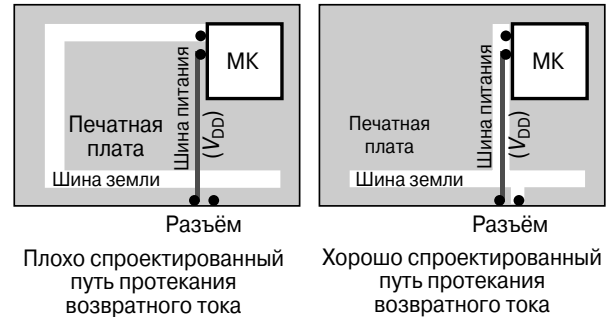


Рис. 13.47. Разводка напряжения питания на двухслойной печатной плате.

При проектировании многослойных печатных плат необходимо предусмотреть два отдельных слоя, выделенных исключительно под шины напряжения питания (V_{DD} и V_{SS}). Любые другие питающие напряжения в схеме должны подводиться к «островам», расположенным непосредственно под теми модулями, которые используют эти напряжения питания. В целях минимизации уровня излучаемых электромагнитных высокочастотных помех, желательно обеспечить как можно большую величину паразитной ёмкости между слоями питания. Этого можно достичь, располагая внутренние слои печатной платы непосредственно один над другим (Рис. 13.48).

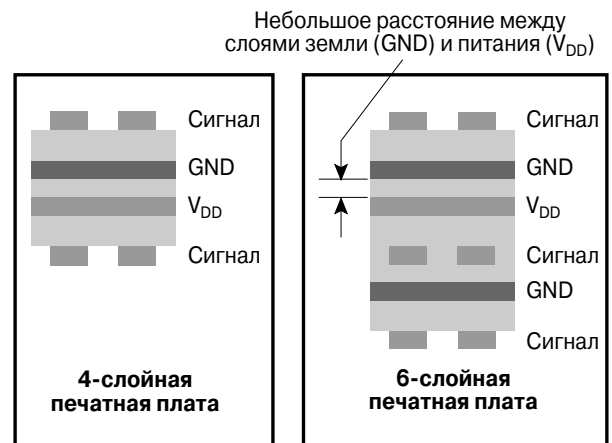


Рис. 13.48. Распределение слоёв в многослойной печатной плате.

Например, в 6-слойной печатной плате второй слой может быть отведён под сигнальную землю, что обеспечит заданное значение импеданса по отношению к высокочастотному сигналу данных. Здесь, как и в случае с разводкой шин питания, следует обратить внимание на то, чтобы пути протекания возвратных токов были как можно короче. Особенно надо избегать электрического контакта земляного слоя с соседними слоями через сквозные отверстия (Рис. 13.49).

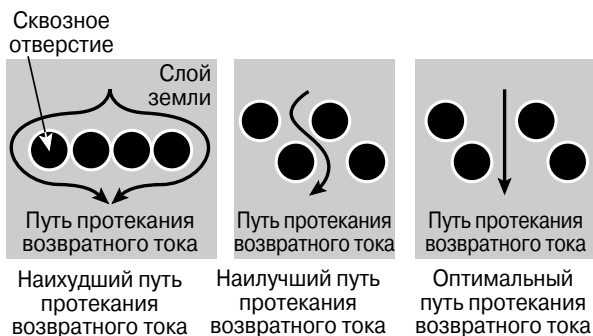


Рис. 13.49. Оптимизация путей протекания возвратных токов для ВЧ сигналов на печатной плате.

Самое пристальное внимание следует уделить размещению на печатной плате нескольких ИС. В первую очередь, необходимо провести шины питания от стабилизатора напряжения. Напряжение к быстродействующим логическим схемам, «медленным» логическим схемам и чувствительным аналоговым каскадам должно подаваться раздельно, чтобы минимизировать взаимное влияние этих схем. Соответствующие линии (дорожки) питания должны соединяться по схеме «звезда» в одной точке в стабилизаторе напряжения (Рис. 13.50).

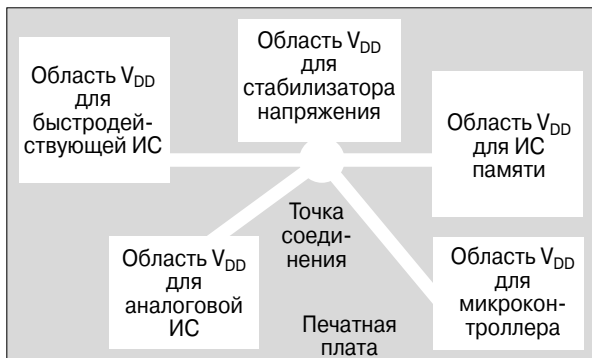


Рис. 13.50. Разводка шин питания ИС различных типов по схеме «звезда».

При использовании буферных конденсаторов следует размещать их на печатной плате таким образом, чтобы обеспечиваемый ими ток переключения поступал в ИС по кратчайшему пути. В этом случае ток от источника питания (по шинам V_{DD} или V_{SS} , в зависимости от схемы включения ИС) физически протекает через конденсатор в ИС. В качестве иллюстрации этого, на Рис. 13.51 показаны примеры правильного и неправильного подключения буферных конденсаторов к выводам питания микроконтроллера. Две верхние схемы на Рис. 13.51 относятся к случаю размещения компонентов на одной стороне платы, а две нижние — к случаю, когда микроконтроллер и конденсатор размещаются на лицевой и обратной сторонах 4-слойной печатной платы (PCB).

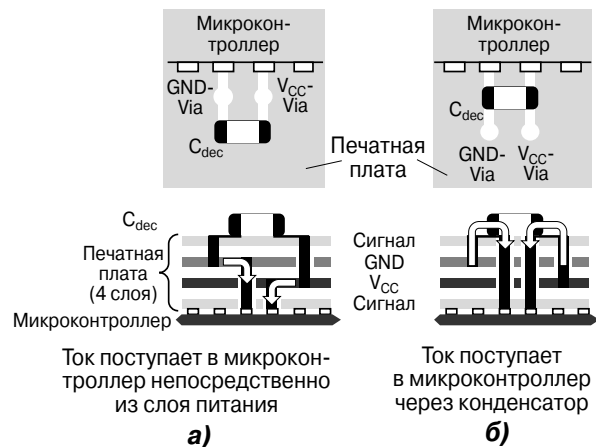


Рис. 13.51. Неправильное (а) и правильное (б) размещение буферного конденсатора.

При подключении к встроенному в микроконтроллер генератору керамического или кварцевого резонатора следует обратить особое внимание на то, чтобы непосредственно под местом размещения основного вывода резонатора на печатной плате была создана проводящая область («остров»), соединённая с выводом V_{SS} (землёй) микроконтроллера. Это единственный способ избежать протекания возвратного тока по поверхности земляного слоя печатной платы.

Помимо концепции использования буферных конденсаторов, огромное значение, с точки зрения снижения уровня ВЧ излучений и обеспечения целостности полезного сигнала, имеет «канализирование» при передаче высокочастотных полезных сигналов по шинам данных. Излучение или проникновение ВЧ помех, например, в

цепь питания можно эффективно предотвратить путём экранирования сигнальных проводников. При этом формируется микрополосковая линия (в случае использования однослойного экранирования) или полная полосковая линия (в случае использования двухслойного экранирования). В обоих вариантах полосковые линии могут быть спроектированы с заданным импедансом, что позволяет согласовывать их с выходным импедансом драйвера сигналов. На **Рис. 13.52** приведены примеры таких линий с различными импедансами.

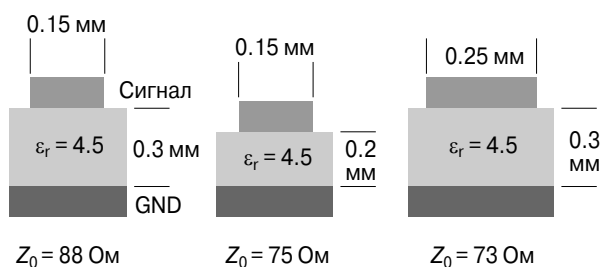


Рис. 13.52. Характеристические сигнальные импедансы микрополосковых линий.

Согласование импедансов линии и драйвера позволяет как улучшить целостность сигнала при передаче его по линии, так и снизить уровень излучаемых помех. Напротив, рассогласование импедансов приводит к отражению сигналов из линии в драйвер, что вызывает искажения фронтов сигналов (выбросы) или даже генерацию паразитных ВЧ колебаний («звон») в момент их переключения. Более подробно этот эффект рассмотрен в разделе 13.4.

Компьютерное моделирование и симуляция характеристик ЕМС

Компьютерная симуляция может проводиться во временной или в частотной области. Картина, полученная во временной области, позволяет оценить целостность сигналов, т.е. крутизну фронтов, наличие выбросов/провалов или «звона» при передаче сигналов. Результаты компьютерного моделирования помогают выявить «сверхгабаритные» драйверы, чересчур длинные соединительные проводники и несогласованность импедансов. Производители ИС для обеспечения технической поддержки своей продукции обычно предоставляют так называемые компьютерные IBIS-модели (спецификации буфера ввода/вывода)

для цифровых схем переключения, которые описывают характеристики переключения для всех драйверов, входящих в состав данной ИС. Структурные элементы печатной платы могут быть описаны в рамках так называемой модели линии передачи (Transmission Line Model — TLM) или с использованием двух- или трёхмерных (в зависимости от вида конкретной печатной платы) стандартных элементов, которые позволяют моделировать различные геометрические формы. Чем неудачнее спроектирована печатная плата, тем тщательнее должен быть проведён процесс моделирования её самой и её окружения, и тем больше оказывается объём обрабатываемых данных и требуемые вычислительные ресурсы. Моделируемые параметры записываются в виде сложных так называемых RLCG-матриц, для решения которых используются программы анализа электромагнитных полей. С помощью этих программ можно производить вычисления как на уровне проводников, так и на уровне полей. Примеры такого анализа в частотной и временной областях приведены на **Рис. 13.53**.

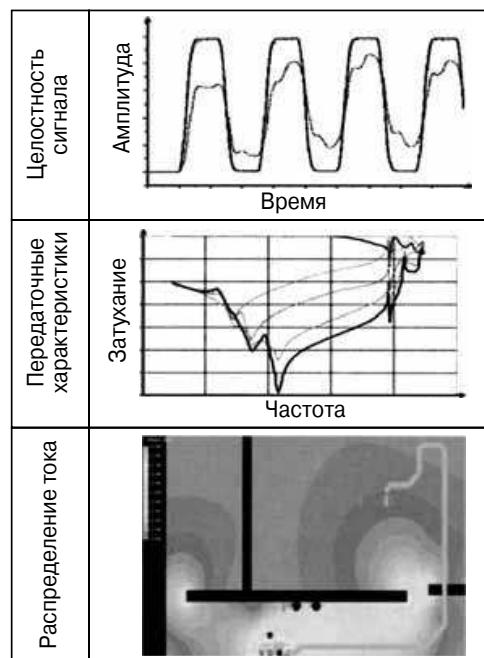


Рис. 13.53. Компьютерный анализ целостности сигнала во временной области (верхний график), коэффициента передачи S_{21} в частотной области (центральный график) и локального распределения тока на печатной плате (нижний график).

13.3.3. Измерение уровня помех, излучаемых микроконтроллерами

При оценке уровня помех, излучаемых микроконтроллерами, за основу принята методика проведения измерений, соответствующая стандарту IEC 61967. Данный стандарт описывает 5 различных методов измерений как кондуктивных (IEC 61967-4, бывший стандарт VDE 767.13), так и излучаемых помех (IEC 61967-2, бывший стандарт SAE 1752/3). Кроме того, в ряд национальных стандартов дополнительно входят различные измерительные методики, предложенные национальными комиссиями по проблеме EMC и по настоящее время сосуществующие со стандартом IEC 61967. Подробное описание стандартизированных в соответствии с IEC 61967 методов измерения помех было дано в разделе 13.1.3.

Два из этих измерительных методов могут быть реализованы с помощью одной испытательной платы (Рис. 13.54). Универсальная испытательная плата для измерений методом ТЕМ-камеры конструктивно представляет собой квадрат со стороной 4 дюйма (10.14 см). Испытуемая ИС микро-

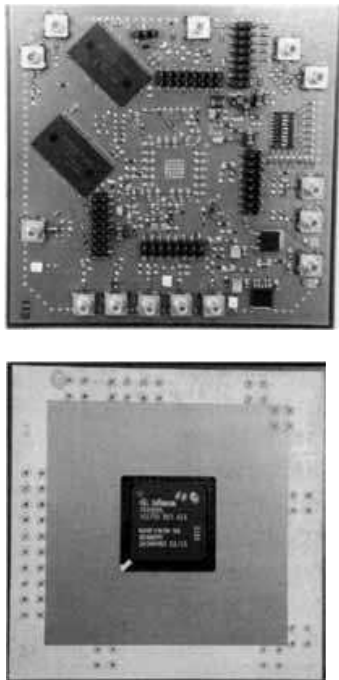


Рис. 13.54. Испытательная плата для измерения уровня помех, излучаемых микроконтроллером. Вверху — верхняя сторона платы, внизу — нижняя сторона платы с испытуемой ИС.

контроллера размещается на экранированной обратной стороне платы, а периферийные устройства (память, тактовый генератор, внешние порты ввода/вывода) — на лицевой стороне. Эта же плата совместно со сканером ближнего поля может быть использована и при проведении измерений распределения электромагнитных полей вдоль поверхности испытуемой ИС. Такой тест полезен для определения критических, с точки зрения излучения помех, выводов микроконтроллера.

В типичном спектре помех, излучаемых микроконтроллером, резко выделяются по амплитуде гармоники системной тактовой частоты. При сравнении уровней излучаемых помех, полученных, например, на разных этапах проектирования ИС, используется огибающая спектрального сигнала. На **Рис. 13.55** показан типичный спектр помех, излучаемых микроконтроллером, который работает с тактовой частотой 40 МГц.

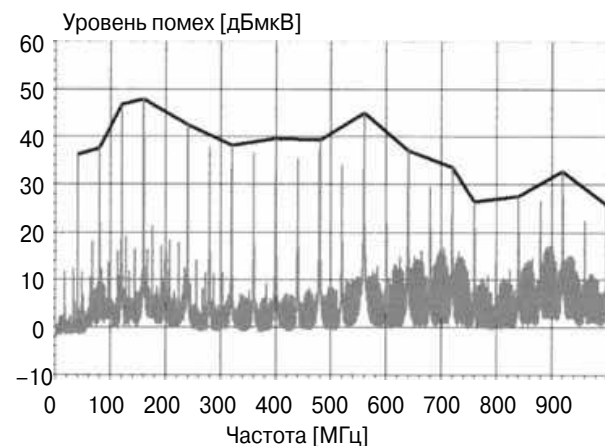


Рис. 13.55. Спектр помех, излучаемых микроконтроллером, полученный при измерении методом ТЕМ-камеры в соответствии со стандартом IEC 61967-2. Тактовая частота микроконтроллера 40 МГц.

Источники помех и пути их распространения

Микроконтроллер состоит из большого количества функциональных модулей (Рис. 13.56). В первую очередь, имеется ЦПУ (центральное процессорное устройство), ответственное за вычисления и управление процессом передачи данных. Как называемым периферийным модулям, или проще «периферии», микроконтроллера относятся модули памяти (ОЗУ,

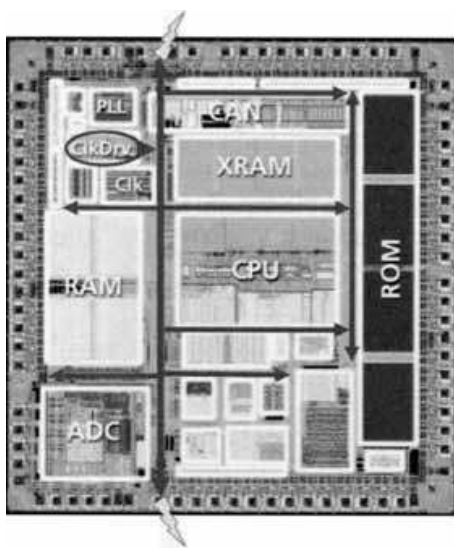


Рис. 13.56. Расположение функциональных модулей в корпусе микроконтроллера, использующего систему централизованной синхронизации тактовыми импульсами.

ПЗУ, ЭППЗУ, флэш-память), таймеры (например таймеры захвата/сравнения), последовательные и параллельные интерфейсы передачи данных (ASC, SSC, SPI, параллельный порт), специальные модемы (CAN, J1850), контроллер прерываний и интерфейс внешней памяти (EBU — модуль внешней шины). Для того чтобы обеспечить максимальную вычислительную мощность микроконтроллера, шины передачи данных должны обладать максимально возможной пропускной способностью и работать на возможно более высокой тактовой частоте. Высокая тактовая частота передачи данных означает, что на обработку данных у микроконтроллера имеется немного времени, поэтому длительность латентной фазы цикла передачи данных следует задавать как можно большей. Соответственно, необходимо обеспечить чрезвычайно крутые фронты сигналов тактовой частоты, причём эти сигналы должны поступать синхронно по всей системе.

Поскольку все транзисторы микроконтроллера потребляют в процессе переключения ток, протекающий по внутренней шине питания, она представляет собой основной путь распространения ВЧ помех (подсчитано, что до 60% ВЧ помех проникают в окружающие системы по цепи питания микроконтроллера). Ещё около 30% помех распространяются через порты ввода/вывода, и лишь оставшиеся 10% непосредственно

излучаются в окружающее пространство. Те высокочастотные помехи, которые не удалось подавить схемотехническими методами на уровне микросхемы (например, за счёт применения интегрированных в кристалл развязывающих конденсаторов), проникают в окружающие микроконтроллер системы через контактные площадки шины питания. К числу внешних систем, подвергающихся воздействию помех, прежде всего относится печатная плата, на которой размещён микроконтроллер. Эта ВЧ помеха может быть частично ослаблена дискретными развязывающими конденсаторами, которые следует располагать как можно ближе к выводам питания микроконтроллера. Обладая неоптимальными характеристиками контактной индуктивности (ESL — эквивалентная последовательная индуктивность, составляющая приблизительно 2 нГн) и контактного сопротивления (ESR — эквивалентное последовательное сопротивление, составляющее приблизительно 30 мОм), эти конденсаторы способны эффективно подавлять помехи на относительно низких частотах, вплоть до 10 МГц. Более высокочастотные помехи не ослабляются. По этой причине необходимо организовать подавление электромагнитных ВЧ помех в самой микросхеме, минимизируя их источники и пути распространения.

Система синхронизации тактовыми импульсами является главным источником узкополосных высокочастотных электромагнитных помех. На них накладываются вторичные тактовые импульсы и апериодические сигналы, которые «ответственны» за появление в спектре помех широкополосной составляющей (см. **Рис. 13.55**). Современные сложные и высокопроизводительные микроконтроллерные системы используют импульсную синхронизацию для управления всеми логическими схемами, т.е. тактовые импульсные сигналы должны одновременно поступать во все точки системы. В процессе одновременного переключения сотен тысяч транзисторов в системе питания микроконтроллера возникают импульсы тока очень большой амплитуды (порядка нескольких ампер). В идеале шина имеет низкий импеданс, чтобы избежать больших падений напряжения на ней, поэтому основной вклад в генерацию ВЧ помех вносит ток, протекающий по цепи питания. В зависимости от того, как организована

синхронизация внутренних логических схем, импульсы тока возникают один или два раза за период тактовой частоты. Они характеризуются очень крутым фронтом и постепенно затухают по мере того, как тактовый сигнал проходит через различные каскады логических схем (Рис. 13.57).

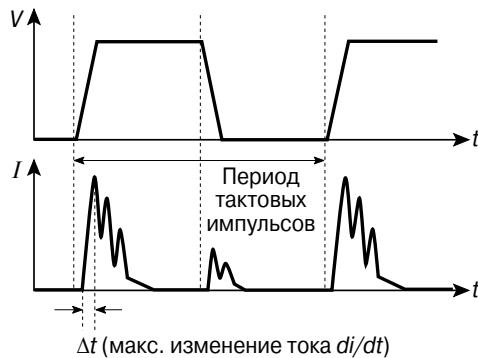


Рис. 13.57. Форма тока и напряжения для тактового сигнала.

Токи переключения логических схем, расположенных на полупроводниковом кристалле микроконтроллера, в нормальном режиме поступают от внешнего источника питания. Однако при этом неизбежно генерируются так называемые шумы одновременного переключения (SSN), вызванные высокой крутизной фронтов импульсов тока (большой величиной di/dt) и наличием паразитных сопротивлений и индуктивностей в цепи питания. Высокочастотная составляющая этих шумов проникает в соседние электронные системы или излучается в окружающее пространство. Поэтому система питания микроконтроллеров включает в себя развязывающие (буферные) конденсаторы, располагающиеся как можно ближе к потребителям тока, т.е. к интегральным схемам. Это означает, что каждый микроконтроллер в идеале дополнен конденсатором, размещённым непосредственно на его выводах питания. Использование данных конденсаторов оказывается полезным с двух точек зрения:

- во-первых, они служат локальными источниками тока в момент переключения импульсов тактовой частоты;
- во-вторых, они в определённой степени ограничивают распространение высокочастотных помех от микроконтроллера в стабилизатор напряжения или аккумуляторные батареи автомобиля.

Схемотехнические методы по предотвращению излучения помех от микроконтроллеров

Чем ближе к источникам электромагнитных помех располагаются элементы, предназначенные для подавления помех, тем выше их эффективность. Улучшение ЕМС-характеристик электронных устройств может быть достигнуто следующими мерами: ограничением крутизны фронтов импульсов при переключении транзисторов и логических схем (элементов), а также размещением дополнительных источников заряда (конденсаторов) в непосредственной близости от переключаемой логической схемы. Уменьшать крутизну фронтов тактовых импульсов можно лишь в тех случаях, когда это не противоречит требованиям к производительности микроконтроллера. Транзисторы и логические элементы при совместной работе не должны формировать импульсы с чересчур крутыми фронтами. В настоящее время во всём мире широко распространение получили методы синтеза схем, когда выбор соответствующих компонентов схемы осуществляется с применением программных инструментов.

Большинство производителей микроконтроллеров интегрируют в микросхемы конденсаторы, предназначенные для ограничения импульсов тока при переключениях. Совместно со своим низкоомным последовательным сопротивлением такой конденсатор образует RC -фильтр нижних частот. Тем самым высокочастотная составляющая тока переключения не только ослабляется внутри микросхемы, но и не пропускается наружу. Использование последовательных индуктивностей было бы более эффективным (поскольку они обладают меньшим последовательным сопротивлением), однако для реализации интегральной индуктивности около 100 нГн требуется слишком большая площадь поверхности полупроводникового кристалла. Систематические исследования процесса работы микроконтроллеров показывают, что их проектирование с учётом реализации подобных RC -структур позволяет значительно уменьшить уровень излучаемых помех. На Рис. 13.58, а, б в графическом виде показаны результаты двух измерений уровня электромагнитных помех, излучаемых 16-битным микроконтроллером. В первом

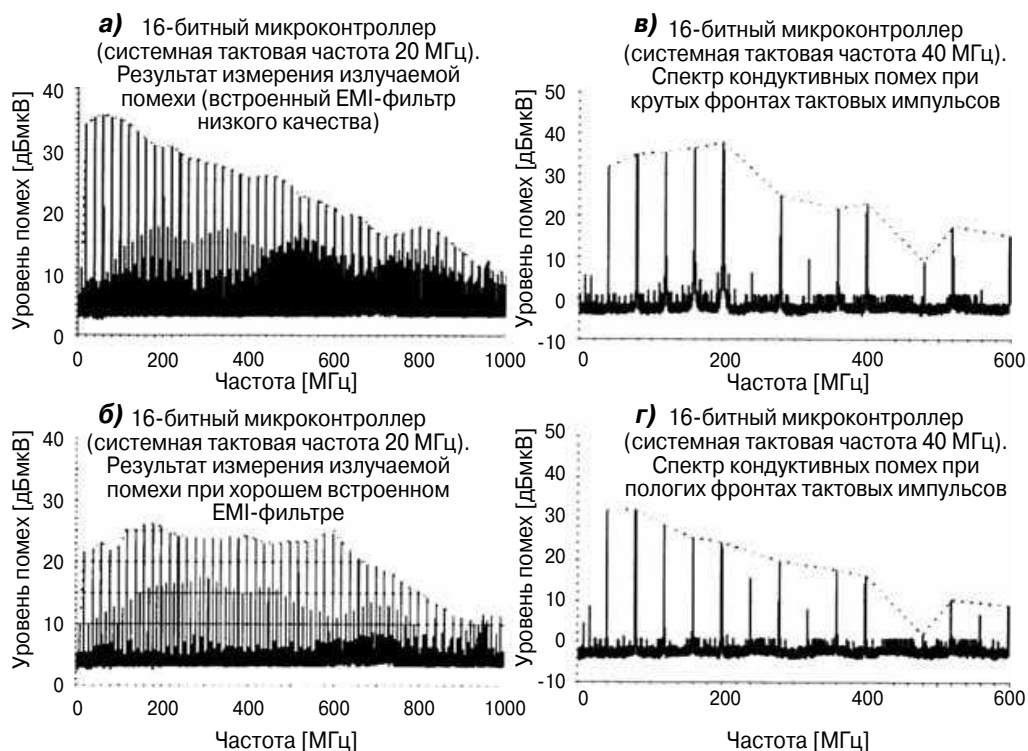


Рис. 13.58. Снижение уровня излучаемых микроконтроллером электромагнитных помех схемотехническими (on-chip) методами. Слева — спектр излучаемых помех при отсутствии (а) и наличии (б) развязывающего конденсатора. Справа — спектр кондуктивных помех на выходе драйвера порта ввода/вывода при крутых (в) и пологих (г) фронтах тактовых сигналов.

случае в микроконтроллере не предусмотрено никаких мер, направленных на улучшение его EMC-характеристик, а во втором случае он спроектирован с применением концепции встроенных развязывающих конденсаторов. Видно, что уровень помех в критическом (используемом для FM вещания) частотном диапазоне 100 МГц удаётся снизить приблизительно на 10 дБ.

Помехи, возникающие при переключении сигналов на выходе драйверов портов ввода/вывода микроконтроллера, также вносят свой вклад в общий уровень помех, генерируемых микроконтроллером. Сигнальные линии на печатной плате, подключённые к выводам портов, представляют собой (также как и рассмотренные выше шины питания) очень эффективные антенны длиной до нескольких сантиметров. С целью минимизации помех, генерируемых выходными каскадами (драйверами) портов ввода/вывода, следует предпринимать определённые схемотехнические меры. Наиболее распространёнными из них являются снижение выходной мощности драйвера или сглаживание фронтов импульсов (контроль скорости нарастания

сигнала). Поскольку параметры выходных транзисторов драйвера обычно выбирают с некоторым запасом (в расчёте на так называемые наихудшие условия работы), как правило, имеется возможность использовать импульсы с менее крутыми фронтами. Особенно это относится к случаям, когда драйвер работает на невысокой тактовой частоте или на малую ёмкостную нагрузку. На **Рис. 13.58, в, г** в спектральном виде показаны результаты измерений кондуктивной помехи, генерируемой 16-битным микроконтроллером на выходе драйвера порта ввода/вывода. В первом случае, фронты тактовых импульсных сигналов имеют большую крутизну, а во втором случае их крутизна снижена. Использование подобного метода позволяет уменьшить уровень помех в диапазоне FM (100 МГц) приблизительно на 6 дБ.

Другой схемотехнический метод улучшения EMC-характеристик микроконтроллерных систем заключается в использовании генераторов частотно-модулированного тактового сигнала, известных под общим названием «генератор с распределённым спектром». Даже при весьма ограниченном

уровне модуляции (0.5...1%) удаётся заметно снизить амплитуду узкополосных помех, представляющих собой гармоники тактовой частоты. В то же время, несколько увеличивается уровень помех в боковой полосе частот. Хотя таким способом не удаётся уменьшить общую энергию излучений, более равномерное её распределение по спектру позволяет ограничить максимальную амплитуду электромагнитной помехи.

Уровень помех, генерируемых микроконтроллером, может быть снижен также путём соответствующих усовершенствований его корпусирования и схемы расположения выводов. В настоящее время широко распространены корпуса ИС на основе так называемой выводной рамки (leadframe, см. **Рис. 13.59, а**). В них сигнальные линии и шины питания, соединяющие полупроводниковый кристалл ИС с её внешними выводами, проведены в виде «паучьих ножек». По такой технологии выполнены корпуса типов DIL, PLCC, M-QFP и T-QFP. Чем больше расстояние между полупроводниковой подложкой кристалла и внешним выводом корпуса, тем выше контактная индуктивность данного соединения. Она состоит из индуктивности выводной рамки и индуктивности проволочного соединения, которое обеспечивает электрический контакт между кристаллом и выводной рамкой. При проектировании схемы расположения выводов микроконтроллера особое внимание следует уделить разводке выводов питания, которые всегда должны быть сгруппированы попарно и располагаться как можно ближе к середине соответствующей стороны корпуса. Такое их расположение позволяет минимизировать индуктивность внутренних соединений и создаёт оптимальные условия для блокирования помех.

В то время как в корпусах с выводной рамкой схема разводки сигнальных линий задаётся заранее и не может затем изменяться, применение корпусов, выполненных по технологии BGA (матрицы шариковых выводов, см. **Рис. 13.59, б**), позволяет оптимизировать критические, с точки зрения ЕМС, сигнальные соединения и линии питания путём разработки соответствующих трафаретов. Здесь выводы выполнены на нижней стороне корпуса в виде маленьких шариков, которые методом точечной пайки припаиваются к контактным площадкам печатной платы. Электрический

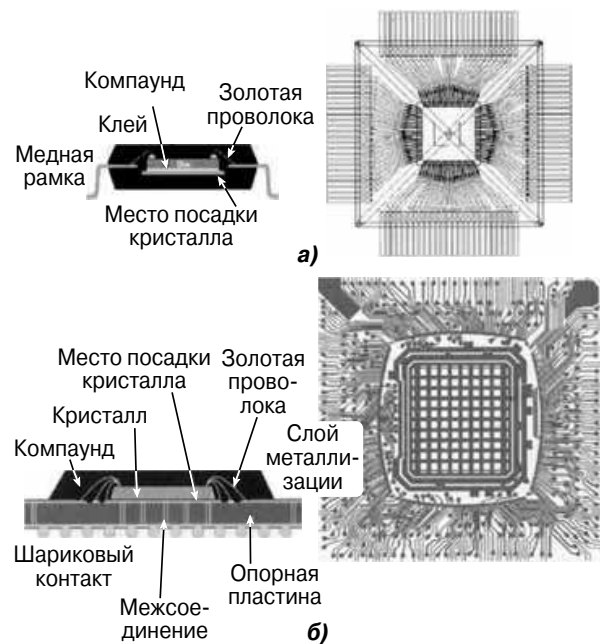


Рис. 13.59. Вид сверху и изображение в поперечном разрезе корпусов с выводной рамкой (а) и типа BGA (б).

контакт между полупроводниковым кристаллом ИС и соответствующими дорожками опорной пластины осуществляется либо проволочными соединениями, либо, в варианте «перевернутого» кристалла, непосредственно через так называемые столбиковые выводы.

Компьютерное моделирование и симуляция характеристик ЕМС

Если при проектировании печатных плат методы компьютерной симуляции их ЕМС-параметров применяются уже довольно давно и широко, то методика моделирования и программной симуляции ЕМС-характеристик микрокомпьютеров пока ещё находится на начальном этапе своего развития. Основная причина этого заключается в большой сложности микроконтроллера — программная симуляция его работы на уровне, например, транзисторов требует обработки невероятно больших массивов данных и занимает много времени. Более реалистичным решением является программная генерация эквивалентных источников тока, которые моделируют «поведение» микроконтроллера в целом или отдельных его модулей при переключении токов.

Для проведения системно-ориентированных компьютерных симуляций

ЕМС-параметров микроконтроллеров разработаны различные стандартные программные модели. Но, например, модель IBIS описывает лишь характеристики портов ввода/вывода. Так называемая модель электромагнитного излучения интегральной схемы (Integrated Circuits Electromagnetic Emission Model — ICEM) определяет эквивалентные источники тока, подключаемые к выводам питания ИС. Хотя уровень помех именно на этих выводах микроконтроллера является определяющим и подлежит оценке в первую очередь, симуляционная модель должна также содержать данные о типе корпуса и разводке печатной платы в непосредственной близости от ИС (например, с учётом так называемой концепции блокировки). На уровне кристалла такая модель должна описывать эквивалентные источники тока, соответствующие функциональным модулям микроконтроллера и включать в себя прецизионную RLC -модель источника напряжения питания (Рис. 13.60).

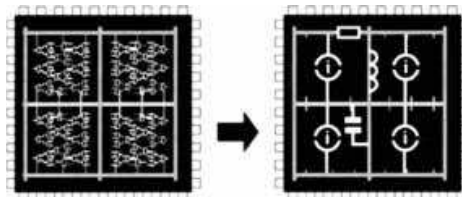


Рис. 13.60. Моделирование сложной ИС с помощью эквивалентных источников тока и выделения RLC -контуров.

Качество компьютерной модели напрямую зависит от того, сколь корректно с её помощью можно вычислять динамические токи переключения и какова точность выделения паразитных RLC -контуров. Если модель используется лишь для качественной оценки ЕМС-характеристик, например, при модернизации устройства, то её количественной точностью можно в определённых пределах пожертвовать.

13.3.4. Помехоустойчивость микроконтроллеров

Вплоть до настоящего времени проблема помехоустойчивости микроконтроллеров не привлекала особого внимания, поскольку напряжения питания 3.3...5 В во много раз превышают уровень внешних электромагнитных помех; при понижении напряжения

питания до 1.5 В и ниже эта проблема приобретает актуальность. Оценка помехоустойчивости микроконтроллеров с помощью соответствующих методов измерения (например, измерение ошибок при передаче сигналов) является чересчур дорогостоящей, поскольку предварительно требуется идентифицировать те элементы схемы, которые под воздействием помех могут работать с ошибками, и написать специализированную (заказную) программу для управления процессом измерений. С тех пор как были разработаны методы тестирования печатных плат, предпринимаются усилия по стандартизации на международном уровне методов измерения помехоустойчивости ИС. Они, главным образом, относятся к излучаемым ВЧ полям и наведённым ВЧ токам. Методы измерения помехоустойчивости, соответствующие нормам IEC 62132, подробно рассмотрены в подразделе 13.1.3.

В настоящее время продолжается работа по созданию установок для испытаний устойчивости ИС к воздействию импульсных помех. Большое значение имеет и устойчивость микроконтроллеров к воздействию электростатического разряда (ESD). В этой связи стоит отметить, что обычно ни один из выводов микроконтроллера (не считая выводов питания) не связан непосредственно с разъёмами, которые предназначены для внешних соединений, поэтому требования к защищённости микроконтроллера от внешних электростатических импульсов не столь высоки, как для других ИС или системы в целом.

Наибольшее воздействие на помехоустойчивость микроконтроллера оказывают помехи, возникающие в цепи питания вследствие протекания в ней больших импульсных токов переключения (так называемые SSN-шумы). Эти помехи вызваны как процессами в самом микроконтроллере, так и влиянием внешних устройств, в особенности мощных полупроводниковых компонентов, и могут значительно ухудшить отношение сигнал/шум.

13.4. Обеспечение ЕМС в проводных системах связи

Термин «проводные системы связи» может быть отнесён к широкому диапазону устройств и технологий. Сюда входят элементы телекоммуникационных сетей, центры

коммутации и маршрутизаторы локальных сетей (LAN), а также абонентские устройства для частного пользования, например телефоны, персональные компьютеры или сетевые оконечные устройства.

Однако требования по обеспечению EMC в области систем связи относятся к системам в целом, а не к отдельным их компонентам. Из этого следует, что испытания на электромагнитную совместимость должны в основном проводиться на уровне внешних интерфейсов:

- сигнальных линий (проверка величины ВЧ напряжений и уровней тока);
- линий питания (проверка величины ВЧ напряжений);
- корпусов (проверка уровней напряжённости электрического и магнитного полей).

Скорости передачи данных в системах связи становятся всё выше и выше. Следовательно, растёт и ширина полосы пропускания аналоговых сигналов, отведённой для предоставления различных услуг. Так, например, в настоящее время службы ADSL или VDSL используют тот же самый диапазон частот, что и проводное радио, которое должно быть защищено соответствующими нормативами EMC. Диапазоны частот, используемые различными службами проводной связи, представлены на **Рис. 13.61**.

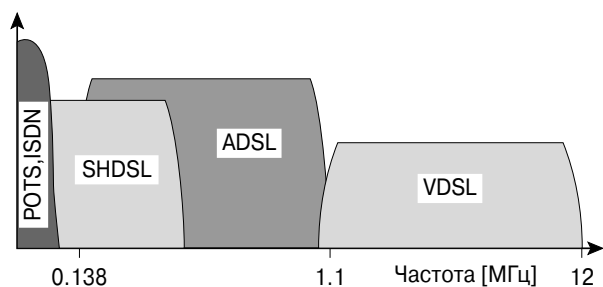


Рис. 13.61. Диапазоны частот, выделенные под различные широкополосные услуги в проводных системах связи.

Удовлетворить требованиям EMC при работе в данном диапазоне частот отнюдь нелегко. Нельзя просто взять и дополнить интерфейс фильтром, поскольку в этом случае пострадает и полезный сигнал, передаваемый по линии связи. На **Рис. 13.62** показан типичный спектр сигнала на линии ADSL. Синфазное напряжение измерялось приёмником электромагнитных помех

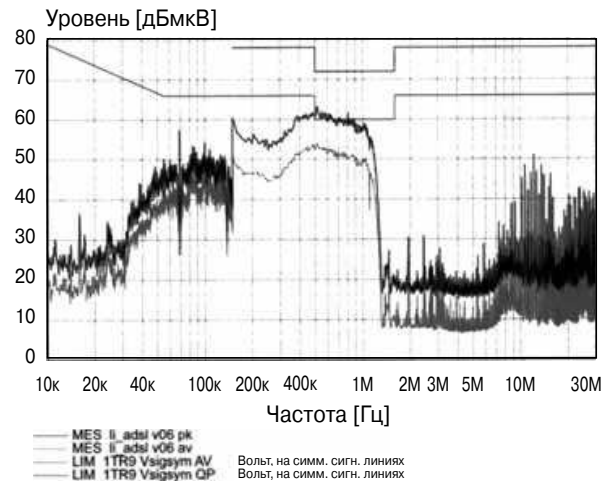


Рис. 13.62. Спектр сигнала на линии ADSL.

(EMI) с помощью стандартного контура связи для телекоммуникационных линий.

Спектр сигнала ADSL простирается от 30 кГц до 1.1 МГц. На рисунке представлены два графика. Первый из них выражает измеренные пиковые значения (Pk), а второй — средние значения (Avg) сигнала. Это соответствует стандарту, который определяет различные предельные значения для каждого типа измерений.

Но вспомним теперь, что протокол DSL является симметричным по отношению к земле, поэтому при измерениях в синфазном режиме сигнал не должен появляться. Причина того, что на графике он всё-таки замечен, заключается в некоторой асимметрии испытательной схемы. В спектре сигнала присутствует также узкополосная помеха, источником которой является преобразователь напряжения на системной плате или импульсы тактовой частоты и их гармоники. Ни в коем случае нельзя допускать, чтобы эти помехи из системной платы проникали в линию ADSL.

Очевидно, что наличие подобной «смеси» полезного сигнала и помехи создаёт определённые трудности при выборе наилучшей стратегии по достижению требуемого уровня EMC. Рано или поздно, но становится ясно, что наилучший путь решения этой проблемы заключается в схемотехническом усовершенствовании самой системы, как на уровне печатной платы, так и на уровне компонентов.

Ниже мы рассмотрим ряд идей, посвящённых организации прохождения сигналов внутри системы.

13.4.1. Системы, компоненты и основные понятия

Телекоммуникационные устройства в основном содержат следующие компоненты:

- источник питания;
- цифровые блоки предварительной обработки данных (Digital Front-End — DFE), например процессор цифровой обработки сигналов (DSP) и микроконтроллер;
- аналоговые блоки предварительной обработки данных (Analog Front-End — AFE), например аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП);
- усилители — усилитель передатчика (линейный драйвер) или усилитель приёмника.

Типичная структурная схема очень простой системы связи приведена на **Рис. 13.63**.

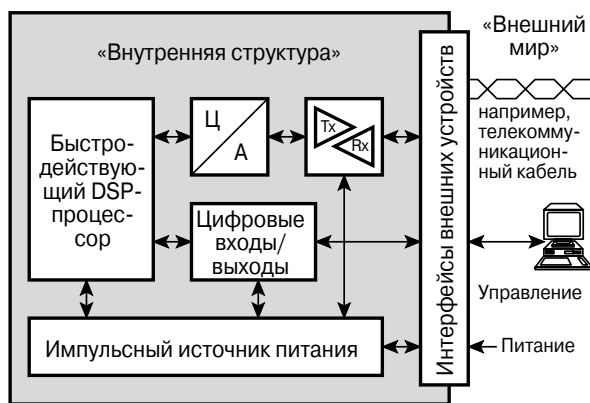


Рис. 13.63. Типичная структурная схема проводной системы связи.

Каждая система связи должна удовлетворять определённым требованиям EMC, причём эти требования необходимо задавать ещё на этапе проектирования системы. Узловыми пунктами здесь являются следующие:

- определение характеристик EMC для новой продукции;
- системное проектирование: разбиение системы на небольшие функциональные блоки (модули) в случае, если расчёт EMC на системном уровне оказывается трудно выполнимым;
- модульное проектирование: прежде, чем приступить к проектированию системы в целом, следует определить EMC-характеристики отдельных модулей с помо-

щью компьютерной симуляции, программной эмуляции или путём тестирования готовых прототипов;

- проверка соответствия EMC-характеристик разрабатываемой продукции установленным нормам для всех возможных областей применения;
- учёт EMC-параметров при контроле качества (QA).

На характеристики EMC оказывают влияние любые изменения, произведённые в модуле, например замена компонентов или соединительных кабелей. Характеристики EMC могут меняться даже в результате исправления ошибок в программном обеспечении;

- распространение продукции (разработанной системы) исключительно на том рынке, для которого она и была предназначена;
- получение отчётов об отказах, связанных с проблемами EMC, и организация обратной связи с пользователями, способствующей процессу усовершенствования продукции, как готовой, так и находящейся в стадии разработки.

13.4.2. Проектирование печатных плат для высокоскоростных систем и меры по обеспечению целостности сигнала

Как видно из **Рис. 13.63**, основную нагрузку по обработке сигналов в системе берёт на себя процессор цифровой обработки сигналов (DSP), длительность цикла тактовой частоты которого обычно составляет 10 нс или менее. Но можно ли говорить о том, что эти 10 нс и есть критерий действительно высокой скорости работы?

Смысл термина «высокоскоростной» зависит от контекста, в котором он употребляется. Однако, коль скоро речь идёт о проектировании печатных плат, данный термин может быть относительно чётко определён с помощью формальных характеристик сигнала. Ниже мы будем использовать следующие обозначения: время нарастания t_r , время затухания t_f , длительность импульса t_p , в течение которого сигнал находится в ВЫСОКОМ логическом состоянии. Частотный спектр такого сигнала можно легко вычислить с помощью преобразования Фурье (см. также подраздел 13.1.1):

$$\lambda = \frac{c \cdot \pi \cdot t_{fr}}{\sqrt{\epsilon_r}},$$

$$f_{\text{highspeed}} = \frac{1}{\pi \cdot t_{fr}},$$

где $t_{fr} = \min(t_r, t_f)$, c — скорость света в вакууме, ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость печатной платы.

Если длина проводящей дорожки печатной платы l_{track} сопоставима с длиной волны сигнала λ (например, превышает величину $\lambda/20$), то можно считать, что сигнал является высокоскоростным. В этой связи необходимо заметить, что спектр цифровых сигналов с высокой крутизной фронтов включает в себя составляющие очень высокой частоты даже при низкой частоте тактового сигнала. Это означает, что импульсный сигнал, характеризующийся временем нарастания 500 пс, следует считать высокоскоростным, если длина соответствующей проводящей дорожки печатной платы превышает 11.75 мм. С одной стороны, это хорошо: достаточно сделать дорожку короче 11.75 мм, и проходящий по ней сигнал перестаёт быть высокоскоростным. Но, к сожалению, есть и обратная сторона медали — при проектировании печатной платы далеко не всегда удаётся «удержать» длину всех дорожек в желаемых пределах. В этом случае особенно важно учитывать требования EMC и обеспечения целостности сигнала.

Что же такое «целостность сигнала»? На сайте компании Signal Consulting Inc. (<http://signalintegrity.com>) можно найти следующее определение этого понятия: «...это область исследований, занимающая промежуточное положение между цифровым проектированием и теорией построения аналоговых схем. Здесь рассматриваются паразитные затухающие колебания («звон»), перекрёстные помехи, нестабильность земли и шумы источника питания. Здесь изучается, как построить действительно быстродействующее цифровое оборудование, которое реально работает. Здесь вырабатываются практические, применимые в реальном мире решения проблем проектирования высокоскоростных систем». Целостность сигнала связана с обеспечением «...максимальной производительности и минимальной стоимости технологий межсоединений, применяемых в высокоскоростных цифровых устройствах».

Таким образом, понятие целостности сигнала относится к небольшой, но важной области EMC, а именно к внутренней структуре проектируемой системы (см. **Рис. 13.63**). В некотором смысле это более абстрактное понятие, чем законы электродинамики. С увеличением быстродействия ИС инженеры вынуждены уделять всё больше внимания проблемам электромагнитной совместимости. Однако разработчики цифровых устройств, как правило, не особенно сведущи в аналоговых или высокочастотных технологиях, и обычно им не требуется обременять себя изучением фундаментальных законов электродинамики.

Для обеспечения целостности сигнала следует уделить особое внимание следующим факторам:

- перекрёстные помехи;
- затухающие колебания («звон»);
- нестабильность земли;
- шумы источника питания.

Ниже в данном разделе подробно описывается, как при разработке обеспечить хорошую целостность сигнала, которая, в свою очередь, является основой для хорошей EMC.

Перекрёстные помехи

Перекрёстная помеха — это электромагнитная взаимосвязь сигнальных проводников, находящихся внутри полупроводниковой схемы, на печатной плате или в многожильном телефонном кабеле.

Перекрёстная помеха в электротехнике рассматривается как нежелательное, но неизбежное явление. С другой стороны, она может «удерживаться» в определённых границах, что позволяет исключить её влияние на производительность системы.

Проводящие дорожки печатной платы или телефонные линии представляют собой так называемые распределённые элементы и их характеристики не могут быть определены с помощью формул, предназначенных для описания элементов с сосредоточенными параметрами (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и трансформаторов). Тем не менее, в электротехнике обычно применяется метод, при котором для представления распределённых элементов используются цепи элементов с сосредоточенными параметрами. Такой подход допустим потому, что проводящая дорожка длиной l_{track} и цепочка из n проводников

длиной по $dz = l_{\text{track}}/n$ всегда могут рассматриваться как идентичные друг другу. Если длина «элементарного» проводника Δz достаточно мала, то, как уже упоминалось выше, проходящий по нему сигнал уже не может рассматриваться как высокоскоростной. Элементарный проводник dz может быть представлен в виде эквивалентных ему элементов с сосредоточенными параметрами (резисторов, конденсаторов, дросселей и трансформаторов).

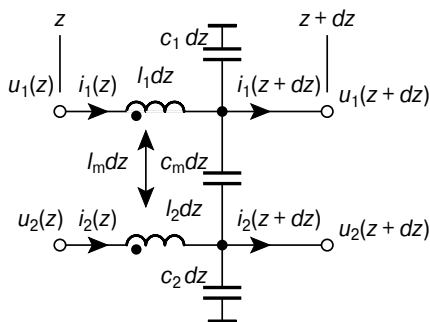


Рис. 13.64. Простая модель перекрёстной помехи с использованием двух проводников без потерь (длина проводника dz).

Подобная модель показана на **Рис. 13.64**, где изображены два так называемых проводника без потерь (loss-free). В качестве модели первого из них используется цепочка c_1-l_1 , а в качестве модели второго — цепочка c_2-l_2 . Для представления перекрёстной связи между проводниками использу-

ются элементы c_m (ёмкостная связь) и l_m (индуктивная связь).

Решение системы частных дифференциальных уравнений для этой модели описывает волну, распространяющуюся в прямом и обратном направлениях:

$$u_i(z, t) = A_i u_i(z + v_i t) + B_i u_i(z - v_i t) \text{ для } i = 1, 2.$$

Данное решение может быть получено методами линейной алгебры, с помощью диагонализующей матрицы. Для того чтобы упростить объяснения, в нижеприведённых схемах типы перекрёстной помехи представлены по отдельности.

Индуктивная перекрёстная помеха

На **Рис. 13.65**, который поясняет эффект прямой и обратной перекрёстной помехи, изображён проводник, «разбитый» на n элементарных ячеек. Каждый из них может быть представлен в виде трансформатора и элемента задержки $\tau = dz/v$. Эта дискретная модель упрощает описание перекрёстной помехи, которая подразделяется на прямую и обратную.

Амплитуда импульса прямой перекрёстной помехи увеличивается с увеличением параметра z , и эти импульсы инвертированы по отношению к проводнику-«агрессору». Допустим, измерения производятся в проводнике-«жертве» в точке $z = 1 \cdot dz$. Результатом измерения, соответствующим моменту времени $t = 1 \cdot \tau$, будет маленький отрицательный импульс. Однако измерение

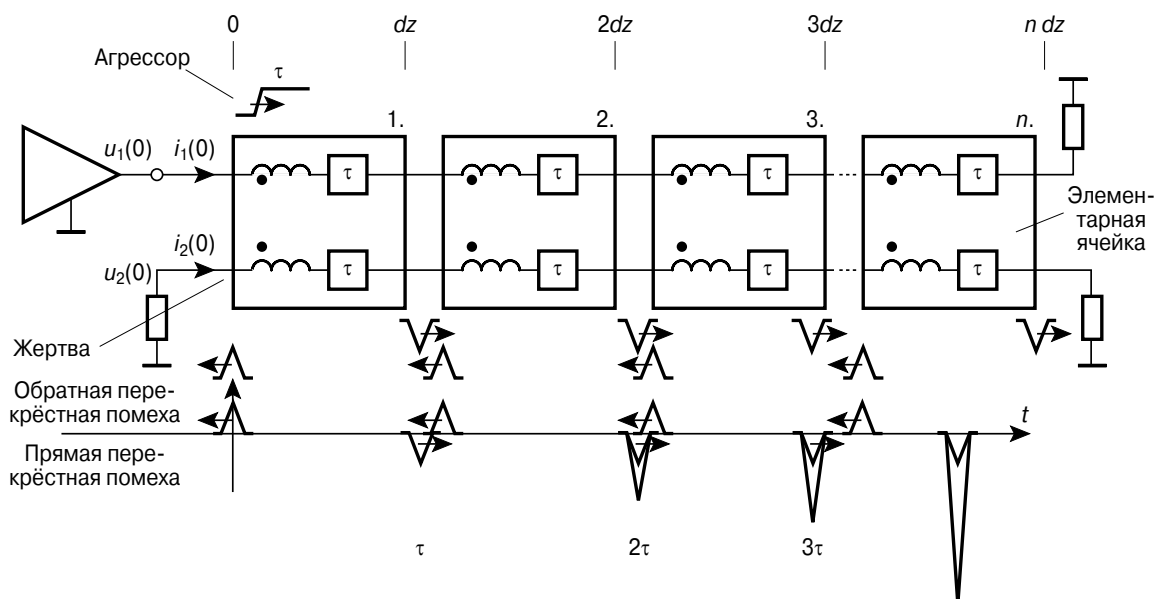


Рис. 13.65. Индуктивная перекрёстная помеха.

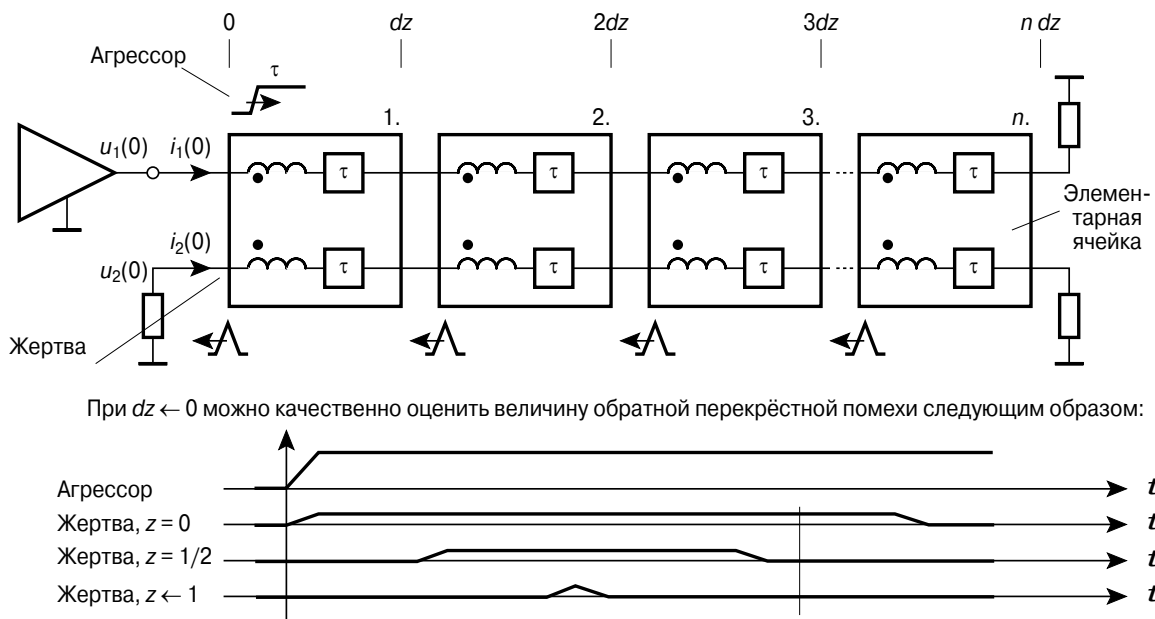


Рис. 13.66. Индуктивная обратная перекрёстная помеха.

в точке $z = 2 \cdot dz$ покажет импульс удвоенной амплитуды, соответствующий моменту времени $t = 2 \cdot \tau$. Это удвоение связано с наложением импульса, преобразованного в «элементарной ячейке №2», и импульса, распространяющегося по проводнику-«жертве» от точки $z = 1 \cdot dz$ до точки $z = n \cdot dz$.

Длительность (ширина) импульса обратной перекрёстной помехи возрастает при уменьшении параметра z , но амплитуда импульса остаётся неизменной, и он не инвертирован по отношению к проводнику-«агрессору». Вновь предположим, что измерения сигнала проводятся в различных точках вдоль проводника. Измерение в точке $z = (n - 1) \cdot dz$ показывает маленький положительный одиночный импульс, появляющийся в момент времени $t = (n - 1) \cdot \tau$ и распространяющийся в обратном направлении по проводнику в сторону точки $z = 0$. В точке $z = (n - 2) \cdot dz$ будут отмечены два импульса: первый — в момент времени $t = (n - 2) \cdot \tau$ и второй — в момент времени $t = n \cdot \tau$. Этот дополнительный импульс представляет собой движущийся в обратном направлении импульс, который возник в точке $z = (n - 1) \cdot dz$ и спустя время задержки τ «прибыл» в точку $z = (n - 2) \cdot dz$. В точке $z = 0$ будут отмечены n импульсов, каждый из которых будет иметь время задержки $2 \cdot \tau$ вследствие задержек как в проводнике-«агрессоре», так и в проводнике-«жертве». При $dz \rightarrow 0$ импульсы становятся неразделимы между собой и сливаются в один длинный импульс с небольшой амплитудой.

На Рис. 13.66 приведены качественные зависимости величины обратной перекрёстной помехи в различных точках проводника (параметр z) от времени t .

Ёмкостная перекрёстная помеха

Модель, приведённая на Рис. 13.67, очень похожа на рассмотренную выше модель для индуктивной перекрёстной помехи, но в данном случае индуктивный трансформатор заменён на ёмкостный (т.е. реализуется ёмкостная связь между проводниками).

Амплитуда импульсов прямой перекрёстной помехи увеличивается с увеличением параметра z , и эти импульсы не инвертированы по отношению к проводнику-«агрессору». Допустим, измерения производятся в проводнике-«жертве» в точке $z = 1 \cdot dz$. Результатом измерения, соответствующим моменту времени $t = 1 \cdot \tau$, будет небольшой положительный импульс. Однако измерение в точке $z = 2 \cdot dz$ покажет импульс удвоенной амплитуды, появляющийся в момент времени $t = 2 \cdot \tau$. Это удвоение связано с наложением импульсов — преобразованного ёмкостным трансформатором «элементарной ячейки №2» и распространяющегося вдоль проводника-«жертвы» от точки $z = 1 \cdot dz$ до точки $z = n \cdot dz$.

Длительность (ширина) импульса обратной перекрёстной помехи возрастает при уменьшении параметра z , но амплитуда импульса (не инвертированного по отноше-

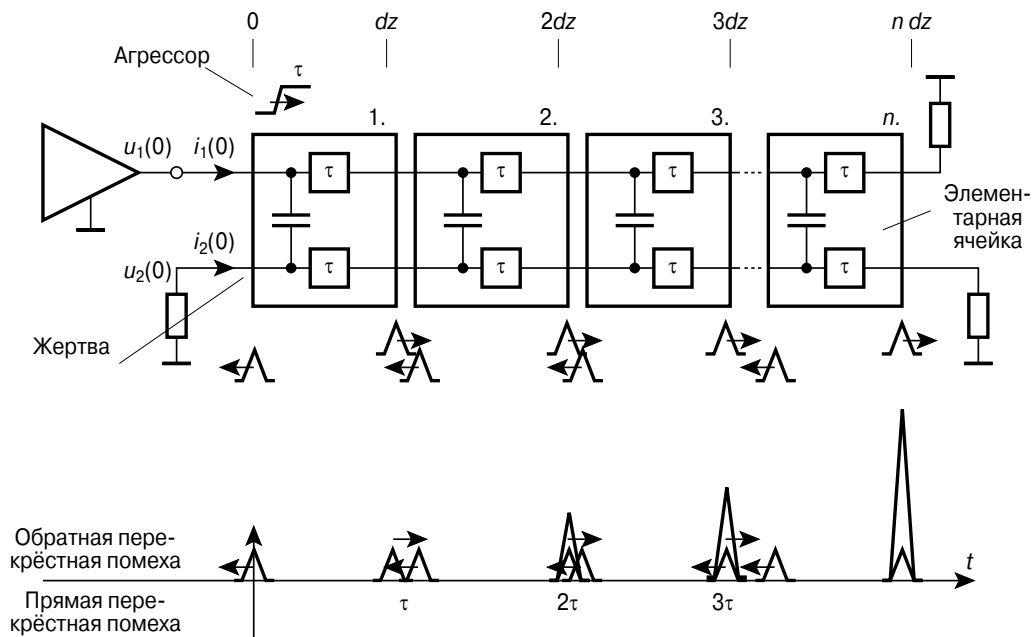


Рис. 13.67. Ёмкостная перекрёстная помеха.

нию к проводнику-«агрессору») не изменяется. Вновь предположим, что измерения сигнала проводятся в различных точках вдоль проводника. Измерение в точке $z = (n - 1) \cdot dz$ показывает небольшой положительный одиночный импульс, возникающий в момент времени $t = (n - 1) \cdot \tau$ и распространяющийся в обратном направлении по проводнику в сторону точки $z = 0$. В точке $z = (n - 2) \cdot dz$ будут отмечены два импульса: первый — в момент времени $t = (n - 2) \cdot \tau$ и второй — в момент времени $t = n \cdot \tau$. Этот дополнительный импульс представляет собой движущийся в обратном направлении импульс, который возник в точке $z = (n - 1) \cdot dz$ и спустя время задержки τ «прибыл» в точку $z = (n - 2) \cdot dz$. В точке $z = 0$ будут отмечены n импульсов, каждый из которых задержан на время $2 \cdot \tau$ вследствие задержек как в проводнике-«агрессоре», так и в проводнике-«жертве». При $dz \rightarrow 0$ импульсы становятся неразделимы между собой и сливаются в один длинный импульс с небольшой амплитудой.

Сочетание индуктивной и ёмкостной перекрёстных помех

Если ёмкостная и индуктивная перекрёстные помехи хорошо сбалансированы, как, например, в случае, когда сигнальные проводники на печатной плате экранированы слоями питания или земли (т.е. выполнены в виде «полных» полосковых линий),

то величина прямой перекрёстной помехи оказывается близкой к нулю. В случае, когда проводящие дорожки внешнего сигнального слоя печатной платы экранированы слоем земли только с одной, нижней стороны (т.е. представляют собой микрополосковые линии), ёмкостная связь оказывается слабее, чем индуктивная, и в проводнике-«жертве» появляется прямая перекрёстная помеха, инвертированная по отношению к проводнику-«агрессору». Причина ослабления ёмкостной связи состоит в том, что большинство силовых линий электрического поля замыкается через воздух, а не через диэлектрик, из которого в основном сделана печатная плата.

Обратная перекрёстная помеха всегда является неинвертированной по отношению к проводнику-«агрессору», и её величина не зависит от того, по какой геометрии выполнены сигнальные проводники печатной платы — в виде микрополосковых (несимметричных) или полосковых линий. Разницу между этими двумя вариантами иллюстрирует Рис. 13.68.

На основании всего вышеизложенного можно сформулировать следующие правила, которыми следует руководствоваться с целью снижения уровня перекрёстных помех:

- Ограничивайте крутизну фронтов импульсов сигналов (т.е. надо увеличивать время нарастания/спада и снижать величину dv/dt).

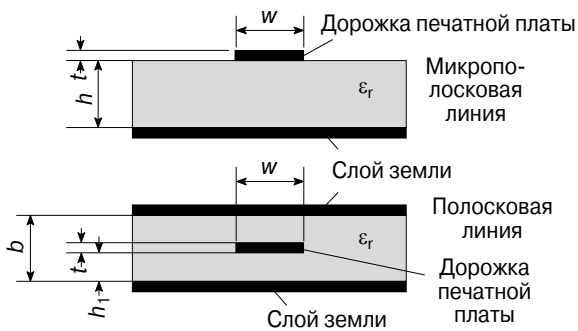


Рис. 13.68. Сравнение конструкций микрополосковой линии и «полной» полосковой линии.

- Производите разводку печатной платы надлежащим образом (особое внимание следует обратить на геометрию проводящих дорожек):
 - используйте дорожки минимально возможной длины;
 - обеспечьте как можно больший зазор между дорожками;
 - не располагайте линии передачи чувствительных к наводкам сигналов параллельно дорожкам, сигналы в которых характеризуются высокой крутизной фронтов;
 - линии передачи дифференциальных сигналов располагайте параллельно друг другу и с как можно меньшим зазором. Это следует делать затем, чтобы на каждый из проводников дифференциальной линии воздействовала одна и та же помеха, что обеспечит их взаимную компенсацию в дифференциальном сигнале.
- Добавляйте слои земли таким образом, чтобы избежать образования земляных островков. Используйте земляные островки лишь в том случае, когда уверены, что дорожки, выделенные под передачу высокоскоростных сигналов, не пересекают земляных островков.
- Земляной островок, расположенный под проводящей дорожкой, по которой передаётся высокоскоростной сигнал, не позволяет возвратному сигнальному току протекать по кратчайшему пути, т.е. величина l_m всё равно увеличивается.
- Внешние сигнальные слои с точки зрения помехозащищённости хуже, чем внутренние:
 - полосковые линии эффективнее микрополосковых;

- при использовании полосковых линий величины c_m и l_m сбалансированы, поэтому прямая перекрёстная помеха очень мала;
- при использовании микрополосковых линий силовые линии электрического поля проходят, главным образом, через воздух, а не через диэлектрик (в отличие от полосковой линии), поэтому ёмкостная связь оказывается меньше, чем индуктивная.

Уровень перекрёстных помех возрастает в тех случаях, когда происходит отражение сигнала на концах проводника. Ниже мы рассмотрим способы уменьшения этих отражений.

Затухающие колебания («звон»)

Так называемый звон, пример которого показан на Рис. 13.69, представляет собой паразитные колебания, которые часто возникают при передаче цифровых высокоскоростных сигналов.

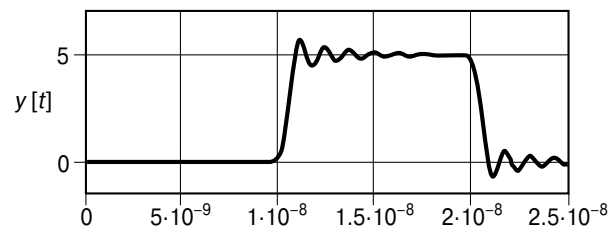


Рис. 13.69. Пример затухающих колебаний («звона»), возникающих при передаче цифрового сигнала.

Причиной данных колебаний является несогласованность импедансов источника и приёмника сигналов. Вследствие этого часть энергии сигнала (или даже вся эта энергия) отражается обратно в линию. Амплитуда «звона» определяется коэффициентом отражения, а частота этих паразитных колебаний зависит от длины проводника l_{track} (Рис. 13.70).

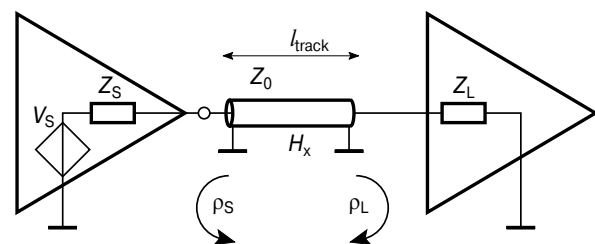


Рис. 13.70. Модель отражения сигналов.

Здесь применимы следующие выражения.

Частота паразитных колебаний рассчитывается по формуле:

$$f_{\text{ring}} = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot l_{\text{track}}},$$

коэффициент отражения со стороны источника сигнала

$$\rho_S = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0},$$

а коэффициент отражения со стороны приёмника сигнала

$$\rho_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}.$$

Поскольку ширина полосы пропускания цифровых высокоскоростных систем передачи должна быть достаточно большой, коэффициент отражения невозможно понизить до нуля. Однако существует ряд других способов уменьшения паразитных колебаний до уровня, удовлетворяющего системным требованиям (**Рис. 13.71**).

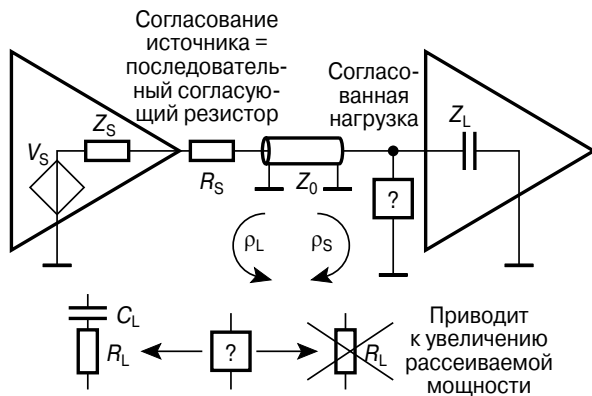


Рис. 13.71. Рекомендуемая схема подключения согласующего резистора при передаче цифровых сигналов.

Расчёт значений соответствующих резисторов и конденсаторов рекомендуется производить по следующим формулам:

$$R_S = |Z_0| - |Z_L| \text{ (обычно } |Z_0| > |Z_L| \text{)};$$

$$R_L = |Z_0|;$$

$$|\rho C_L| \gg |Z_0^{-1}|, \text{ где } \rho = j2\pi \cdot f_{\text{fr}};$$

$$C_L \approx 10 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{fr}} \cdot |Z_0|} = 5 \cdot \frac{t_{\text{fr}}}{|Z_0|},$$

где $t_{\text{fr}} = \min(t_f, t_r)$, т.е. соответствует значе-

нию критической длительности фронта сигнала.

С учётом этих граничных условий снизить уровень «звона» можно, руководствуясь следующими правилами:

- Найдите критический (т.е. наиболее высокоскоростной) сигнал в системе.
- Длина проводящих дорожек печатной платы, предназначенных для передачи высокоскоростных сигналов, должна быть минимальной (короче, чем $\lambda/20$ для граничной частоты, соответствующей наибольшей крутизне фронта импульсов).
- Импедансы проводящих дорожек должны быть согласованы.
- Используйте непрерывные слои земли (а не отдельные земляные «островки»).
- Располагайте последовательный согласующий резистор как можно ближе к источнику сигнала (т.е. к драйверу линии).
- Располагайте нагрузочный согласующий резистор как можно ближе к приёмнику сигнала (к нагрузке).
- Согласующая нагрузка предназначена для согласования импедансов по переменному току, т.е. через неё не должен протекать постоянный ток (в противном случае, это приведёт к повышенным потерям мощности при передаче сигнала).

Перекрестные помехи и паразитные колебания («звон») оказывают непосредственное влияние на передаваемые сигналы. Однако при проектировании систем следует принимать во внимание и другие аспекты ЕМС, например, связанные с организацией надлежащих земляных слоёв или с правильным выбором источника питания системы.

Нестабильность земли

Нестабильность земли — это нежелательное падение напряжения сигнала на проводниках, соединяющихся с землёй. Это явление может возникать как на уровне печатной платы, так и внутри самой микросхемы (**Рис. 13.72**). Как правило, в цифровых высокоскоростных системах соотношение di/dt очень велико, что связано с очень малыми значениями dt (время переключения сигнала из ВЫСОКОГО уровня в НИЗКИЙ, и наоборот). Наиболее критическим фактором здесь является величина паразитной индуктивности проводника, соединяющего микросхему с землёй. Вследствие вы-

сокой скорости переключения сигналов, индуктивная составляющая полного импеданса проводника существенно превышает его резистивную составляющую. Это означает, что амплитуда тока в проводнике не очень велика.

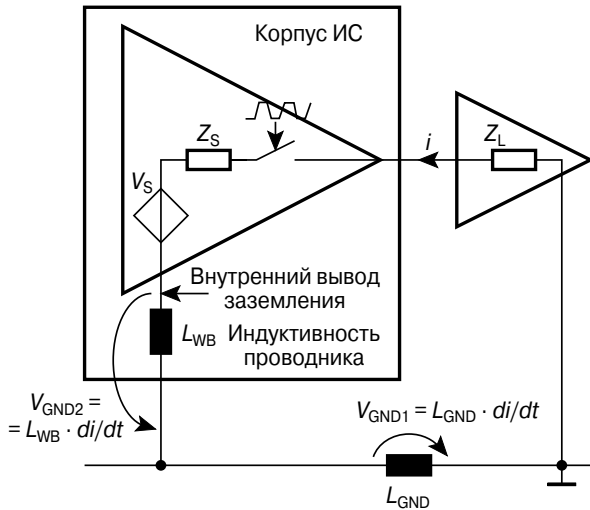


Рис. 13.72. Схема, поясняющая эффект нестабильности земли.

Чтобы уменьшить эффект нестабильности земли, следует соблюдать следующие правила:

- Снижать крутизну фронтов сигнала (т.е. увеличивать время нарастания и спада импульсов).
- В качестве заземляющих применять соединительные проводники низкоиндуктивных типов. Предпочтительно также в качестве земли использовать целый проводящий слой (или слои) печатной платы, а не отдельные области или участки на каком-то одном из слоёв (поскольку возвратный ток стремится протекать по пути с наименьшим импедансом).
- Использовать большое количество дополнительных развязывающих конденсаторов, каждый из которых должен быть размещён в непосредственной близости от соответствующего питающего или земляного вывода ИС.
- Применять способ параллельного соединения нескольких конденсаторов с разными номиналами ёмкости (например, 10 пФ, 1 нФ и 100 нФ), чтобы надёжнее «перекрыть» весь диапазон частот переключения, которые могут быть задействованы в системе. Обратите внимание, что в реальных условиях конденса-

тор с большим номинальным значением ёмкости обладает худшими ёмкостными характеристиками на высоких частотах и может даже вести себя подобно индуктивности.

- Разработчикам ИС рекомендуется реализовывать в них шины считывания для внутреннего обращения; поскольку ток, протекающий по этим линиям, очень мал, их добавление не приведёт к возрастанию эффекта нестабильности земли. По периметру полупроводникового кристалла ИС следует расположить многочисленные внутренние выводы заземления.

Шумы источника питания

Помехи от источника питания системы могут возникать по нескольким причинам: вследствие процессов переключения токов в различных её компонентах или как результат проникновения в цепь питания шумов DC/DC-преобразователя, работающего в ключевом режиме. В процессе работы DC/DC-преобразователей всегда генерируются импульсы большой амплитуды и с высокой скоростью нарастания (di/dt). Основная проблема состоит в том, что шумы, распространяющиеся по цепи питания, ухудшают эффективность работы аналоговых схем (например, АЦП, ЦАП или операционных усилителей), поскольку значение коэффициента ослабления помех источника питания (PSRR) этих схем не может быть бесконечно большим. Следовательно, шум, проникающий через цепь источника питания, вызывает появление шумов на аналоговых выходах ИС; степень ослабления этих шумов зависит от значения PSRR.

Шумы подобного типа могут быть уменьшены за счёт применения следующих мер:

- Использовать для шин питания проводящие дорожки с низким импедансом (например, проводящие дорожки можно сделать пошире или, ещё лучше, использовать земляной слой). Это позволит минимизировать падение напряжения в шине питания.
- Использовать для снижения помех в шинах питания ферритовые бусины или резисторы. Выбирайте их параметры ($I_{\max}$, f_{20dB} , R_{DC} и т.д.) в соответствии с заданным рабочим диапазоном. Конечно, следует применять и локальные накопители

энергии (конденсаторы), которые должны размещаться как можно ближе к компонентам, потребляющим большой ток.

- Размещать развязывающие конденсаторы в непосредственной близости от выводов питания и земли ИС:
 - следует принимать во внимание тот факт, что реальные конденсаторы содержат паразитные элементы, такие как эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) и эквивалентная последовательная индуктивность (ESL). Эти элементы сильно влияют на эффективность работы развязывающего конденсатора.
- Тщательно выбирать параметры источника питания, т.е. выбирать такую рабочую частоту DC/DC-преобразователя, чтобы:
 - удовлетворить требованиям к производительности и уровню шума ИС (отметим, что коэффициент PSRR уменьшается с увеличением рабочей частоты), или
 - выбранная рабочая частота DC/DC-преобразователя лежала вне частотного диапазона, используемого системой для передачи данных, или
 - использовать, если это возможно, линейный источник питания.

Многие из рекомендаций по оптимальному, с точки зрения EMC и обеспечения целостности сигнала, проектированию печатных плат вполне применимы и при разработке ИС на уровне кристалла. Они относятся не только к «чисто полупроводниковой» схемотехнике, но и учитывают прикладные аспекты (например, как правильно назначить выводы ИС, выбрать параметры синхронизации, и т.п.). Разработка микросхем, удовлетворяющих требованиям по функциональности и EMC, — недостаточное условие для разработки целых систем, удовлетворяющих этим требованиям. Решение подобной задачи предполагает тесное сотрудничество между разработчиками ИС, системными разработчиками и пользователями. С учётом всего вышеизложенного, можно предложить следующие рекомендации по разработке систем:

- Делайте проводящие дорожки на печатной плате как можно короче (в первую очередь, это относится к высокоскоростным сигналам).

- Используйте отдельные слои многослойной печатной платы для разводки шин питания и земли; следует избегать появления на этих слоях изолированных областей.
- Для разводки шин питания и земли используйте соседние слои, поскольку вместе они образуют распределённый конденсатор.
- Располагайте развязывающие конденсаторы в непосредственной близости от выводов питания/земли ИС.
- Сверьтесь со справочными данными развязывающих конденсаторов. Их паразитные параметры (ESR, ESL, резонансная частота) должны быть учтены при проектировании высокоскоростных систем.
- В целях минимизации отражений сигнала соответствующие импедансы необходимо согласовывать.
- Используйте надлежащим образом подобранные резисторы для согласования нагрузки высокоскоростных сигнальных линий (проводящих дорожек печатной платы).
- Убедитесь, что путь протекания возвратного тока для каждого из сигналов минимален. Уровень возвратного ВЧ тока намного ниже, чем уровень тока в сигнальной линии (контур с наименьшим импедансом обладает наименьшей индуктивностью на высоких частотах).
- Длина контуров, в которых протекают импульсные токи с высокой скоростью нарастания (di/dt), должна быть как можно меньшей. Так можно снизить уровень перекрёстных помех, а также электромагнитных излучений и других помех, связанных с EMC.
- При проектировании печатной платы располагайте дорожки высокоскоростных цифровых сигналов в отдалении от дорожек, по которым проходят сигналы чувствительных аналоговых устройств.
- Параллельное расположение дорожек печатной платы может иметь как положительный, так и отрицательный эффект:
 - избегайте параллельного расположения дорожек, если необходимо получить минимальный уровень перекрёстных помех;
 - для передачи дифференциальных сигналов, наоборот, следует использовать

параллельные и как можно более близко расположенные дорожки.

- Увеличивайте промежуток между теми дорожками, взаимное влияние сигналов в которых нежелательно.
- Разводку дорожек для наиболее высокоскоростных сигналов следует проводить на внутренних слоях многослойной печатной платы.
- Работу по проектированию системы следует проводить в тесной кооперации между инженерами-разработчиками ИС, системными разработчиками и разработчиками печатных плат.

13.5. Защита компонентов от электростатических разрядов

Электростатический разряд (ESD) может стать причиной серьёзных повреждений полупроводниковых устройств. Поэтому в настоящее время большинство полупроводниковых компонентов (ИС) разрабатываются с учётом требований по их защищённости от ESD (**Рис. 13.73**). Встроенные в кристалл схемы защиты обеспечивают путь, при протекании по которому ток, возникающий в результате воздействия на ИС электростатического разряда, не повреждает саму ИС. Дополнительной функцией этих защитных структур является ограничение токов и напряжений, которые воздействуют на чувствительные схемы внутри самой ИС.

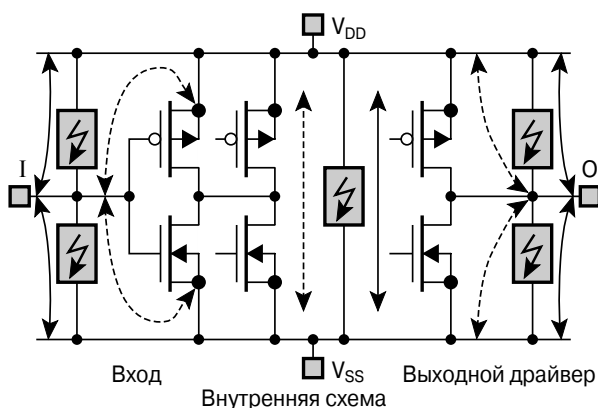


Рис. 13.73. Типичный пример организации встроенной защиты от ESD.

Однако защитные схемы рассматриваемого типа могут оказывать отрицательное влияние на функциональные характеристики защищаемого устройства. Это, главным

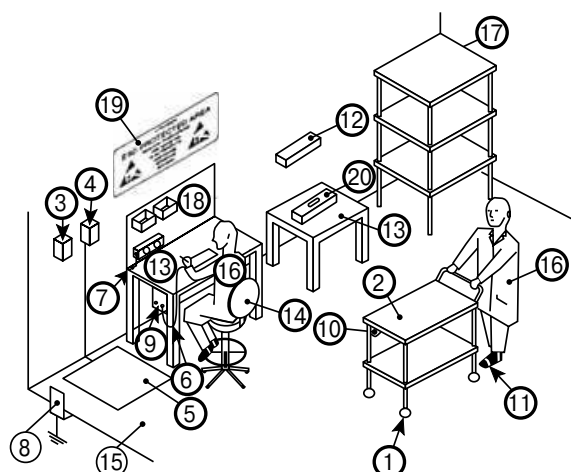
образом, усложняет реализацию таких требований к ИС, как минимальный ток утечки, малый размер кристалла ИС или высокая рабочая частота, на которой проявляется деструктивный эффект паразитных элементов схем защиты от ESD. По этой причине при проектировании встроенных в кристалл схем защиты от ESD приходится идти на определённый компромисс между производительностью устройств и их устойчивостью к воздействию ESD. Следовательно, встроенная защита полупроводниковых устройств от электростатических разрядов оказывается недостаточно эффективной в случае небрежного обращения с ними.

Необходимо также предусмотреть меры по снижению воздействия электростатических разрядов на ИС в процессе их производства и подготовки к работе. Для этого используются специальные меры и защитные материалы. Указанные меры должны удовлетворять следующим требованиям:

- Предотвращать возможность «перетекания» большого электрического заряда на объекты, соприкасающиеся с защищаемым устройством.
- Ограничивать, за счёт создания большого электрического сопротивления, протекание неконтролируемых разрядных токов, возникающих при контакте с выводами заряженного устройства.

По этой причине производство и испытания ИС, чувствительных к воздействию электростатических разрядов, обычно осуществляется в так называемых антистатических помещениях (ESD-защищённых зонах, см. **Рис. 13.74**), где всё оборудование выполнено из антистатических материалов. Поэтому в таком антистатическом помещении риск повреждения устройства при воздействии на него ESD оказывается минимальным. Если необходимо использовать ESD-чувствительные устройства или компоненты вне антистатического помещения, то для снижения риска их повреждения при транспортировке следует применять специальную защитную упаковку.

Для оптимального выбора материалов и оборудования для антистатических помещений, а также соответствующих упаковочных материалов следует руководствоваться стандартами EN 61340-5-1 (или соответствующим ему стандартом IEC 61340-5-1) и ANSI ESD S20.20. Они не только определя-



- 1 — Заземлённые роликовые колёса
- 2 — Заземлённая поверхность
- 3 — Тестер антистатического браслета
- 4 — Тестер антистатической обуви
- 5 — Площадка тестера антистатической обуви
- 6 — Заземление антистатического браслета
- 7 — Кабельные розетки с заземлением
- 8 — Земля
- 9 — Точка подключения заземления
- 10 — Точка заземления передвижной тележки
- 11 — Ножной заземлённый антистатический браслет
- 12 — Ионизатор воздуха
- 13 — Рабочая поверхность
- 14 — Заземлённое кресло
- 15 — Пол
- 16 — Одежда
- 17 — Стойка с заземлёнными полками
- 18 — Заземлённые контейнеры
- 19 — Плакат «Помещение с ESD-защитой»
- 20 — Прибор

Рис. 13.74. Пример идеального помещения с ESD-защитой, удовлетворяющего стандарту IEC 61340-5-1.

ют требования к методам защиты от ESD, но и являются основой для разработки таких методов.

13.5.1. Меры по защите ИС при контакте с электрически заряженными объектами

Наибольшую опасность для электронных устройств представляют внешние объекты, которые обладают электрическим зарядом (например, полученным в процессе их производства) и могут разряжаться через электронные устройства или их печатные платы. Первым в списке подобных «объектов» следует назвать человека. Для того чтобы предотвратить возникновение неконтролируемых электростатических разрядов при контакте персонала с электронными

устройствами, каждый работник должен носить на руке антистатический заземлённый браслет либо иметь проводящую обувь, обеспечивающую электрический контакт с заземлённым полом. Как показывают соответствующие исследования, при обеспечении надлежащего заземления электростатический потенциал человеческого тела не превышает 100 В, что не создаёт опасности повреждения электронных устройств.

Существует также риск возникновения ESD при контактах ИС с производственным оборудованием. Незаземлённые узлы машин и оборудования могут в процессе работы приобрести электрический заряд, что приведёт к возникновению электростатического разряда через электронный компонент или модуль. Поэтому необходимо регулярно проверять качество заземления всех (особенно, движущихся) частей машин.

13.5.2. Защитные меры по предотвращению электростатического заряда ИС в процессе их производства

Помимо контактов с объектами, рассмотренными выше, опасность представляет случай, когда заряженные ИС или печатные платы разряжаются через внешние объекты с очень высокой электропроводностью. Защитные меры против ESD подобного типа могут состоять в том, чтобы снизить электростатический заряд этих устройств или исключить возможность любых разрядов. Поэтому всё оборудование производственного помещения, такое как рабочие столы, стулья, стойки и т.п., должно быть выполнено из ESD-защищённых материалов и заземлено. В процессе производства ИС, в результате явления электростатической индукции, заряд может наводиться с одних устройств на другие, соседние устройства или печатные платы. Если по тем или иным причинам использование ESD-защищённых материалов недопустимо, то следует либо нейтрализовать этот заряд с помощью ионизаторов воздуха, либо исключить любую возможность контактного разряда. Таким образом, решение проблемы защиты от ESD невозможно без детального анализа всех этапов конкретного технологического процесса.

14. КОРПУСА ИС

При разработке систем всё большее значение приобретают технологии корпусирования ИС и организации межсоединений.

14.1. Разработка корпусов ИС: от физики — к инновациям

Триумф систем мобильной связи стандарта GSM во всём мире был воспринят как успех совместных усилий европейских производителей в области разработки систем. Однако создание систем, подобных GSM, стало возможным, прежде всего, вследствие выдающихся достижений в микроэлектронике.

Помимо развития телекоммуникационных технологий, процесс создания подобных систем включает в себя проведение фундаментальных физических исследований в области материаловедения и полупроводниковых технологий, проектирование интегральных схем (ИС) и разработку корпусов для них. Приведённая на **Рис. 14.1** диаграмма иллюстрирует основные направления развития инновационных техноло-

гий, связанных с внедрением результатов фундаментальных исследований в разработку систем и их приложений. Проектирование и технология изготовления корпусов ИС приобретают здесь тем большее значение, чем теснее оказываются связаны между собой звенья в «цепи инноваций». В этой связи необходимо заметить, что в настоящее время в качестве разработчиков и исследователей весьма востребованы разносторонние специалисты, обладающие обширными знаниями в области физики, материаловедения, полупроводниковых технологий и технологий корпусирования ИС, системного проектирования (от физики транзисторов до систем связи). В то же время, однако, требуются и «узкие» специалисты в тех или иных технических областях.

Корпус ИС, который содержит два интерфейса — кристалл/корпус (межсоединения 1-го уровня) и корпус/печатная плата (межсоединения 2-го уровня), — является одним из основных факторов, ограничивающих производительность полупроводни-



Рис. 14.1. «Цепь инноваций» от фундаментальных физических исследований к их практическим приложениям.



Рис. 14.2. Разработка корпуса ИС и совершенствование технологии межсоединений — «мост» между полупроводниковым чипом и прикладной схемой.

ковых микросхем и, следовательно, систем в целом (это ограничение проявляется в таких приложениях, где от ИС требуется работа на высоких частотах или при большой рассеиваемой мощности). С одной стороны, технологические нормы при изготовлении кристаллов становятся всё меньше в соответствии с законом Мура (т.е. с развитием полупроводниковых технологий количество транзисторов на единицу площади кристалла удваивается каждые 18 месяцев); с другой стороны, габариты электронных устройств определяются удобством для пользователя, и потому практически не меняются (**Рис. 14.2**). Таким образом, разница в размерах между полупроводниковыми кристаллами и готовыми устройствами постоянно увеличивается. Соответственно, повышаются и требования к технологиям производства корпусов ИС и организации межсоединений, которые представляют собой своего рода «мост», связывающий между собой интерфейсы на уровне чипа и на уровне пользователя. Из всего этого следует, что наибольшими возможностями на рынке электронных компонентов обладают ИС, разработанные на базе новейших полупроводниковых технологий и выполненные с использованием передовых технологий корпусирования.

14.2. Обзор корпусов полупроводниковых ИС

В технологии корпусирования различают межсоединения 1-го уровня (интерфейс кристалл/корпус) и 2-го уровня (интер-

фейс корпус/печатная плата). При организации межсоединений 1-го уровня до сих пор наибольшей популярностью пользуются проволочные соединения (**Рис. 14.3, а**). Однако с увеличением рабочей частоты и количества соединений внутри ИС, всё чаще используется технология «перевернутого кристалла» (flip-chip, см. **Рис. 14.3, б**).

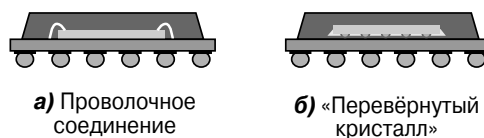


Рис. 14.3. Полупроводниковый кристалл в современном корпусе типа BGA (матрица шариковых выводов). Крепление кристалла: а — с помощью проволочных соединений; б — методом «перевернутого кристалла».

Интерфейсы корпус/печатная плата (межсоединения 2-го уровня) могут быть выполнены по одной из четырёх основных технологий. На **Рис. 14.4** показаны примеры этих интерфейсов и указаны типичные значения шага выводов ИС (стандартного расстояния между центральными осями выводов). Здесь следует различать корпуса для поверхностного монтажа (SMD, или технология поверхностного монтажа — SMT) и корпуса для монтажа в сквозные отверстия на печатной плате (THD/ТНТ). В настоящее время предпочтение отдаётся использованию компонентов в корпусах для поверхностного монтажа (SMD).

Ассортимент выпускаемых ИС становится всё разнообразнее, что вызвано быстрой

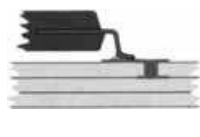
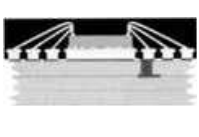
Монтаж в сквозные	SMD, выводы «крыло чайки»	SMD, шариковые выводы	SMD, безвыводной
DIP, TO220	SO и QFP	BGA	VQFN, TSLP
			
Шаг: 2.54 мм	DSO-шаг: 1.27 мм SSOP-шаг: 0.65...0.5 мм QFP-шаг: 0.8...0.65...0.5...0.4 мм	Шаг: 1.5...1.27...1.0 мм CSP BGA-шаг: 1.0...0.75...0.5 мм	Шаг: 0.8, 0.65, 0.5 мм

Рис. 14.4. Обзор технологий межсоединений корпус/печатная плата.

сменой используемых технологий и внедрением технологических новинок наряду со снижением срока службы ИС. Поэтому при их производстве существует настоятельная необходимость сконцентрировать усилия на разработке стратегически важных семейств корпусов и технологий межсоединений.

В компании Infineon Technologies AG хорошо понимают, сколь большое значение имеют технология корпусирования и пользовательский интерфейс ИС. Поэтому при их разработке основные усилия по-прежнему сфокусированы на постепенном расширении возможностей стандартных семейств корпусов. При этом, как видно из Рис. 14.5...14.6, доля корпусов, предназначенных для монтажа в сквозные отверстия (технология ТНТ) продолжает снижаться. Однако Infineon также уделяет большое внимание разработке инновационных решений в области корпусирования и технологии межсоединений, что даёт ей возможность «держать руку на пульсе» современных тенденций развития рынка ИС. Примерами таких решений являются так называемые безвыводные корпуса TSLP, технология корпусирования на уровне пластины WLP (Wafer Level Packaging) или технология «система-в-корпусе» (System-in-Package — SiP).

Ныне, даже в большей степени, чем когда-либо раньше, от производителей полупроводниковых компонентов и их потребителей, как и от конечных пользователей, требуется координация усилий с тем, чтобы определить наилучший путь развития технологии корпусирования. Это, в свою очередь, позволит выработать наиболее эффективные с экономической точки зрения и, следовательно, наиболее конкурентоспособные системные решения.

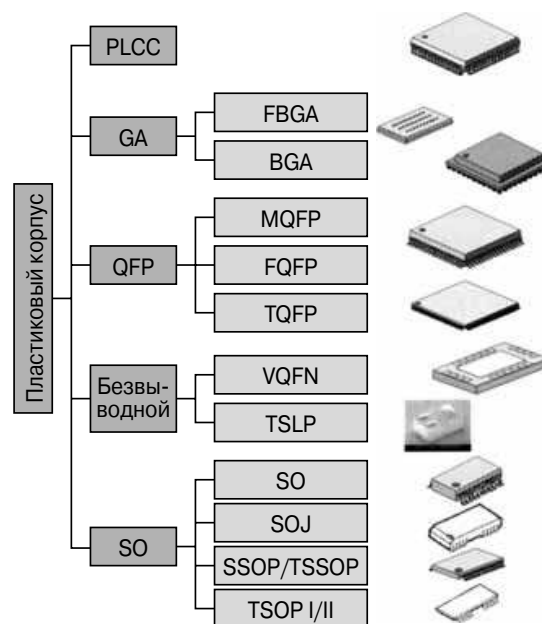


Рис. 14.5. Семейство корпусов для поверхностного монтажа.

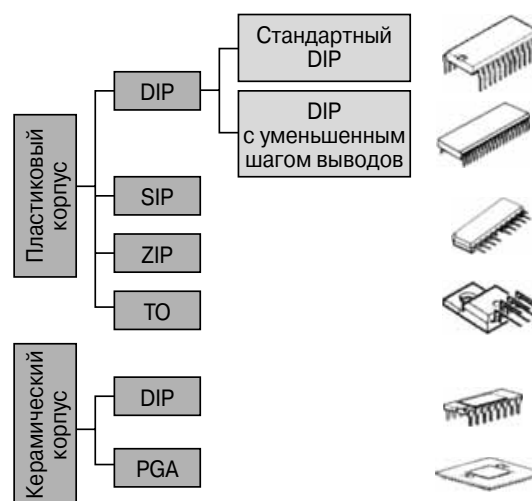


Рис. 14.6. Семейство корпусов для монтажа в сквозные отверстия на печатной плате.

Что касается бытовой и промышленной электроники, то требования к бытовым электронным устройствам всё отчётливее сводятся к следующим: малые габариты, малый вес, низкая стоимость в сочетании с высоким уровнем производительности. Это означает, что корпуса ИС становятся одним из наиболее критических факторов в разработке новых электронных устройств (Рис. 14.7), и перспективные технологии их производства, например технология корпусирования WLP, активно обсуждаются.

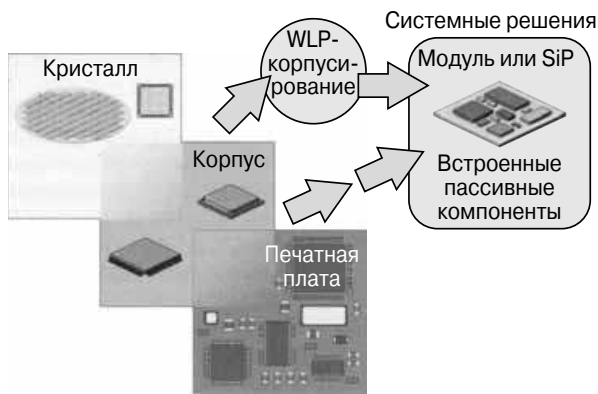


Рис. 14.7. Тенденции развития технологий от производства кристаллов к системным решениям.

14.3. Движущие силы процесса разработки новых технологий корпусирования ИС

На Рис. 14.8 приведены основные требования, которые современные потребители предъявляют к электронной продукции. Прежде всего, они заинтересованы в приборах, работающих на высоких частотах, с большими скоростями передачи данных и имеющих хорошие тепловые характеристики. С одной стороны, это означает, что ИС

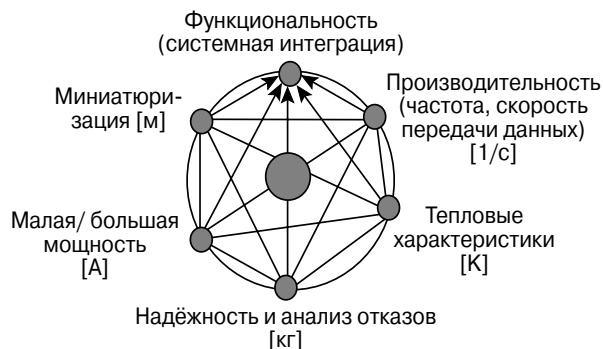


Рис. 14.8. Движущие силы процесса развития технологий корпусирования.

может обеспечить адекватный уровень рассеяния тепла при повышении рабочей частоты и использовании чипов большой мощности. С другой стороны, это означает способность надёжно работать в экстремальных условиях окружающей среды, например в непосредственной близости от двигателя автомобиля (при использовании ИС в автомобильной электронике). В зависимости от области применения ИС, от них могут потребоваться либо малое энергопотребление (в мобильных устройствах с питанием от аккумулятора), либо максимально высокая производительность (например, если речь идёт о различных электронных коммутаторах). Почти во всех перечисленных случаях применения ИС дополнительным требованием к ним со стороны пользователей являются минимально возможные габариты (с учётом соблюдения необходимой надёжности). В будущем наверняка сохранится тенденция к увеличению степени функциональной и системной интеграции полупроводниковых микросхем. Всё большее количество различных функций, которые ранее реализовывались на уровне системной платы, будут интегрированы непосредственно в корпус и чип ИС (см. также Рис. 14.14).

Под влиянием устойчивой тенденции к дальнейшей миниатюризации ИС и повышению их рабочих частот в процесс разработки корпусов ИС «вовлекаются» всё новые и новые физические эффекты. Пользовательские требования к характеристикам корпусов могут быть выражены в базовых единицах измерения физических величин. Так, частота обратно пропорциональна времени, базовой единицей измерения которого является секунда (с), тепловые характеристики ИС выражаются в кельвинах (K), при оценке уровня миниатюризации корпуса в качестве единицы измерения используют метры (м), мощность, измеряемую в джоулях, можно путём соответствующего пересчёта оценивать в единицах тока — амперах (А). Наконец, измерение характеристик надёжности, которые обычно связаны с оценкой воздействия на ИС различных сил и давлений, производится с использованием таких базовых физических единиц измерения, как килограмм (кг) и ньютон ($[Н] = [кг] \cdot [м] / [с]^2$). Конечно, все пожелания пользователей должны быть выполнены с минимальными затратами и в наиболее короткие сроки.

Более всего новые технологии корпусирования ИС востребованы в таких основных секторах рынка электронных компонентов, как производство микросхем памяти, микропроцессоров и их периферийных устройств, ИС для систем связи, а также специализированных микросхем (ASIC). Например, технология производства сверхтонких корпусов первоначально была разработана для корпусирования модулей памяти, в первую очередь, DRAM, и лишь затем стала применяться и для других ИС.

14.4. Состояние дел на мировом рынке корпусов ИС

14.4.1. Стандартизация

Процесс стандартизации играет важную роль в развитии технологий производства корпусов ИС. Он осуществляется в тесном сотрудничестве между ведущими национальными ассоциациями заинтересованных производителей электроники, которые путём взаимных компромиссов выработали определённые стандарты корпусов ИС, соответствующие основным тенденциям в области стандартизации. В число этих организаций входят американская JEDEC (Joint Electronic Device Engineering Council — Объединённый технический совет по электронным устройствам), японская JEITA (Japan Electronics and Information Technology industries Association — Японская ассоциация производителей электроники и информационных технологий) и международная IEC (International Electrotechnical Commission — Международная электротехническая комиссия). С точки зрения технологичности проектирования печатных плат, например при размещении ИС на печатной плате, особенно важно стандартизировать геометрические размеры корпусов. В первую очередь, речь идёт об использовании метрической системы мер, что позволяет точно задавать шаг выводов, уменьшать их длину, снижать высоту просвета при установке ИС на печатную плату и определять геометрические размеры корпуса.

14.4.2. Мировые тенденции: корпуса микросхем памяти

С соответствием с генеральной тенденцией развития технологий производства ИС, при разработке корпусов для микросхем па-

мяти (DRAM) первоочередное внимание уделяется уменьшению их габаритов (толщины корпуса и высоты ИС при установке на печатную плату) и массы. В настоящее время наиболее передовые образцы микросхем памяти имеют сверхтонкий корпус, высота которого при установке на печатную плату не превышает 1 мм; ведутся работы по созданию корпусов толщиной 0.7...0.8 мм. Тем не менее, для современных микросхем DRAM объёмом памяти до 256 Мбит общепринятым до сих пор является корпус P-TSOP (здесь символ P означает «пластиковый»). Исходя из тенденций развития ИС памяти, можно предполагать, что в будущем, в особенности из-за повышения тактовой частоты и соответствующего усиления влияния паразитных эффектов, при производстве микросхем памяти объёмом 256 Мбит и DRAM нового поколения объёмом 512 Мбит и 1 Гбит заметно возрастёт процент использования корпусов типа CSP (Chip Size Package — корпус размером с кристалл), а также многоярусных (stacked) «трёхмерных» интегральных сборок, т.е. нескольких кристаллов, собранных в одном корпусе (Рис. 14.9). Кроме того, во всём мире широко обсуждается возможность использования корпусов типа WLP.



Рис. 14.9. Тенденции развития корпусов для микросхем памяти DRAM.

14.4.3. Мировые тенденции: корпуса ИС

Проявившаяся уже в настоящее время тенденция к увеличению количества выводов корпусов ИС продолжится и в будущем. Это связано с дальнейшим совершенствованием специализированных микросхем ASIC, вентиляльных матриц, микропроцессоров и микроконтроллеров. По всем прогнозам, наибольшее развитие получают корпуса типа P-BGA, максимальное количество выводов которых в ближайшие годы будет только возрастать. Уже сегодня корпус BGA с количеством выводов 1000 и более не воспринимается как нечто экстраординарное.

Совершенствование полупроводниковой схемотехники играет ключевую роль на рынке ИС (Рис. 14.10) и обуславливает необходимость постоянной модификации отдельных семейств корпусов ИС в плане увеличения количества выводов, уменьшения шага между выводами и толщины корпусов.

Как для монтажа в отверстия (THT), так и для поверхностного монтажа (SMD), главным образом используются пластиковые корпуса. Наиболее распространёнными из них являются P-SO, P-LCC, P-QFP, SOD и SOT. Из керамических корпусов популяр-

ны C-LCC, C-Flat Pack и C-PGA. В соответствии с прогнозами компаний, занимающихся исследованиями рынка, в ближайшие годы наибольшее развитие получают технологии производства SMD-корпусов. Уже в 2002 году доля корпусов, предназначенных для поверхностного монтажа, составляла на мировом рынке около 90%, а в 2007 году она превысила 94%. Такая востребованность SMD-корпусов вызвана произошедшим технологическим переворотом в области корпусирования ИС, когда технологии, ориентированные на монтаж в отверстия, были вытеснены технологиями поверхностного монтажа. По прогнозам экспертов ежегодный рост производства SMD-корпусов составит порядка 11%.

Помимо этого, семейства корпусов для поверхностного монтажа претерпевают и качественные изменения. Так, выделились подсемейства пластиковых корпусов P-SO и P-QFP, отличающиеся большим количеством и меньшим шагом выводов, меньшей толщиной и большим разнообразием размеров корпуса. Альтернативой им является семейство BGA. Например, низкопрофильный корпус BGA с малым шагом выводов

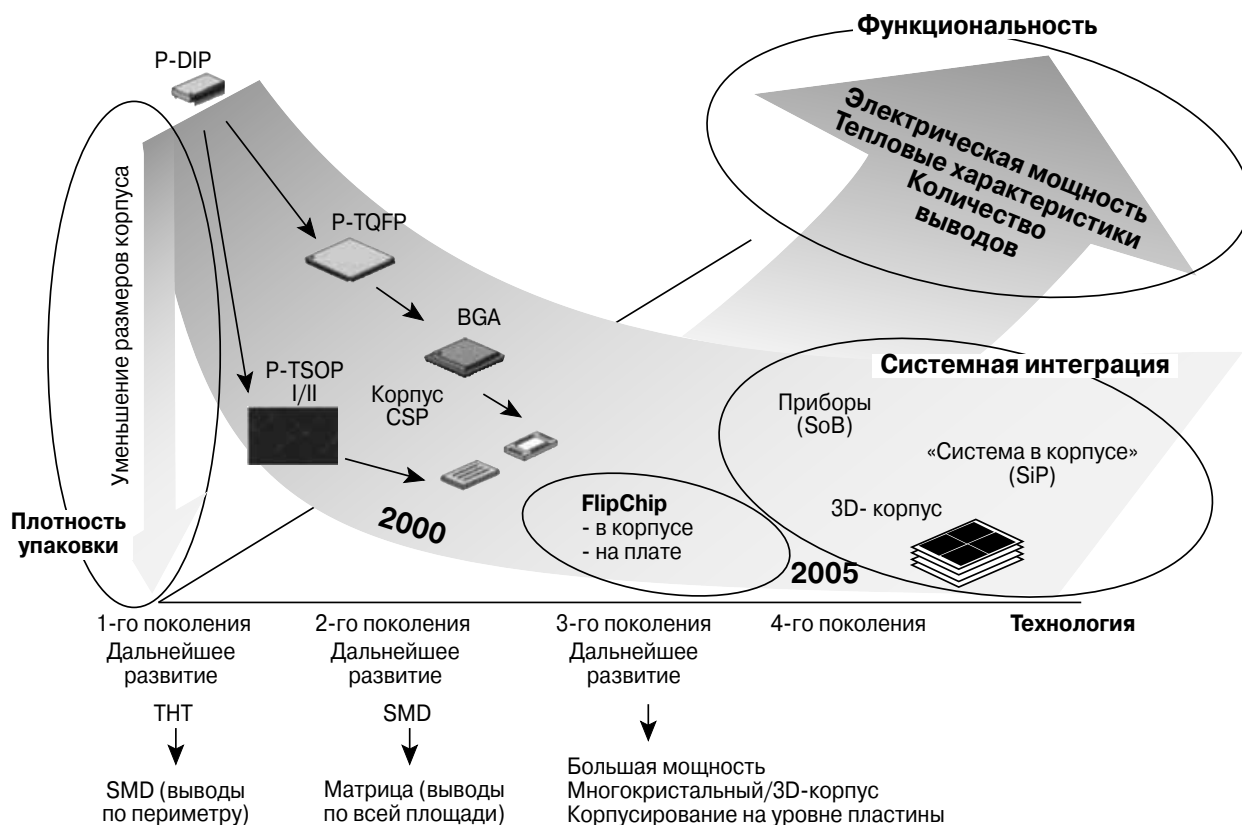


Рис. 14.10. Направления разработки корпусов ИС.

характеризуется средним расстоянием между шариковыми выводами (шагом) 0.8/0.65/0.5 мм и высотой 1.2...1.7 мм; высота корпуса TFBGA (FBGA уменьшенной толщины) составляет 1.0...1.2 мм. Новейшие плоские корпуса BGA позволяют наилучшим образом реализовать возможности высокопроизводительных ИС. В тех случаях, когда полупроводниковые микросхемы должны иметь большое количество выводов, особый интерес представляет использование корпусов семейства FBGA.

Помимо ИС, выполненных с использованием двух основных, «классических» типов корпусов (ТНТ и SMD), существуют также бескорпусные ИС, выполненные по так называемым технологиям с высокой плотностью межсоединений (High Density Interconnect — HDI). К ним относятся технологии автоматической сборки на ленте (Tape Automated Bonding — TAB), «кристалла-на-плате» (Chip on Board — CoB) и «перевёрнутого кристалла» (Flip Chip), которые обеспечивают гораздо большую плотность «упаковки» на плоском модуле ИС, чем стандартные технологии, в которых соединения кристалла и выводов осуществляются с помощью тонкой проволоки. На **Рис. 14.11** показаны сравнительные размеры областей, занимаемых полупроводниковыми кристаллами в различных типах корпусов ИС при размещении их на печатной плате. В отличие от стандартной технологии корпусирования, когда кристалл с помощью проволоочных соединений крепится на металлической выводной рамке и затем вся эта конструкция заливается защитным компаундом (по такому принципу выполнен, например, изображённый на **Рис. 14.11** корпус типа QFP), другие технологии обеспечивают экономию места на печатной плате. Так, технологии CoB или Flip Chip позволяют получить в 2...3 раза большую плотность размещения компонентов на печатной плате. Ещё более высокой плотности можно достичь за счёт непосредственного размещения кристалла ИС на печатной плате, используя технологию FCoB (Flip Chip on Board — перевёрнутый кристалл на плате).

Когда речь идёт о технологии Flip Chip, следует понимать различия между её модификациями FCoB (Flip Chip на плате, см. **Рис. 14.11**) и FCiP (Flip Chip в корпусе, см. **Рис. 14.3**). Если первая уже широко применяется в специализированных устройствах,

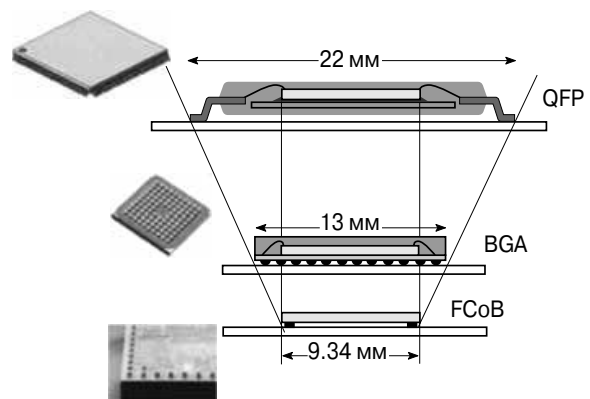


Рис. 14.11. Размеры области печатной платы, требуемой для размещения на ней одного и того же полупроводникового кристалла в различных корпусах.

то вторая (сочетающая технологию перевёрнутого кристалла и использование корпусов P-BGA или P-FBGA) лишь начинает развиваться, но имеет большие перспективы. Несколько лет назад на основании экспертных исследований рынка прогнозировалось, что область применения технологии FCoB значительно расширится. Однако эти прогнозы оказались чересчур оптимистичными. С появлением корпусов CSP, площадь основания которых всего лишь в 1.2 раза больше, чем площадь самого кристалла, технология FCiP приобрела особую привлекательность. При её применении можно получить полностью проверенную ИС, процесс производства которой не будет отличаться от стандартного технологического процесса производства SMT-компонентов. Благодаря отсутствию внутренних проволоочных соединений, эффективная длина выводов такой ИС оказывается значительно меньше, поэтому её электрические характеристики будут близки к характеристикам, обеспечиваемым технологией перевёрнутого кристалла (Flip Chip). Дополнительным преимуществом с точки зрения пользователя является ремонтпригодность компонентов, выполненных по технологии FCiP. В отличие от неё, технология FCoB обычно предполагает использование специального герметика (Underfill) для прикрепления бескорпусного кристалла ИС к поверхности печатной платы. Это не позволяет в случае необходимости выпаивать полупроводниковый компонент из платы и заменять его на исправный. Хотя технологии непосредственного соединения кристалла с печатной платой

позволяют минимизировать возможные неполадки при подключении ИС к печатной плате, широкое применение бескорпусных ИС сдерживается влиянием ряда факторов. К ним относятся так называемая проблема определения заведомо исправного чипа, сложность управления процессом заливки герметиком, необходимость поддерживать заданный уровень чистоты воздуха в производственных помещениях. Без решения этих проблем барьеры на пути массового применения бескорпусных технологий будут оставаться.

Как производители полупроводниковых компонентов, так и пользователи в равной степени заинтересованы в том, чтобы ныне существующие технологии производства корпусов ИС продолжали применяться и в будущем. Выгода от применения стандартной, десятилетиями отработанной технологии как раз и состоит в огромном накопленном опыте её использования, что снижает различные риски, которые могут возникать при её совершенствовании с целью создания сверхтонких корпусов. Даже в таких устройствах, как портативные телевизоры, CD-плееры, видеокамеры и карты памяти, а также ноутбуки и КПК, где миниатюрность используемых электронных компонентов играет исключительно важную роль, до сих пор значительную долю ИС составляют ИС в корпусах типа P-TSOP, тонком P-QFP и CSP.

Дискретные полупроводниковые компоненты в корпусах для поверхностного монтажа

Более четверти века назад в линейке продукции компании Siemens появился

SOT-23 — первый представитель семейства корпусов, предназначенных для поверхностного монтажа. Эта конструкция стала основой для широкого развития SMD-технологий и разработки всех последующих моделей SMD-корпусов, которые сегодня производятся миллиардными тиражами на самом современном оборудовании.

В 1980-е годы производственные процессы, методы испытаний и сборочные технологии были модернизированы под использование совместно с данным типом корпусов. Благодаря этому, в настоящее время осуществляется экономически эффективное производство полупроводниковых компонентов в корпусах для поверхностного монтажа и дальнейшее развитие соответствующих технологий, особенно в сочетании с технологией SMD-корпусирования (**Рис. 14.12**).

Предъявляемым пользователями требованиям (улучшенные электрические характеристики и малые габариты) хорошо соответствуют стандартные (SOT-223) или миниатюрные (SCD-80, SOT-3 × 3) корпуса для поверхностного монтажа. Путём оптимизации ряда параметров можно обеспечить максимальную рабочую частоту SMD-компонентов 50 ГГц и выше (например, для корпуса SOT-343). Цель последующих усовершенствований этих компонентов будет состоять в минимизации паразитных эффектов, погрешностей при соединении с печатной платой, уменьшении габаритов корпусов и улучшении их электрических характеристик.

В области разработки дискретных полупроводниковых компонентов прослеживается явная тенденция к их оптимизации не только по стоимости, но и по производи-

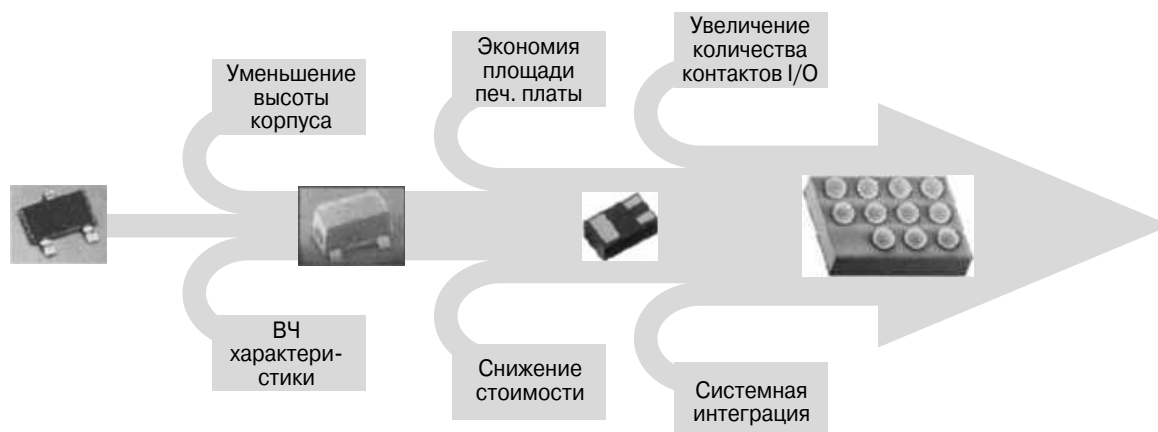


Рис. 14.12. Тенденции развития дискретных полупроводниковых компонентов.

тельности. По этой причине в последние годы всё большее внимание уделяется сверхплоским (с плоскими выводами) и безвыводным корпусам. Так, компанией Infineon Technologies был разработан корпус TSLP (Thin Small Leadless Package — тонкий малогабаритный безвыводной корпус), который в дальнейшем будет модернизирован с целью увеличения количества выводов и возможности работы на очень высоких частотах. В среде разработчиков дискретных компонентов также активно дискутируется вопрос о перспективах использования так называемой технологии корпусирования на уровне пластины (Wafer Level Packaging — WLP). Корпуса данного типа, скорее всего, будут применяться в микросхемах с интегрированными пассивными компонентами. Такие ИС в будущем составят основу для реализации системных решений.

14.4.4. Общемировые тенденции развития пассивных модулей

Первыми пассивными компонентами, которые стали размещать в корпусах для поверхностного монтажа, были полупроводниковые резисторы и керамические конденсаторы. В Европе наиболее передовыми считаются корпуса типоразмеров 0805 (2.0×1.2 мм) и 0603 (1.6×0.8 мм); начат также выпуск корпусов 0402 (1.0×0.5 мм), производство которых, как и корпусов BGA с уменьшенным шагом выводов, связано с решением сложных технологических проблем. В Японии корпуса типоразмеров 0402 и даже 0201 (0.5×0.25 мм) уже широко применяются.

В настоящее время основной импульс разработке интегральных пассивных компонентов даёт развитие беспроводных систем связи. Современная тенденция, которая полностью соответствует тенденциям развития ИС (см. **Рис. 14.14** далее), состоит в том, что дискретные пассивные компоненты «убираются» с печатной платы устройства и интегрируются в едином корпусе или, более того, непосредственно на полупроводниковом кристалле (на конечном этапе производства — BEOL). Компания Infineon также следует этой тенденции к прямой интеграции компонентов, которая позволяет обеспечить высокий уровень системной интеграции и минимизировать габариты устройств.

14.5. Корпуса с уплотнённым расположением выводов: оценка с точки зрения пользователя и альтернативные решения

Сроки выхода на рынок новых корпусов на базе многовыводной рамки (например, типа QFP) или на основе семейства корпусов BGA непосредственно зависят от того, насколько быстро пользователи смогут уяснить для себя, как следует правильно применять эти новые конструкции. Дело в том, что количество выводов корпуса и плотность их расположения постоянно возрастают, при этом особенно большое значение приобретает надёжность соединений корпус/печатная плата.

Применение корпусов с уменьшенным шагом выводов ставит непростые задачи перед производителями системных плат. Сборочное оборудование должно размещать компоненты на печатной плате с очень высокой точностью и работать под управлением программного пакета Visio. При использовании технологии трафаретной печати, к соответствующему оборудованию и к характеристикам паяльной пасты предъявляются жёсткие требования по качеству. Это увеличивает стоимость оборудования и, следовательно, стоимость продукции.

Основная проблема, возникающая при работе с корпусами, шаг выводов которых составляет всего лишь 0.5 мм, состоит в опасности сгибания очень тонких контактов (выводов) при неосторожном обращении с ними. Это может произойти как в процессе производства полупроводникового компонента, так и при последующей установке его на печатную плату. Ещё более жёсткие требования предъявляются к тому, чтобы все выводы находились в одной плоскости. Любой изгиб контакта может привести к возникновению неисправности в электрической цепи. Поэтому немалое значение имеет также и качество поверхности печатной платы в месте установки компонента.

В этой связи растущий интерес вызывает использование корпусов типа BGA. Их выводы «утоплены» в основании корпуса и расположены по всей его площади, чем обеспечивается большее количество соединений. Достоинство технологии BGA со-

стоит в том, что шаг выводов (1.5 мм, 1.27 мм или 1 мм) корпуса достаточно велик, поэтому при установке корпуса на печатную плату можно без проблем использовать автоматизированную сборку. Семейство корпусов BGA быстро развивается. Так, наблюдается тенденция к снижению толщины корпусов, и в настоящее время производство корпусов BGA толщиной, например, 1.2 мм не представляет особых сложностей. Один из возможных вариантов исполнения — упоминавшаяся выше сверхплоская конструкция CSP, геометрические размеры которой лишь незначительно превышают размеры полупроводникового кристалла. В формате CSP реализован, например, корпус LFBGA. Приведём некоторые из его характеристик: диаметр шарикового вывода 0.25...0.45 мм, толщина корпуса 1.2...1.7 мм, шаг выводов 0.3...0.8 мм. Корпус типа FBGA имеет шаг выводов (расстояние между шариками в матрице) 0.3 мм, что обеспечивает практически такую же плотность упаковки, что и при использовании бескорпусных технологий.

По сравнению с монтажом компонентов в отверстия на печатной плате, технология поверхностного монтажа предполагает, что компоненты подвергаются воздействию больших термомеханических нагрузок в процессе их пайки методом оплавления припоя. Полупроводниковые кристаллы большой площади в пластиковых SMD-корпусах особенно чувствительны к так называемому эффекту попкорна, который возникает из-за наличия влаги внутри корпуса и приводит к внутреннему расслоению корпуса в процессе припаивания компонента к печатной плате методом оплавления припоя. По этой причине большие корпуса P-LCC, P-QFP и P-DSO обычно поставляются в так называемых сухих упаковках¹⁾, а организация транспортировки готовой продукции от производителя полупроводниковых компонентов к пользователям (производителям электронных устройств) приобретает большое значение.

14.6. Куда приведёт нас процесс совершенствования корпусов ИС?

Диаграмма, приведённая на Рис. 14.13, позволяет сравнить характеристики корпусов, выполненных по технологиям Flip Chip, FBGA и SMT. Здесь следует обратить внимание на их стоимость, поскольку данный фактор, в первую очередь, определяет выбор корпусов для полупроводниковых устройств.

Ниже перечислены направления развития технологий обработки и корпусирования, которые в будущем обеспечат ещё большее многообразие корпусов, ориентированных под конкретные прикладные задачи и, следовательно, под требования конечных пользователей:

- Увеличение количества выводов корпуса (в особенности, корпусов, предназначенных для специализированных микросхем ASIC) как следствие всё возрастающей функциональной сложности ИС.
- Системное корпусирование, когда оптимальные интегрированные решения применяются к целому комплексу, состоящему из кристалла, корпуса и плоского модуля (шаг по пути к прямой интеграции).
- Дальнейшее слияние технологий на начальном (технология изготовления кристаллов, с учётом BEOL) и конечном (технология корпусирования) этапах производства ИС.
- Корпусирование на уровне пластины (WLP), которое в перспективе представляет собой наиболее оптимальный путь к слиянию технологий на начальном и конечном этапах производства ИС.

Как упоминалось выше в разделе 14.4.3, с развитием технологий корпусирования появляются новые проблемы, требующие решения. К ним относятся проблема отбора заведомо исправного кристалла, а также проблема ремонтпригодности микросхем, смонтированных непосредственно на поверхности печатной платы с использованием технологии Flip Chip. Решение этих проблем, а также проблем, связанных с необходимостью иметь очень большое количество выводов ИС, в настоящее время состоит в

¹⁾ «Сухая упаковка» (Dry-pack) — герметично закрытый транспортировочный контейнер, в котором, помимо самого компонента, находится влагопоглотитель. — *Примеч. пер.*

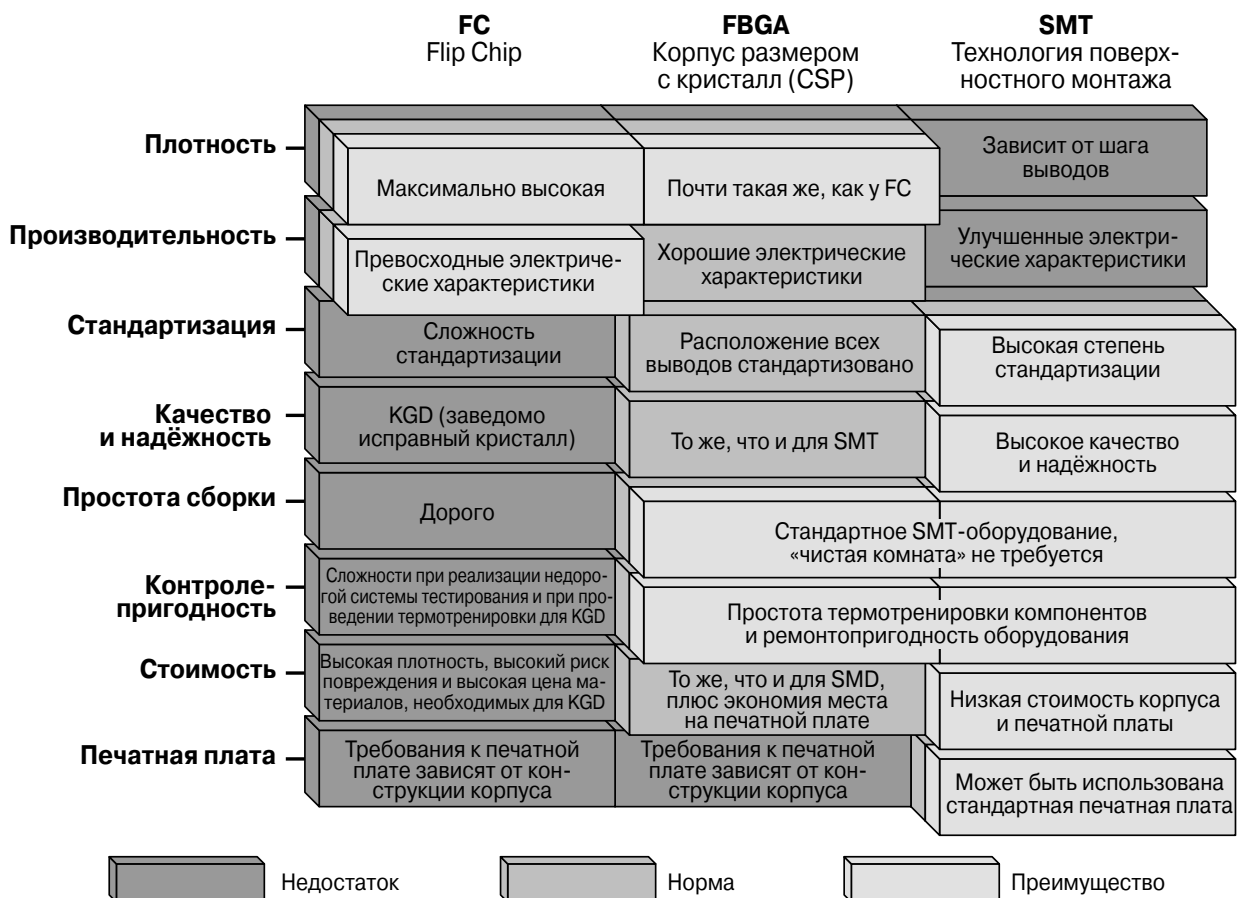


Рис. 14.13. Сравнение различных технологий корпусирования.

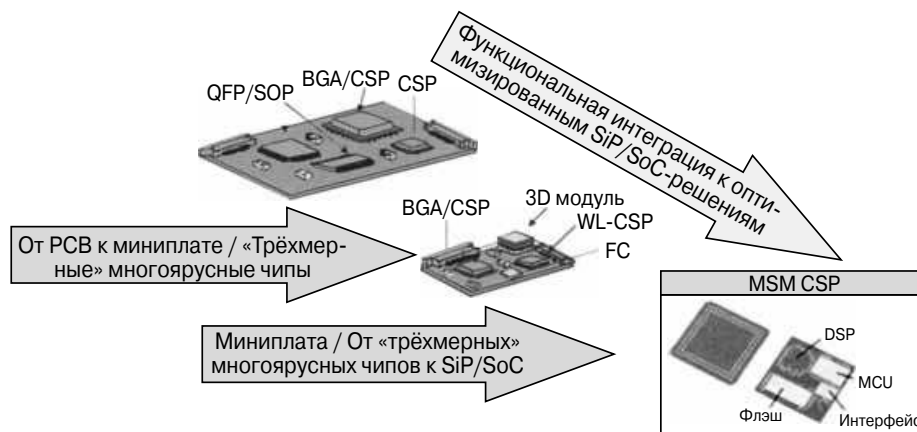


Рис. 14.14. Тенденция, направленная на развитие прямой интеграции.

использовании корпусов семейства BGA, а в дальнейшей перспективе — LFBGA с технологией FCiP (Flip Chip в корпусе, см. Рис. 14.3). Наиболее передовая на сегодняшний день технология LFBGA сочетает лучшие качества Flip Chip и возможности технологии поверхностного монтажа. Корпуса P-FBGA обеспечивают характеристики, востребованные во многих областях

применения (в первую очередь, с точки зрения производительности и миниатюризации). Поэтому уже в ближайшие годы они начнут вытеснять с рынка корпуса семейств P-QFP, SO и P-BGA.

Использование корпусов P-LFBGA связано с повышенными требованиями к конструированию печатной платы. Вплоть до настоящего времени применялись стан-

дартные двух- или четырёхслойные печатные платы с шириной/шагом проводящих дорожек 0.15 мм, которые вполне подходят для размещения корпусов P-QFP, P-SO или P-BGA. Для корпуса P-FBGA шаг выводов в матрице составляет 0.5 или 0.8 мм, и разводка сигналов может быть осуществлена лишь при использовании многослойной печатной платы с тонкими дорожками или с технологией наращивания.

В последнее время, наряду с тенденцией к миниатюризации корпусов, всё отчетливее проявляется тенденция к так называемой прямой интеграции (**Рис. 14.14**), когда несколько полупроводниковых микросхем и модулей памяти объединяются в одном общем корпусе. Сюда же относится и интеграция пассивных компонентов внутри корпуса ИС (так называемые решения «система-в-корпусе»). Результатом будет слияние технологий корпусирования и производства полупроводниковых кристаллов. Многие производители полупроводниковых компонентов уже сегодня размещают технологические линии для производства кристаллов ИС и для производства корпусов по технологии Flip Chip (включающей в себя металлизацию под столбиковыми выводами (UBM) и применение шариковых выводов) на одном заводе.

Продолжая обсуждение растущих возможностей технологий производства корпусов для полупроводниковых компонентов, следует сказать, что на данный момент наиболее перспективной из них представляется технология корпусирования на уровне пластины (WLP). Она подразумевает наибольшую степень слияния технологий производства кристалла и корпуса. В настоящее время во всём мире ведутся активные исследования и разработки в этом направлении.

14.7. Материалы, используемые при производстве корпусов

В феврале 2003 года страны Евросоюза приняли директивы о порядке использования и утилизации электрического и электронного оборудования, в соответствии с которым запрещается применение в электронном оборудовании ряда экологически опасных материалов. Эти директивы (WEEE, RoHS) заставляют руководителей промышленности обратить внимание на

проблему замены свинца, входящего в состав припоя, на более экологически безопасный материал. За небольшими исключениями, с середины 2006 года все электронные компоненты должны производиться с соблюдением соответствующих норм.

14.7.1. Бессвинцовые и безгалогенные корпуса

В наибольшей степени указанные директивы применимы к поверхностям, покрытым припоем. При использовании корпусов для поверхностного монтажа оловянно-свинцовые (SnPb) покрытия заменяются на чисто оловянные. В технологии BGA в качестве такой замены используется оловянно-серебряно-медный сплав (SnAgCu). Изменение состава паяльной пасты оказывает непосредственное влияние на технологический процесс покрытия печатной платы припоем. Особенно сильно это сказывается при замене оловянно-свинцовых паст, температура плавления которых составляет +179°C, оловянно-серебряно-медными с температурой плавления +217°C. Соответственно, тепловое воздействие на полупроводниковые компоненты в процессе их пайки существенно увеличивается.

Переход к использованию новых припоев требует внесения дополнений в многочисленные технологические стандарты и нормы. Компания Infineon, со своей стороны, участвует в этом процессе и, в рамках технической поддержки пользователей, предоставляет им соответствующие данные. Несмотря на то что официально датой введения в действия новых стандартов в Европе считается 1 июля 2006 года, «сценарий» этого события жёстко не прописан и предполагает определённый переходный период, в течение которого возможно производство электронной продукции с использованием как бессвинцовых технологий, так и технологий с использованием свинца. Длительность переходного периода должна быть сведена к минимуму производственными и логистическими мерами. Указанная возможность зависит от того, насколько процесс покрытия печатной платы припоем отвечает заданным требованиям и наличием совместимых с этим процессом бессвинцовых технологий.

Вплотную к проблеме производства не содержащих свинца электронных компо-

нентов примыкает проблема создания пластиковых корпусов, не содержащих огнезащитных добавок на основе соединений брома. Огнезащитные добавки в материалы обеспечивают защиту от их воспламенения при нагреве. Однако, с точки зрения защиты окружающей среды, бромсодержащие материалы не являются экологически безопасными. Замена их на более экологичные материалы должна производиться параллельно с переходом на бессвинцовые технологии производства корпусов ИС.

Таким образом, корпус полупроводникового компонента может считаться экологически «чистым», если в его состав не входят свинец и бромсодержащие огнезащитные добавки. Это предполагает также, что процесс пайки будет осуществляться с использованием бессвинцовых припоев.

14.7.2. Требования к содержанию различных веществ в устройствах и материалах

Производство большей части электронной продукции связано с использованием большого количества разнообразных материалов, веществ и химических процессов. Их выбор и адекватное применение непосредственно влияют на качество, безопасность и экологическую безопасность применяемой продукции в течение всего срока её службы.

Оптимизация этих характеристик возможна лишь при налаженном обмене информацией по всей производственной цепочке, которая включает в себя получение исходных материалов, разработку и создание предварительных образцов продукции, компонентов и собственно самих устройств, процесс их использования и, наконец, процесс их переработки и утилизации по окончании срока службы.

Следовательно, данные о содержании тех или иных веществ в электронных компонентах должны быть представлены в удобной для пользователя форме. Поэтому практикуется такое решение, как создание специализированных модификаций (подсемейств) электронных компонентов на базе их типовых семейств. Эти модификации различаются лишь составом и процентным соотношением используемых в них веществ и материалов. Соответствующие стандарты принято называть «зонтичными спецификациями»

(Рис. 14.15). Данный подход применим к любым электронным компонентам, при этом критерии формирования подсемейств для тех или иных конкретных компонентов определяются в соответствии с требованиями пользователя.



Рис. 14.15. Использование одной «зонтичной спецификации» в различных областях применения продукции.

С учётом возросших требований к экологической безопасности, содержание тяжёлых металлов в пластиковых материалах, используемых при производстве корпусов электронных компонентов, не должно превышать следующих значений:

- по массовой доле кадмия — не более 5 ppm, т.е. 0.0005%;
- по общему содержанию кадмия, ртути, свинца и шестивалентного хрома — не более 100 ppm.

Соблюдение этих требований позволяет избежать загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами, либо свести его к минимуму.

14.7.3. Сбои в работе программного обеспечения вследствие повышенной радиоактивности материалов корпусов компонентов

Полимерные материалы (компаунды), используемые в производстве пластиковых корпусов, в нормальных условиях содержат незначительное количество таких радиоактивных элементов, как уран и торий, кото-

рые являются источниками альфа-частиц. Свинец, который входит в состав шариковых выводов корпусов, выполненных по технологии Flip Chip, также «производит» альфа-частицы. Проблема альфа-излучения в материалах корпусов ИС, как и меры по защите от воздействия этого излучения, известны достаточно давно из DRAM-технологии.

В связи с тем, что в настоящее время существует тенденция к уменьшению размеров транзисторов и снижению их рабочих напряжений (например, МОП-транзисторы могут работать при напряжениях питания 1.2...1.5 В), повышается вероятность того, что альфа-излучение радиоактивных материалов будет влиять на состояние ячеек памяти SRAM (т.е. при попадании альфа-частицы в ячейку памяти значение бита может измениться с 1 на 0). Поэтому при про-

ектировании микросхем SRAM с технологической нормой 0.18 мкм и менее необходимо предусматривать соответствующие меры по защите от воздействия альфа-излучения. Например, можно реализовать встроенные логические схемы коррекции ошибок, либо в качестве заполнителя (компаунда) следует использовать материал, не содержащий радиоактивных элементов (источников альфа-частиц). Проблема альфа-излучения свинца, входящего в состав шариковых выводов корпусов, выполненных по технологии Flip Chip, разрешается путём применения не содержащих свинца материалов, например SnAg или SnAgCu. Что же касается влияния альфа-излучения на работу тех или иных логических схем ИС, то в настоящее время проводятся исследования по данному вопросу.

15. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Качество продукции является важнейшей составляющей коммерческого успеха и исключительно значимым фактором в конкурентной борьбе. Высокое качество компонентов Infineon обусловлено требованиями, которые пользователи предъявляют к экономической эффективности процесса производства и, конечно, высокой надёжности — особенно в тех случаях, когда компоненты Infineon используются в приложениях, связанных с обеспечением безопасности или чувствительных к условиям окружающей среды.

Параметры качества обычно стараются привести в соответствие с требованиями стандарта DIN 55350, который гласит, что «качество есть совокупность свойств и характеристик продукта или услуги, которые связаны с его способностью удовлетворять заданным требованиям». Таким образом, качество — это мера, в которой продукция или услуги «оправдывают» своё назначение. С точки зрения пользователя, качество продукции определяется эффективностью её применения в условиях, которые соответствуют заданным нормам.

15.1. Критерии, определяющие качество продукции

Качество продукции представляет собой совокупность различных элементов (критериев). Наиболее важными из них являются:

- Свойства и характеристики продукции, в том числе её функциональные характеристики и значения параметров, указываемые в спецификации и технических описаниях.
- Технологичность: данный критерий определяет, насколько стабильным и отлаженным является процесс производства продукции.
- Количество отбракованных (вследствие электрических и/или механических дефектов) полупроводниковых компонентов в партии изделий. Дефектом считается любое несоответствие характеристикам, заявленным в спецификации.
- Качество поставки продукции, например соблюдение сроков поставки.

- Пригодность к применению в пользовательских устройствах (обеспечивается ли качество сборки печатной платы и особенно процессов пайки и очистки).
- Надёжность, т.е. стабильность характеристик полупроводникового компонента при работе в устройстве, с учётом возможной деградации этих характеристик, способной ухудшить функциональные возможности компонента.

Контроль качества как основа для оптимизации качества продукции

Качество продукции и услуг, оптимальное как с точки зрения производителя, так и с точки зрения пользователя, не может быть достигнуто случайным образом. Исходя из опыта работы компании Infineon, оптимальность качества продукции — это результат совершенного управления бизнес-процессами внутри компании, которое реализовано в рамках программы Business Excellence («Совершенство бизнеса»).

Infineon рассматривает управление качеством как взаимно скоординированную деятельность управляющего персонала и каждого работника компании, направленную на достижение главной цели — совершенства бизнеса. Таким образом, политика компании Infineon в области качества включает в себя упреждающее планирование, поддержку концепции непрерывных улучшений (CIP), предварительный контроль качества и итоговый контроль качества с целью обнаружения и анализа отдельных неисправностей продукции. Фундаментальная концепция современной теории управления качеством продукции как основа для совершенствования бизнеса была впервые разработана в 1970-е годы. Она исходит из очевидного факта, что одними только мерами контроля в классическом их понимании (выходной контроль качества) невозможно обеспечить безупречное качество продукции во всём диапазоне целей и задач. В настоящее время эта точка зрения стала общепринятой.

Основными причинами потерь в качестве продукции являются ошибки при проектировании и недостаточно эффективный

контроль на этапе производства продукции. Исходя из этого, в концепции управления качеством основной упор делается на оптимальное планирование мер по обеспечению качества продукции и практическую реализацию этих мер.

Всё это привело к появлению в 1980-е годы новой перспективной концепции тотального управления качеством (Total Quality Management — TQM), суть которой очень проста: делать всё правильно с самого начала и до конца — стратегия, совершенно исключающая ошибки! Её ценность, обусловленная требованиями современных моделей управления бизнес-процессом, подтверждается тем, что эта концепция ежегодно отмечалась престижными наградами в США (Приз М. Болдриджа), Европе (Европейский приз качества) и других странах. Компания Infineon также дважды номинировалась на Европейский приз качества (EQA) как финалист в топ-классе производителей.

Современная концепция «превентивно-го» управления качеством, представляющая собой ключевой элемент успешного управления бизнес-процессом, развилась на основе традиционных методик обеспечения качества, эволюционировавших в направлении персональной ответственности сотрудников. Лишь активность, проявляемая персоналом, позволяет раскрыть огромный потенциал компании Infineon в области обеспечения качества продукции. Благодаря этому можно говорить об оптимальном удовлетворении требований к качеству продукции, предъявляемых всеми заинтересованными сторонами — пользователями, поставщиками, акционерами и т.д., — и, конечно же, самой компанией Infineon.

15.2. Меры по обеспечению качества бизнес-процессов

В качестве примера, ниже подробно описаны меры, связанные с обеспечением качества продукции в процессе её разработки, сертификации и производства.

Меры, обеспечивающие заданные характеристики и свойства продукции, а также качество поставки

Процесс разработки продукции, основанный на использовании соответствующих спецификаций (технических условий),

подробно структурирован и описан в «Руководстве по разработке продукции». Соответствие его характеристик заданным контролируется на всех ключевых этапах процесса разработки. Для этого осуществляются контрольные оценки проекта путём заполнения соответствующих ведомостей технического контроля, входящих в состав «Руководства по разработке продукции».

В зависимости от того, в какой стадии находится процесс разработки продукции, контроль над ним осуществляется следующим образом: структурная схема изделия приводится в соответствие с техническими требованиями заказчика; принципиальная схема проверяется на соответствие со структурной схемой; расчётные электрические характеристики изделия сравниваются с характеристиками, заданными в технических требованиях заказчика.

Полученные в процессе производства опытные образцы продукции проходят приёмочные испытания (в рамках сертификации) с использованием испытательного оборудования, которое обеспечивает проверку в диапазоне напряжений и температур, заданном в технических требованиях. Здесь важно, чтобы испытания проводились в как можно более жёстком режиме, т.е. чтобы программа испытаний «перекрывала» бы все определённые в технических условиях на изделие функциональные и электрические характеристики.

По мере наращивания объёмов массового производства продукции изредка могут возникать отдельные неполадки, даже если для контроля производственного процесса используются самые передовые методы, например SPC. Поэтому меры по обеспечению качества продукции должны предусматривать выходной контроль качества.

Меры, обеспечивающие технологичность и надёжность продукции

Технологичность и надёжность полупроводниковых компонентов рассчитывается, исходя из следующих критериев:

- Возможность производства.
- Совместимость с последующими технологическими процессами (например, с процессом сборки печатной платы).
- Количество компонентов в партии, отбракованных по причине дефектов (интенсивность отказов в период приработки).

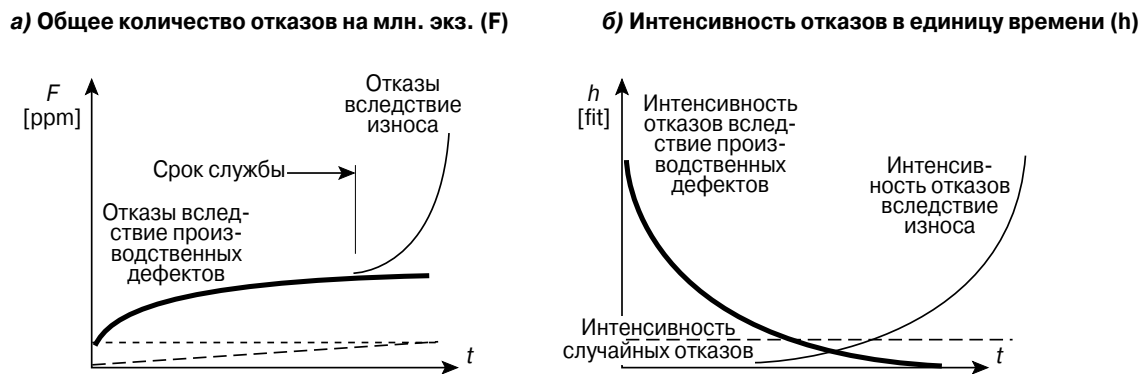


Рис. 15.1. Сравнение гистограмм для суммарного числа отказов и интенсивности отказов.

Таблица 15.1. Концепции испытаний для различных критериев качества полупроводниковых компонентов

Критерий качества	Проблема	Концепция испытаний
Возможность производства с точки зрения пользователя	Проблемы, возникающие при сборке печатной платы	Моделирование воздействий на компонент, возникающих в ходе сборочных процедур (пайки, очистки и т.д.)
Отказоустойчивость	Ранний отказ (отказ в период приработки)	Выборочные испытания готовой продукции или испытания контрольных образцов продукции, выполненных по соответствующей технологии
Долговечность	Влияние конструкции отдельных элементов устройства, а также эффектов, возникающих в процессе работы и под воздействием внешней среды	Конструктивные испытания; использование моделей ускоренных испытаний и симуляционных программных моделей
Электробезопасность	Повышенная чувствительность к воздействию электростатических разрядов и внешних электромагнитных полей	Испытания на устойчивость к ESD, контроль «тиристорного эффекта», испытания на EMC, проверка чувствительности к электромагнитным излучениям

- Рабочие характеристики полупроводниковых компонентов в реальных условиях в течение заданного срока службы (время до начала периода износа > требуемого срока службы).
- Устойчивость по отношению к внешним воздействиям (ESD, EMI, броски напряжения и т.д.).

На Рис. 15.1 показаны гистограммы для сравнения терминов «срок службы» и «интенсивность отказов».

Концепции испытаний, соответствующие тем или иным критериям, перечислены в Табл. 15.1.

На финальном этапе проектирования полупроводниковых компонентов (непосредственно перед запуском в массовую серию) в рамках их сертификации производится учёт влияния различных физических механизмов возникновения ошибок на функциональные возможности и срок службы компонентов.

15.3. Технологичность с точки зрения пользователя

В процессе сертификации полупроводниковых компонентов (проверки соответствия техническим условиям) на этапе производства, оценка их пригодности для монтажа на печатных платах или в других модулях осуществляется путём моделирования соответствующих нагрузок на компоненты. Условия пайки и допустимые величины механических и электрических нагрузок на компоненты подробно описаны в справочных руководствах на корпуса компонентов Infineon и соответствуют международным стандартам.

Подобным же образом осуществляется подготовка полупроводниковых компонентов и к другим видам испытаний. Эти испытания позволяют достоверно оценить надёжность изделий при их применении в пользовательских устройствах.

Отказы вследствие производственных дефектов

Дефекты, которые возникают в процессе производства полупроводниковых компонентов и остаются «незамеченными» даже после заключительных испытаний, затем могут стать причиной отказов в работе компонентов, причём эти отказы проявляются в ходе начального, достаточно короткого периода эксплуатации (периода приработки). Такие отказы называются статистическими, а их интенсивность непосредственно зависит от плотности дефектов, вызванных соответствующим технологическим процессом. Современные технологии характеризуются высоким уровнем качества и, следовательно, малой плотностью дефектов. Поэтому для оценки интенсивности отказов на начальном этапе эксплуатации требуются испытания очень большого количества изделий. На практике такие испытания осуществляются путём случайной выборки довольно больших партий компонентов и контроля их работы в течение длительного периода времени.

В качестве испытательной модели при тестировании используется наиболее сложное из изделий, выполненных по данной технологии. Испытания проводятся в режиме «наихудших условий» работы изделия.

Распределение по времени как общего числа отказов, так и относительной интенсивности отказов может быть представлено в виде простой экспоненциальной зависимости. На **Рис. 15.2** показана графическая модель, описывающая зависимость общего

числа отказов от времени, вызванных производственными дефектами полупроводниковых компонентов, а также мгновенного и среднего значений интенсивности отказов в единицу времени $F(t)/t$. Как видно из графика, спустя 10^5 часов эксплуатации уровень отказов составляет 1000 dpm (дефектов на миллион экземпляров изделия). Значение параметра b для логических компонентов составляет в среднем 0.7.

Характеристики надёжности и их изменение в течение срока службы продукции

Описанные выше испытания позволяют оценить, может ли полупроводниковый компонент ещё до истечения требуемого срока службы выйти из строя в результате «старения» (эффект которого определяется физико-химическими свойствами используемых материалов и конструкцией тех или иных компонентов). При соответствующих вычислениях используются принципиально известные соотношения, связывающие физические механизмы отказов и условия, практически воздействующие на изделие.

Для того чтобы с помощью данной модели осуществить количественную оценку характеристик надёжности, используются упрощённые методы испытаний, которые специально адаптированы для работы в экстремальных режимах. Обзор этих методов приведён в **Табл. 15.2**. Использование подобной концепции позволяет гораздо оперативнее производить оценку надёжности полупроводниковых компонентов (см. также подраздел «Модели ускоренных испытаний»).

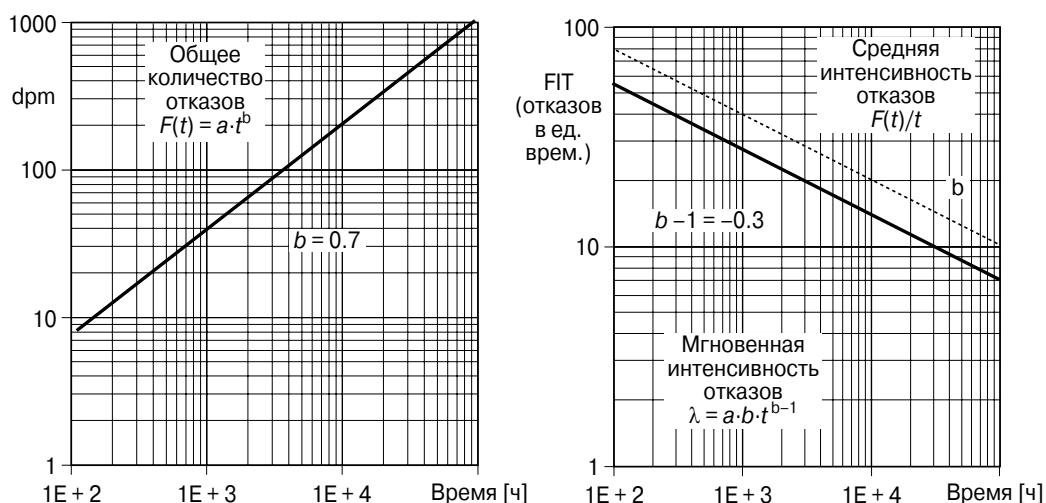


Рис. 15.2. Зависимости общего количества отказов и интенсивности отказов от времени.

Таблица 15.2. Испытания на надёжность

Воздействие/нагрузка	Испытуемые элементы	Условия испытаний	Примечания
Испытания на долговечность (с учётом конструкции испытуемых устройств и воздействия внешних факторов)			
Эксплуатационные статические/динамические: — температура — напряжённость электрического поля — плотность тока	Отдельные элементы или узлы испытуемого изделия, чувствительные к измеряемой физической величине	Условия, специфические для физических механизмов, определяющих процесс работы испытуемых элементов	Значения параметров должны выходить за рамки предельно допустимых для данного компонента (испытания в «экстремальном» режиме)
Обусловленные окружающими условиями: — температура — относительная влажность — перепад температур	Отдельные типы корпусов (пластиковые)	Соответствующие максимально допустимым режимам работы, например: +150°C 85% (при +85°C) –40/+150°C	—
Испытания на работоспособность (обычно выполняются в максимальных режимах работы изделия или в условиях, указанных производителем)			
Электрические процессы	Изделие в целом	Зависят от функции испытуемого компонента, например: статические / динамические / цикл перезапуска / цикл чтения/стирания данных	Для всего ожидаемого срока службы компонента
Испытания для оценки надёжности на начальном этапе (обычно выполняются в максимальных режимах работы изделия или в условиях, указанных производителем)			
Надёжность на начальном этапе эксплуатации	Типичный представитель семейства полупроводниковых компонентов, выполненных по одной и той же технологии	Зависят от функции испытуемого компонента, например: статические / динамические / цикл перезапуска	Для всего ожидаемого срока службы компонента
Испытания на технологичность (с точки зрения OEM-производителей), часто предшествуют испытаниям, связанным с оценкой влияния окружающей среды			
Нагрев при пайке	Отдельные типы корпусов (пластиковые)		—
	Корпуса для монтажа в сквозные отверстия	Заданная характеристика распределения тепла при пайке	—
Влажность окружающей среды при хранении и транспортировке изделия	Корпуса для поверхностного монтажа	Предварительная обработка* + заданная характеристика распределения тепла при пайке	* Моделируется эффект поглощения влаги
Испытания на устойчивость к внешним электрическим воздействиям и нагрузкам			
Электростатический разряд (ESD)	Изделие в целом	— модель человеческого тела (HBM) — модель заряженного устройства (CDM)	—
Тиристорный эффект	Изделие в целом	—	—
Электромагнитные помехи (EMI)	Изделие в целом	—	—

Указанные испытания следует проводить на как можно более раннем этапе разработки новой технологии производства изделий, и их результаты должны немедленно учитываться в обязательных проектных нормативах. Соблюдение этих норм позволит обеспечить длительный срок службы всех полупроводниковых компонентов,

произведённых по данной технологии. В Табл. 15.3 перечислены наиболее существенные факторы, влияющие на характеристики надёжности полупроводниковых компонентов в течение всего периода эксплуатации и непосредственно определяющие срок службы этих компонентов.

Таблица 15.3. Факторы надёжности, влияющие на срок службы полупроводниковых компонентов

Характеристики полупроводникового компонента	Физические процессы	Воздействующие факторы
Стабильность электрических параметров активных переключательных элементов	— Захват заряда (эффект горячих носителей)	E, T
	— Дрейф ионных примесей	E, T
Временная зависимость пробоя диэлектрических (оксидных) слоёв	— Захват заряда	E, T
Стабильность контактов и путей протекания тока	— Взаимная диффузия различных металлов с образованием разрывов	T
	— Электромиграция	J, T
Эксплуатационная надёжность компонента: — термомеханическая нестабильность работы отдельных элементов — плотность отказов	— Образование трещин	ΔT
	— Механическая усталость материалов в точках соединений	ΔT , количество циклов
	— Коррозия	Относительная влажность
	— Миграция механических напряжений в материале	
<i>Примечание.</i> T — температура; ΔT — интервал температур; E — напряжённость электрического поля; J — плотность тока.		

Устойчивость к электрическим воздействиям

Данный аспект оценки надёжности полупроводниковых компонентов посвящён их поведению в условиях повышенных электрических нагрузок, вызванных воздействием электростатических полей и разрядов (ESD), а также возникающих как результат влияния внешних устройств (электромагнитные излучения, «тиристорный эффект» и т.п.).

Соответствующие характеристики компонентов определяются, прежде всего, их внутренней схемотехникой. Компания Infineon на ранних этапах разработки новых технологий производства полупроводниковой продукции использует общепринятые

международные методики компьютерного моделирования и испытаний. Результаты этих испытаний учитываются в обязательных проектных нормативах и позволяют прогнозировать характеристики надёжности вновь разрабатываемых полупроводниковых компонентов.

Модели ускоренных испытаний

Для того чтобы оценивать надёжность полупроводниковых компонентов в реальных рабочих условиях с помощью испытаний, результаты которых получены в условиях повышенных нагрузок, компания Infineon использует модели ускоренных испытаний. В Табл. 15.4 перечислены четыре основные ускоренные модели.

Таблица 15.4. Модели ускоренных испытаний, используемые при испытаниях полупроводниковых компонентов

Воздействующий фактор и модель	Математическое выражение
Температура Модель Аррениуса	$AF(T) = \exp \frac{\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{use}}} \times \frac{1}{T_{\text{stress}}} \right)$
Температура и напряжение смещения Модель Эйринга	$AF(V, T) = AF(T) \exp B(V_{\text{stress}} - V_{\text{use}})$ Параметр B зависит от физического механизма работы элемента или технологии. По умолчанию $B = 1$.
Температура и влажность Модель Пека (применяется для учёта эффекта коррозии в пластиковых корпусах)	$AF(rh, T) = \left(\frac{rh_{\text{stress}}}{rh_{\text{use}}} \right)^n \times AF(T)$ $n = 3, \Delta E = 0.9 \text{ эВ}$
Термоциклы Модель Коффина-Мэнсона (применяется для оценки эффекта усталости металла в паяных/сварных соединениях)	$AF(\Delta T) = \left(\frac{\Delta T_{\text{stress}}}{\Delta T_{\text{use}}} \right)^c \times \frac{f_{\text{c stress}}}{f_{\text{c use}}}$ Параметр C зависит от физического механизма работы элемента или технологии. По умолчанию $C = 2$.
ΔE — кажущаяся энергия активации [эВ] k — постоянная Больцмана ($8.617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К или $1.381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К) T — температура кристалла [К] V — напряжение смещения [В]	rh — относительная влажность [%] ΔT — температура [°С или К] f_{c} — количество циклов в единицу времени [1/ч] AF — коэффициент ускорения

Термическое напряжение (модель Аррениуса)

Среднее значение кажущейся энергии активации составляет 0.5...0.7 эВ.

Термическое и электрическое напряжение (модель Эйринга)

В данной модели в качестве дополнительного активирующего фактора, относящегося к эффекту пробоя оксидного слоя полупроводниковой МОП-структуры, служит рабочее напряжение. Введение эмпирического коэффициента B позволяет учесть толщину оксидного слоя.

Воздействие температуры и влажности (модель Пека)

Данная модель основана на статистической оценке результатов достаточно большого количества экспериментов с различными исходными данными. В качестве максимального значения здесь применяется рабочее напряжение. За контрольную точку обычно принимаются значения температуры +85°С и относительной влажности воздуха 85%, что соответствует типичным условиям испытаний.

Циклическое термическое воздействие (модель Коффина-Мэнсона)

Данная модель наиболее хорошо подходит для оценки долговечности полупроводниковых компонентов в пластиковых корпусах. Она описывает механизм отказов, который вызывается эффектом «усталости» материала в паяных или сварных контактах.

Итак, перечисленные в **Табл. 15.4** основные модели ускоренных испытаний представляют собой важную часть системы оценки надёжности полупроводниковых компонентов. Большинство этих моделей опираются не на один конкретный физический механизм возникновения отказов, а позволяют учесть эффект совместного воздействия нескольких различных механизмов. Целью использования каждой из указанных моделей является определение так называемого коэффициента ускорения AF , который затем может быть пересчитан в ожидаемое время безотказной работы компонента с помощью следующего выражения:

$$T_{\text{use}} = AF \cdot t_{\text{stress}}$$

Из Рис. 15.3...15.4 видно, что расширение условий испытаний оказывает ускоряющий эффект на физические механизмы, потенциально «ответственные» за возникновение отказов полупроводниковых компонентов. Достижимый уровень ускорения зависит от параметров выбранной модели, значения которых обусловлены влиянием нескольких различных механизмов (при этом один из этих механизмов может быть доминирующим).

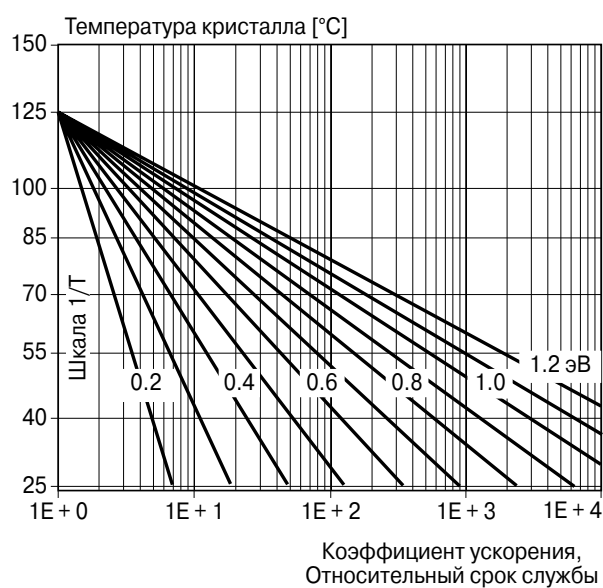


Рис. 15.3. Температурная зависимость коэффициента ускорения и относительного срока службы испытуемых изделий (модель Аррениуса).

Кривые постоянного коэффициента ускорения
(определяет относительный срок службы)

Условия испытаний: +85°C, относит. влажность 85%

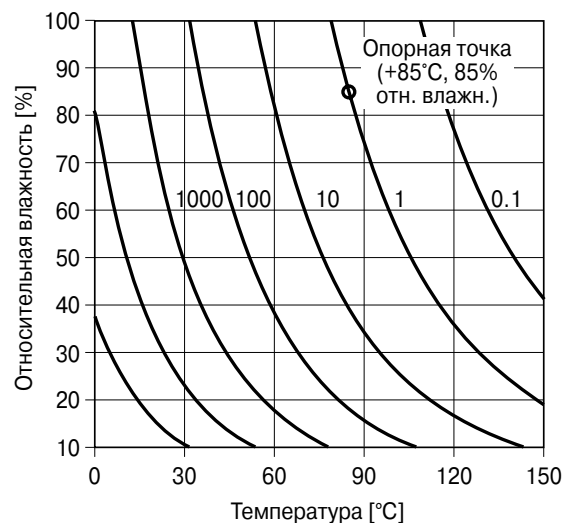


Рис. 15.4. Зависимость коэффициента ускорения и относительного срока службы испытуемых изделий от температуры и влажности (модель Пека).

16. ГЛОССАРИЙ

Настоящий глоссарий содержит термины, которые частично объясняются в данной книге, просто упоминаются или часто встречаются в специальной литературе. Основное внимание в глоссарии уделено терминам из полупроводниковой технологии, оптоэлектроники, технологии производства, схемотехники, а также электроники.

3GPP (3rd Generation Partnership Project)

Группа (консорциум), разрабатывающая спецификации для мобильной телефонии третьего поколения.

ACI (Advanced Chip Interconnect)

Усовершенствованная шина связи ИС с внешними устройствами (открытая шина).

ACL (Advanced CMOS Logic)

Усовершенствованная КМОП-логика. Новая КМОП-технология, предназначенная для использования в логических устройствах.

ACTFEL (Alternating Current Thin Film ElectroLuminescence)

Тонкоплёночные электролюминесцентные излучатели переменного тока.

Add-in

Дополнительное аппаратное средство (оборудование), встраиваемое в компьютер (см. также *Add-on*).

Add-on

1. Дополнительное внешнее аппаратное средство (оборудование), подключаемое к компьютеру (см. также *Add-in*).
2. Дополнительная программа, расширяющая функциональные возможности прикладной программы.

ADSL (Asymmetrical Digital Subscriber Line)

Асимметричная цифровая абонентская линия.

AIM (Avalanche Induced Migration)

Миграция, вызванная лавинным процессом.

ALE (Address Latch Enable)

1. Сигнал «разрешение защёлки адреса», управляющий работой полупроводниковых устройств памяти.
2. Резервный буфер хранения адреса.

AMC (Analog MicroController)

Аналоговый микроконтроллер — цифровой микроконтроллер со встроенными аналоговыми функциями.

Angled cut

Метод, используемый в соединителях оптических волноводов, позволяющий устранить отражения.

ANSI (American National Standards Institute)

Американский национальный институт стандартизации в г. Нью-Йорк, США

APD (Avalanche Photo Diode)

Лавинный фотодиод — фотодиод, в котором фототок, генерируемый вторичными носителями заряда, приводит к возникновению лавинного эффекта. Данный эффект происходит только при высокой напряжённости поля, которое может создаваться лишь в однородном граничном слое, что представляет весьма сложную технологическую задачу. Поэтому лавинные фотодиоды большой площади встречаются достаточно редко и довольно дороги.

AR coating

Антиотражающее покрытие (см. также *Покрывание*).

ARIB (Association Radio Industries and Businesses)

Японская ассоциация радиовещания и бизнеса.

AROM

1. Alterable ROM — программируемое ПЗУ (см. также *EEPROM*, *EAROM*).
2. Associative ROM — ассоциативное ПЗУ: Постоянная память с адресацией по содержанию.

ASBC (Advanced Standard Buried Collector)

Усовершенствованная стандартная структура со скрытым коллекторным слоем — усовершенствованный эпитаксиальный процесс двойной диффузии для производства биполярных ИС.

ASCII (American Standard Code for Information Interchange)

Американский стандартный код для обмена информацией. Чрезвычайно широко распространённый во всём мире (особенно когда речь идёт о небольших и персональных компьютерах) способ представления символов в виде набора кодов. Стандартный набор включает в себя 128 символов (7-битное кодирование). ASCII-код принят в качестве стандарта ССИТТ как код №5. Использование расширенной кодовой таблицы ANSI обеспечивает возможность кодировки 256 символов.

ASE (Amplified Spontaneous Emission)

Усиленное спонтанное излучение. Спонтанное излучение света в усилителях волоконно-оптических систем (значительная составляющая коэффициента шума).

ASER (Accelerated Soft Error Rate)

Методика ускоренного выявления программных ошибок ИС. Оценка чувствительности полупроводниковых модулей к ошибкам производится на основе стандартного метода SER (отношение сигнал/ошибка), дополненного воздействием радиоактивного излучения на ИС.

ASIC (Application Specific Integrated Circuit)

Специализированная заказная интегральная схема, предназначенная для работы в конкретных приложениях (см. также *Вентильная матрица*).

ASM (Application Specific Memory)

Специализированная ИС памяти.

ATM (Asynchronous Transfer Mode)

Асинхронный режим передачи данных (технология коммутации пакетов данных фиксированной длины).

ATM-F (ATM Forum)

Форум ATM (международная некоммерческая организация, которая занимается, в частности, разработкой спецификации ATM).

AVLSI (Analog Very Large Scale Integration)

Аналоговая сверхбольшая интегральная схема (СБИС).

Back end

1. В производстве полупроводниковых компонентов — завершающая стадия производства, включающая в себя финальные испытания компонентов и размещение их в корпусе.

2. В клиент-серверных приложениях — внутренний программный модуль, выполняемый на сервере.

3. В программировании — часть программы-компилятора, которая преобразует исходный код в машинный код (см. также *Компилятор*, *Интерпретатор*, *Исходный код*, *Front end*).

Back lash

Резонансные автоколебания в импульсной системе; гистерезис; остаточные колебания.

BARITT (BARrier Injected Transit Time diode)

Инжекционно-пролётный диод — то же, что и туннельный диод и IMPATT-диод. Полупроводниковый диод, имеющий на отдельных участках ВАХ отрицательное дифференциальное сопротивление.

Basic (Beginner's Ail-purpose Symbolic Instruction Code)

Бэйсик — простой и доступный для освоения язык программирования высокого уровня (его название переводится как универсальный код символических инструкций для начинающих), разработанный в середине 1960-х годов Джоном Кемени (John G. Kemeny) и Томасом Курцем (Thomas E. Kurtz).

Bathtub-кривая

U-образная кривая интенсивности отказов. Описывает статистическое распределение интенсивности отказов компонентов в течение срока их службы. На начальном этапе работы компонентов (в течение так называемого периода приработки) наблюдается определённое количество отказов. Затем их интенсивность снижается, а по мере приближения к концу срока службы компонентов — вновь возрастает. По своей форме кривая распределения отказов напоминает продольный профиль ванной (bathtub).

BCD (Binary Coded Decimal)

Двоично-десятичное представление чисел. Для записи каждой десятичной цифры числа используются четыре двоичных разряда — так называемые тетрады или полубайты. Такой способ представления чисел позволяет предотвратить ошибки округления при преобразовании в двоичный код (см. также *EBCDIC*).

BDI (Base Diffusion Isolation)

Изоляция (элементов ИС) методом базовой диффузии. Технология диэлектрической изоляции для биполярных ИС.

Bellcore

Компания Bell Communications Research (в настоящее время носит название Telcordia Technologies).

BER

1. Basic Encoding Rules — базовые правила кодировки.

2. Bit Error Rate — интенсивность (частота) битовых ошибок (см. также *BERT*). Важная количественная характеристика надёжности систем передачи данных, представляющая собой отношение числа ошибочных битов к общему числу принятых битов.

BERT (BER Test(er))

Устройство, используемое для тестирования коммуникационных устройств на предмет определения числа ошибочных битов в единицу времени.

BFL (Buffered FET Logic)

Логика на буферных полевых транзисторах. Семейство ИС, выполненных по GaAs D-MESFET-технологии.

BGA (Ball Grid Array)

Матрица шариковых выводов — тип корпуса ИС для поверхностного монтажа.

BH (Buried Hetero (laser))

Скрытый гетеро-лазер. Структура полупроводниковых лазеров, которая располагается не на поверхности подложки, а «скрыта» на определённой глубине.

BICFET (Bipolar Inversion Channel Field Effect Transistor)

Полевой транзистор с биполярным обратным каналом (с *p-n*-переходом).

BiCMOS (Bipolar CMOS)

Технология производства ИС, когда на одном полупроводниковом кристалле создаются как биполярные, так и полевые КМОП-транзисторы (см. также *BiMOS*).

BiFET (Bipolar FET)

Технология производства ИС, когда на одном полупроводниковом кристалле создаются как биполярные, так и полевые транзисторы с *p-n*-переходом (см. также *BiCMOS*).

Big-endian

Способ записи данных в регистры или устройства памяти, когда первым (в ячейку памяти с меньшим адресом) записывается старший значащий бит данных (MSB). Подобный формат поддерживается компанией Motorola, в отличие от формата little-endian, поддерживаемого компанией Intel, в соответствии с которым первым записывается младший значащий бит (LSB).

BiMOS (Bipolar MOS)

Технология производства ИС, когда на одном полупроводниковом кристалле создаются как биполярные, так и полевые МОП-транзисторы (см. также *BiCMOS*).

BIOS (Basic Input Output System)

Базовая система ввода/вывода — операционная система, реализующая основные функции компьютера. Инициализация BIOS обычно должна предшествовать загрузке рабочей операционной системы компьютера.

Bit width

Битовая ширина — количество байтов, которое процессор может последовательно обрабатывать в ходе исполнения команды. Может находиться в диапазоне от полубайта до 32 байт или более.

BJT (Bipolar Junction Transistor)

Биполярный плоскостной транзистор. Обычный транзистор, который был разработан в 1947 году Бардином (Bardeen), Бриттаном (Brittan) и Шокли (Shockley).

Blackout

Состояние, когда вследствие аварии источника питания напряжение в сети падает до нуля. Данный термин означает также сбой в работе электронного устройства (см. также *Brownout*).

Bluetooth

Технология беспроводной передачи голоса и данных (по радиоканалу).

BNC

Штыревой тип разъёма для коаксиальных кабелей («джек»), разработанный несколько десятилетий назад и по настоящее время часто применяемый в измерительном оборудовании. Аббревиатура BNC расшифровывается различными способами (Bayonet Nut Coupling, Bayonet Neill Concelman, British Naval Connector или British National

Connector); при этом все эти транскрипции относятся к одному и тому же типу разъёма.

Board

Печатная плата электронного устройства, предназначенная для размещения его компонентов (см. также *Печатная плата, PCB*).

BOL

1. Beginning of Life — период приработки (см. также *Bathtub-кривая*).

2. Behorden Online (Public Authorities Online). Действующий с 1998 года совместный проект компании Viag Interkom и IZB (Баварский центр информационных технологий), целью которого является организация связи между министерствами, муниципальными и местными органами власти в Баварии с помощью цифровой телефонной сети компании Viag Interkom.

BOM (Bill of Material)

Ведомость покупных материалов.

Bonder

Установка (как правило, автоматизированная), предназначенная для монтажа.

Bonding

Разварка — технология осуществления соединений между кристаллом и выводами корпуса в ИС и в других полупроводниковых компонентах (см. также *Проволочное соединение*).

BORSCHT (Battery feed — Overvoltage protection — Ringing — Signaling — Coding — Hybrid — Testing)

Аббревиатура, описывающая основные функции абонентских устройств в системах телефонии (Питание абонентского устройства от центральной телефонной станции / Защита от перенапряжения / Посылка вызова / Сигнализация/ Кодирование / Дифсистема — согласование двухпроводной и четырёхпроводной линии / Тестирование).

Brownout

Состояние, когда напряжение питания электронного устройства на некоторое время падает ниже нормы (см. также *Blackout, SAG*).

Bug

Ошибка в программном или аппаратном обеспечении. Аппаратная ошибка (контактная или в разводке соединений) может

быть временно устранена путём использования перемычек («патча»). Программная ошибка представляет собой ошибку в записи кода или логическую ошибку и может приводить к сбоям программы или к некорректности результатов её работы.

Burrus diode

Светодиод Барраса.

BZT (Bundesamt fur Zulassungen in der Telekommunikation)

Германское центральное бюро по оценке качества телекоммуникаций.

C (Си)

Язык программирования высокого уровня, разработанный в 1972 году Деннисом Ритчи (Dennis Ritchie) из компании Bell Laboratories. Язык получил название Си (англ. C) просто потому, что его предшественник назывался языком В.

C++

Усовершенствованная объектно-ориентированная версия языка программирования C, разработанная в начале 1980-х годов Бьёрном Строструпом (Bjarne Stroustrup) из Bell Laboratories.

C3L (Complementary Constant Current Logic)

Комплементарная логическая схема с переключением сигналов постоянного тока. Представляет собой усовершенствованную схему диодно-транзисторной логики (ДТЛ) с диодами Шотки и повышенной степенью интеграции.

CACA (Computer-Aided Circuit Analysis)

Компьютерный схемотехнический анализ.

CAD (Computer Aided (Assisted) Design)

Система автоматизированного проектирования.

CAE (Computer Aided Engineering)

Система автоматизированного конструирования (разработки).

CAMP (Computer Aided Mask Preparation)

Автоматизированное изготовление шаблонов (масок) при производстве ИС.

CAN (Control Area Network)

Разработанный Робертом Бошем (компания Bosch) протокол и шина передачи данных, которые первоначально были предназначены для использования в системах автомобильной электроники.

CAPI (Common Application Programming Interface)

Программный интерфейс общего назначения. Стандартный интерфейс, используемый при программировании линейных карт ISDN.

Carrier

1. Несущая частота.
2. В системах телекоммуникации — оператор местной связи (поставщик услуг); канал связи.
3. В микроэлектронике — кристаллодержатель.

CAS (Column Address Strobe)

Строб адреса столбца — управляющий сигнал, разрешающий приём адреса столбца при адресации микросхем DRAM (см. также *CE*).

CB (Complementary Bipolar)

Комплементарная биполярная структура (для транзисторов).

CBEMA (Computer and Business Equipment Manufacturers Association)

Американская ассоциация производителей компьютерного и офисного оборудования. Осуществляет работу по стандартизации как процессов обработки информации, так и соответствующего оборудования.

CBIC (Cell-Based IC)

Интегральная схема с архитектурой на основе стандартных ячеек.

CBR (CAS Before RAS)

Режим обновления памяти. Обеспечивает циклическую регенерацию данных в ячейках динамической памяти DRAM.

CC

1. Chip Card — микропроцессорная чип-карта.
2. Chip Carrier — кристаллодержатель.
3. Continuity Check — проверка целостности данных.

CCC (Ceramic Chip Carrier)

Керамический кристаллодержатель.

CCD (Charge Coupled Device)

Прибор с зарядовой связью (ПЗС).

CCFL (Capacitor Coupled FET Logic)

Логика на полевых транзисторах с зарядовой (ёмкостной) связью. Семейство ИС, выполненных по GaAs MESFET-технологии.

CCIR (Comite Consultatif International des Radiocommunications)

Международный консультативный комитет по радиовещанию.

CCITT (Comite Consultatif International Telegraphique et Telephonique)

Международный консультативный комитет по телеграфии и телефонии.

CCL (Composite Cell Logic)

Метод разработки специализированных заказных ИС (ASIC) на основе библиотек базовых элементов.

CCMD (Chip Carrier Mounting Device)

Устройство для монтажа кристаллодержателя.

CCPD (Charge Coupled Photodiode Array)

Фотодиодная матрица с ПЗС-регистрами.

CDI (Collector Diffusion Isolation)

Изоляция методом коллекторной диффузии.

CD-ROM (Compact Disc Read-Only Memory)

Постоянное запоминающее устройство на компакт-диске. Объём памяти такого ПЗУ превышает 650 Мбайт, а запись данных осуществляется однократно тем же способом, что и запись звуковых CD.

CE

1. Chip Enable — сигнал выбора микросхемы, разрешающий доступ к ней со стороны внешних устройств.
2. Column Enable — сигнал разрешения выбора столбца в современных микросхемах памяти (соответствует ранее употреблявшемуся сигналу CAS).

CECC (Cenelec Electronic Components Committee)

Комитет по стандартизации в области электронных компонентов. Подразделение CENELEC со штаб-квартирой в Брюсселе (см. также *ECQAC*).

CEN (Comite Europeen de Normalisation)

Европейский комитет по стандартизации.

CENELEC (Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique)

Европейский комитет по электротехническим стандартам. Некоммерческая организация со штаб-квартирой в Брюсселе, созданная в 1973 году в результате слияния двух европейских организаций: CENEL-

COM и CENEL и объединяющая национальные комитеты по стандартизации в области электротехники и электроники 28 европейских стран, а также (в качестве ассоциированных членов) 8 национальных комитетов из Восточной Европы и стран балканского полуострова.

CEPT (Conference of European Postal and Telecommunication Administrations)
Европейская конференция администраций почт и электросвязи.

CerDIP

Керамический плоский корпус ИС с двухрядным расположением выводов.

Cerpack

Керамический корпус для электронных компонентов.

CFT (Chirp Fourier Transform)

Преобразование Фурье, которое используется для анализа характеристик лазерных диодов при линейно-частотной модуляции.

Chirp

1 Импульс с линейной частотной модуляцией. Сдвиг центральной частоты лазера путём изменения инжекционного тока (см. также *CFT*).

2. Паразитная частотная модуляция сигнала радара.

CIC (Customized Integrated Circuit)

Заказная интегральная схема (см. также *ASIC*).

CICC (Contactless IC Card)

Бесконтактная чип-карта.

CID (Charge Injection Device)

Прибор с инъекцией заряда.

CIM (Computer Integrated Manufacturing)

Комплексное автоматизированное производство. Использование компьютерных технологий как при разработке, так и в процессе производства полупроводниковых компонентов.

CISC (Complex Instruction Set Computer)

Архитектура процессора с полным набором команд (см. также *RISC*).

C-LCC (Ceramic Leaded Chip Carrier)

Керамический выводной кристаллодержатель (см. также *PLCC*).

CLIW (Configurable Long Instruction Word)

Архитектура DSP-процессоров, предусматривающая поддержку конфигурируемых команд с повышенной разрядностью.

CLSI (Custom Large Scale Integration)

Заказная полупроводниковая ИС высокой степени интеграции.

CMFS (Ceramic Multilayer Functional Substrate)

Керамическая многослойная функциональная подложка.

CML (Current Mode Logic)

Логическая схема на переключателях тока (ТПЛ-логика), основанная на использовании биполярной технологии (например, ЭСЛ). Высокая скорость переключения достигается за счёт того, что полупроводниковые ключи остаются в ненасыщенном состоянии.

CMMU (Cache Memory Management Unit)

Блок управления кэш-памятью.

CMOS (Complementary MOS)

Комплементарная МОП-технология. См. *КМОП*.

CMRR (Common Mode Rejection Ratio)

Коэффициент ослабления синфазного сигнала.

CoB (Chip on Board)

«Кристалл-на-плате» — технология разработки гибридных схем, когда полупроводниковые чипы размещаются без корпусов непосредственно на печатной плате устройства.

CODEC

1. COder/DECoder (Кодер/Декодер) — важнейший модуль, входящий в состав устройств цифровой телефонии и предназначенный для преобразования голосового сигнала из аналоговой формы в цифровую и наоборот.

2. COmpressor/DECompressor (Компрессор/Декомпрессор) — устройство, которое предназначено для сжатия динамического диапазона (компрессии) сигнала и/или для декомпрессии сигналов.

COG (Chip on Glass)

Полупроводниковый кристалл на стеклянной подложке.

COMFET (Conductivity Modulated FET)

Полевой транзистор с модуляцией проводимости (см. также *IGBT*).

C-PGA (Ceramic Pin Grid Array)

Керамический корпус ИС с матричным расположением штырьковых выводов.

Cpi (Clock cycles Per average Instruction)

Среднее количество циклов тактовой частоты на одну команду (одна из характеристик процессора).

CPLD (Complex Programmable Logic Device)

Многофункциональное программируемое логическое устройство.

CPU (ЦПУ)

Центральное процессорное устройство (см. также *MPU*).

CRC (Cyclic(al) Redundancy Check)

Контроль при помощи циклического избыточного кода. Метод определения ошибок при передаче данных. Устройство-отправитель посылает совместно с данными предварительно вычисленную контрольную сумму. Устройство-получатель, в свою очередь, после приёма данных вычисляет контрольную сумму и сравнивает её с исходной; если совпадения нет, то генерируется сообщение об ошибке передачи данных (см. также *Чётность*).

CRD (Capacitor Resistor Diode)

Цепь (например, в выпрямителях), состоящая из резистора, конденсатора и диода.

CS (Chip Select)

Сигнал выбора микросхемы.

CSIC (Customer Specific IC)

Заказная специальная интегральная микросхема (см. также *ASIC*).

CSP

1. Channeled Substrate Planar — канальчатая планарная подложка. Полупроводниковая структура, лежащая в основе большинства оптополупроводниковых компонентов.

2. Chip Scale Package — корпус, размеры которого изменяются в соответствии с размером кристалла.

3. Chip Size Packaging — технология изготовления корпусов, размеры которых практически совпадают с размерами кристалла ИС.

CTD (Charge Transfer Device)

Прибор с зарядовой связью (ПЗС), см. также *CCD*.

CTR (Current Transfer Ratio)

Коэффициент передачи тока.

CVD (Chemical Vapor Deposition)

Процесс химического осаждения из газовой фазы.

CW (Continuous Wave)

Незатухающая гармоническая волна.

DAM (Direct Access Memory)

Память с прямым доступом.

DC

1. Dark Current — темновой ток.

2. Direct Current — постоянный ток.

3. Duty Cycle — коэффициент заполнения импульсного сигнала.

DCFL (Direct Coupled FET Logic)

Логические схемы на полевых транзисторах с непосредственными связями. Используются в GaAs E-MESFET-технологии и/или в D-MESFET или HEMT.

DCPBH (Double Channel Planar Buried Heterostructure)

Двухканальная планарная скрытая гетероструктура.

DCTL (Direct Coupled Transistor Logic)

Транзисторные логические схемы с непосредственными связями. Одна из наиболее «древних» архитектур цифровых ИС, в которой транзисторные каскады связаны между собой гальванически.

DDR (Double Data Rate)

Двойная скорость передачи данных. Архитектура микросхем ОЗУ, обеспечивающая увеличенную производительность, поскольку чтение или запись данных в ячейки памяти осуществляется как по спадающему, так и по нарастающему фронту тактового сигнала.

DECT (Digital European Cordless Telecommunications)

Европейский стандарт на цифровую беспроводную связь.

DEK (Doppel-EuropaKarte)

Печатная плата, размер которой в два раза превышает размер стандартной платы europocard (100×160 мм); используется в промышленных компьютерах и т.п.

Depletion-type (mode) FET

Полевой транзистор, работающий в режиме обеднения; обеднённый полевой транзистор.

DFB (Distributed FeedBack)

Распределённая обратная связь. Метод увеличения когерентности и уменьшения длины волны для лазерных диодов.

DFM (Design for Manufacturability)

Проектирование с учётом требований производства.

DFT

1. Design for Testability — проектирование с учётом тестопригодности.
2. Discrete Fourier Transform — дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Математическая операция, используемая при цифровой обработке сигналов (см. также *FFT* и *IFDT*).

DG (Diode Gate)

Диодный вентиль.

DH (Double Heterostructure)

Двойная гетероструктура. Используется в оптических полупроводниковых приборах.

DIAC (DIode Alternating Current switch)

Диодный переключатель переменного тока; динистор. Четырёхслойный диод или тиристор (см. также *TRIAC*).

Die bonder

Автоматизированная установка, предназначенная для монтажа (посадки) полупроводниковых кристаллов электронных компонентов в корпус компонента или на печатную плату (см. также *Bonding*).

Die shrink

Совершенствование процесса производства полупроводниковых чипов (уменьшение технологической нормы). При проектировании электронных устройств часто необходимо уменьшить размеры уже существующего модуля. Такую задачу можно решить, если полупроводниковые компоненты будут иметь меньшие габариты. Одним из апробированных методов является уменьшение размеров отдельных структур кристалла, что с технологической точки зрения является далеко не тривиальной задачей.

DIFET (Dielectrically Isolated FET)

Полевой транзистор с диэлектрической изоляцией.

DIL (Dual In-line)

Двухрядное расположение выводов. Технология размещения полупроводниковых компонентов в корпусе ИС с двумя параллельными рядами выводов.

DIMM (Dual In-line Memory Module)

Микросхема памяти в корпусе с двухрядным расположением выводов (с обеих сторон корпуса).

DIMOS (Double Diffused Ion Implanted MOS)

Ионно-имплантированная МОП-структура с двойной диффузией.

DIN (Deutsches Institut fur Normung)

Германский институт стандартизации.

DIP (Dual In-line Package)

Корпус с двухрядным расположением выводов.

Disable

Отключено, запрещено, заблокировано, находится в неактивном состоянии.

DKE (Deutsche Elektrotechnische Kommission)

Германская комиссия по стандартизации в области электротехнических, электронных и информационных технологий (подразделение DIN и VDE).

DL (Diode Logic)

Диодная логика.

DMA (Direct Memory Access)

Прямой доступ к памяти. Контроллер DMA берёт на себя управление работой системной шины и осуществляет пересылку данных между модулями памяти и/или периферийными устройствами с большей эффективностью, чем это делалось бы с использованием центрального процессорного устройства.

D-MESFET (Depletion Mode Metal Semiconductor FET)

Полевой транзистор с затвором Шоттки, работающий в режиме обеднения (см. также *E-MESFET*).

DMF (Dielectric Multilayer Filter)

Диэлектрический многослойный фильтр.

DMOS

1. Diffusion Metal Oxide Semiconductor — диффузионная МОП-структура.
2. Double Diffused MOS — МОП-структура, изготовленная методом двойной диффузии.

DPL (Diode Pumped Solid State Laser)

Твердотельный лазер с диодной накачкой.

DPPM (Defective Parts per Million)

Дефектных частиц на миллион.

DRAM (Dynamic RAM)

Динамическая память с произвольным доступом. Ячейка памяти DRAM фактически представляет собой очень маленький конденсатор, сформированный в полупроводниковом кристалле и управляемый через МОП-транзистор. Состояние заряда конденсатора определяет открытое или закрытое состояние транзистора (что соответствует логическим 1 и 0). В случае спонтанного разряда конденсатора информация, хранящаяся в ячейке памяти, будет потеряна. Следовательно, содержимое ячеек памяти должно регулярно обновляться («регенерироваться»), поэтому память данного типа и называется динамической. Главным достоинством технологии DRAM является высокая плотность ячеек памяти (т.е. малая площадь кристалла, приходящаяся на 1 бит хранимой информации), благодаря чему стоимость ОЗУ этого типа оказывается самой низкой. К недостаткам следует отнести необходимость использования специальных логических схем регенерации памяти, а также большее, нежели у микросхем ОЗУ других типов, время доступа к памяти.

DRC (Design Rule Check)

Контроль (за соблюдением) проектных норм. Проверка соответствия проектным нормам в системах автоматизированного проектирования (см. также *CAD*, *ERC*).

DRTL (Diode Resistor Transistor Logic)

Диодно-резисторно-транзисторная логика. Одна из архитектур, используемых при создании логических микросхем (см. также *TTL*, *DTL*).

DSL (Digital Subscriber Line)

Цифровая абонентская линия.

DSP (Digital Signal Processor)

Процессор цифровой обработки сигналов. Интегральная схема, предназначенная для быстрой обработки аналоговых сигналов в

аудио, коммуникационных системах и в системах обработки изображений, а также для записи, хранения и управления данными. Применение DSP-процессоров позволяет упростить выполнение операций, которые невозможно или очень сложно выполнить с использованием аналоговых технологий.

DTL (Diode Transistor Logic)

Диодно-транзисторная логика. Логическая схема, при которой логические операции осуществляются с использованием диодных вентилях, а транзисторные каскады служат для усиления и инвертирования уровней напряжений.

DTZL (Diode Transistor with Zener Diode Logic)

Диодно-стабилитронно-транзисторная логика. Вариант диодно-транзисторной логики, в котором для снижения уровня помех используются стабилитроны.

Dummy

Макет, имитация.

DVB (Digital Video Broadcasting)

Цифровое ТВ вещание.

DWV (Dielectric Withstanding Voltage)

Напряжение пробоя диэлектрика.

E/O (Electrical to Optical)

Электронно-оптический преобразователь.

E2PROM

См. *EEPROM*.

EACEM (European Association of Consumer Electronics Manufacturers)

Европейская ассоциация производителей бытовой электроники со штаб-квартирой в Брюсселе, Бельгия.

EAM (Electroabsorption Modulator)

Электроадсорбционный модулятор.

EAP (Electroabsorption Avalanche Photodiode)

Электроадсорбционный лавинный фотодиод.

EAPLA (Electrically Erasable Programmable Logic Array)

Электрически стираемая программируемая логическая матрица.

EAROM (Electrically Alterable ROM)

Электрически перепрограммируемое ПЗУ (ЭППЗУ). В отличие от EEPROM (ЭСП-

ПЗУ), позволяет осуществлять не полное, а постраничное стирание данных (подобно тому, как это делается в микросхемах флэш-памяти); некоторые типы ЭППЗУ обеспечивают управление доступом к отдельным ячейкам памяти.

EBCDIC (Extended Binary Coded Decimal Interchange Code)

Расширенный двоично-десятичный код, в котором для представления каждого десятичного разряда используются не 4, а 8 бит.

EBIC (Electron Beam Induced Current)

Ток, индуцированный электронным лучом.

ECIL (Emitter Coupled Injection Logic)

Эмиттерно-связанная инжекционная логика.

ECL (Emitter Coupled Logic)

Интегральные схемы на основе эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ). Их применение наиболее эффективно там, где требуется высокая нагрузочная способность драйвера (например, в качестве драйверов шинных интерфейсов). При данной технологии требуемая нагрузочная способность достигается за счёт использования дополнительных эмиттерных повторителей на биполярных транзисторах.

ЕСМА (European Computer Manufacturers Association)

Европейская ассоциация производителей компьютеров.

ECTF (Enterprise Computer Telephony Forum)

Форум по корпоративной компьютерной телефонии (международный консорциум производителей в области компьютерной телефонии).

ECTL (Emitter Coupled Transistor Logic)

Эмиттерно-связанная транзисторная логика.

EDA (Electronic Design Automation)

Автоматизация проектирования электронных устройств. Программа автоматизированного проектирования печатных плат и полупроводниковых микросхем (см. также *CAE*, *CAD*).

EDO (Extended Data Out)

Архитектура ОЗУ с расширенными (по времени) возможностями вывода данных. Сигнал на выходе данных удерживается в течение более длительного (по сравнению с первыми модификациями микросхем DRAM) периода времени, чем обеспечива-

ется более надёжное считывание данных. Режим EDO фактически использовался только в микросхемах FPM DRAM.

EECA (European Electronic Component Manufacturers Association)

Европейская ассоциация производителей электронных компонентов.

EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM)

Электрически стираемое программируемое ПЗУ (ЭСППЗУ). Операция стирания данных воздействует на весь массив данных в целом.

EFL (Emitter Follower Logic)

Логические схемы на эмиттерных повторителях.

EFQM (European Foundation for Quality)

Европейский фонд управления качеством.

EI (Electron Impact Ionization)

Электронная ударная ионизация.

EIA (Electronic Industries Association of America)

Американская ассоциация электронной промышленности со штаб-квартирой в Вашингтоне.

EIAJ (Electronic Industries Association of Japan)

Ассоциация электронной промышленности Японии.

EICTA (European Information and Communications Technology Industry Association)

Европейская промышленная ассоциация в области информационных и коммуникационных технологий.

EIL (Electron Injection Laser)

Лазер с инжекцией электронов.

ELD (Electroluminescent Diode)

Электролюминесцентный диод.

ELPC (Electroluminescent Photoconductive)

Электролюминесцентная фотопроводимость.

ELSI (Extremely Large Scale Integration)

Данный термин по отношению к электронным компонентам означает сверхвысокую степень интеграции (см. также *ULSI*, *VLSI*).

EMC (ElectroMagnetic Compatibility)

Электромагнитная совместимость. Комплексное понятие, включающее в себя как способность электрической схемы проти-

востоять воздействию внешних электромагнитных излучений, так и её характеристики с точки зрения собственных электромагнитных излучений в окружающую среду (см. также *Экранирование*, *EMS*).

E-MESFET (Enhancement-Mode Metal Semiconductor FET)

Полевой транзистор с затвором Шоттки, работающий в режиме обогащения (см. также *D-MESFET*).

EMI (ElectroMagnetic Interference)

Электромагнитное излучение (помехи) (см. также *EMC*).

EMR (ElectroMagnetic Radiation)

Электромагнитное излучение (см. также *EMC*).

EMS (Electromagnetic Susceptibility)

Восприимчивость к воздействию электромагнитных помех (см. также *EMC*).

Enable

Разрешено, разблокировано, переведено в активное состояние.

Enhancement-type FET (Enhancement-mode field-effect transistor)

Полевой транзистор, работающий в режиме обогащения; обогащённый полевой транзистор.

EOL (End of Life)

Окончание срока службы (см. также *Bathtub-кривая*).

EOLM (Electro-Optic Light Modulation)

Электрооптическая модуляция.

EOS (Electrical Overstress)

Электрическое перенапряжение.

EPLD (Erasable (также Electrically) Programmable Logic Device)

Стираемое программируемое логическое устройство или логическое устройство с электрическим программированием (см. также *PLD*).

EPROM (Erasable Programmable ROM)

Стираемое программируемое ПЗУ (СП-ПЗУ). Модуль (микросхема) постоянной памяти с возможностью стирания данных путём ультрафиолетового облучения кристалла через специальное кварцевое окошко в корпусе ИС. При этом стиранию подвергаются все данные; выборочное стирание информации (в отдельных ячейках) невозможно.

EQA (European Quality Award)

Европейский приз качества.

ERA (Electrically Reconfigurable Array)

Электрически реконфигурируемая матрица элементов.

ERC (Electrical Rule Check)

В системах автоматизированного проектирования — проверка соответствия разрабатываемой схемы правилам проектирования электрических цепей (см. также *DRC*).

ES (European Standard)

Европейский стандарт (см. также *CEN*, *CENELEC*).

ESD

1. ElectroStatic Discharge — электростатический разряд. Процесс быстрого «перетекания» электростатического заряда с одного объекта на другой. Даже если этот заряд невелик, существует значительный риск повреждения отличающихся малыми размерами полупроводниковых структур, особенно МОП-структур. Поэтому при работе с незащищёнными от ESD полупроводниковыми компонентами очень важно соблюдать меры предосторожности.

2. Electrostatic Sensitive Device — устройство, чувствительное к воздействию электростатического разряда.

ESDS (Electrostatic Discharge Sensitive Devices)

Устройства, чувствительные к воздействию ESD.

ESIA (European Semiconductor Industry Association)

Европейская ассоциация полупроводниковой промышленности.

ETOM (Electron Trapping Optical Memory)

Оптическая память на захваченных электронах.

ETSI (European Telecommunication Standards Institute)

Европейский институт стандартов в области телекоммуникаций.

EVO (Elektrotechnischer Verein Oster-reichs)

Австрийское электротехническое общество со штаб-квартирой в Вене.

FAMOS (Floating Gate Avalanche MOS)

МОП-транзистор с «плавающим» затвором и лавинной инжекцией заряда. Основной компонент флэш-памяти.

FC (Flip Chip)

Монтаж методом «перевернутого кристалла», предусматривающий установку монокристаллической безвыводной ИС в гибридной схеме с помощью специальной технологии межсоединений.

FCHI (Flip Chip Hybrid Integration)

Гибридная ИС с использованием технологии «перевернутого кристалла» (Flip Chip).

FCT (Fast Cosine Transform)

Быстрое косинусное преобразование (см. также *FFT*).

FDDI (Fiber Distributed Data Interface)

Распределённый интерфейс передачи данных по волоконно-оптическим каналам. При использовании протокола ANSI X3T9.5 в сети с кольцевой топологией скорость передачи данных составляет 100 Мбит/с (см. также *CDDI*).

FEFET (FerroElectric FET)

Полевой транзистор с сегнетоэлектрическим затвором.

FEL (Free Electron Laser)

Лазер на свободных электронах.

FEM (Finite Element Method)

Метод конечных элементов. Алгоритмический метод численного анализа сложных систем, использующий их разделение на большое количество элементарных модулей. Каждый из них затем анализируется отдельно, а результаты комбинируются в соответствии с определёнными правилами. Реализация данного метода требует применения больших вычислительных мощностей, однако возможности современных компьютеров этому вполне соответствуют.

FET (Field Effect Transistor)

Полевой транзистор.

FFC (Flexible Flat Conductor)

Гибкий плоский проводник.

FFT (Fast Fourier Transform)

Быстрое преобразование Фурье (БПФ). Математическая операция, предложенная знаменитым французским математиком Фурье, которая позволяет «разложить» любую периодическую функцию в ряд отдельных гармоник основной частоты. Подобная операция в процессорах цифровой обработки сигналов (DSP) осуществляется в режиме реального времени (см. также *DFT*).

FIFO (First In, First Out)

«Первым пришёл — первым вышел». Способ обработки потоковых данных, когда первый элемент в очереди ожидания обслуживается первым (см. также *FILO*).

FILO (First In, Last Out)

«Первым вошёл — последним вышел». Основополагающий принцип обработки потоковых данных, в соответствии с которым элемент данных, первым поступивший в устройство (например, в стек), отправляется в конец очереди ожидания и обслуживается последним (см. также *FIFO*).

Fine pitch

Технология корпусирования ИС, позволяющая уменьшить расстояние между выводами (шаг выводов) до величины менее чем 0.1 мм.

Firmware

Микропрограммное обеспечение — программа, предназначенная для управления тем или иным аппаратным средством и постоянно находящаяся («прошитая») в его встроенной памяти (например, BIOS).

Fit (Failures in Time)

Единица измерения интенсивности отказов компонентов («число отказов в единицу времени»). 1 fit = 1 отказ / 10⁹ часов (см. также *Интенсивность отказов*).

Flake

Фрагмент полупроводникового чипа.

FM (Frequency Modulation)

Частотная модуляция. Метод модуляции путём изменения частоты сигнала несущей. Это изменение частоты прямо пропорционально амплитуде модулирующего сигнала (см. также *AM*, *PM*, *Модуляция*).

Foundry

Компания-субподрядчик. Ситуация, когда компания-разработчик полупроводниковых компонентов размещает заказ на изготовление готовых полупроводниковых пластин у стороннего производителя.

FPC (Flexible Printed Circuit)

Гибкая печатная плата (см. также *RPC*).

FPGA (Field Programmable Gate Array)

Вентильная матрица с эксплуатационным программированием. Логический модуль, который может быть запрограммирован пользователем самостоятельно (см. также *FPLA*).

FPLA (Field (или Fuse) Programmable Logic Array)

Логическая матрица, программируемая пользователем путём пережигания плавких перемычек (см. также *FPGA*).

FPM (Fast Page Mode)

Быстрый постраничный режим. Режим быстрого постраничного обращения к микросхеме динамического ОЗУ, обеспечивающий высокую производительность при передаче потоков данных. Необходимость осуществлять последовательный опрос (обращение) к содержимому целой страницы противоречит принципу произвольного доступа к памяти, однако на практике это сказывается не сильно, так как обычно данные записываются в последовательные ячейки памяти.

FPU (Floating-Point Unit)

Математический сопроцессор для операций с плавающей точкой. Входит в состав ЦПУ и специально предназначен для работы с числами в формате с плавающей точкой.

FQFP (Fine pitch QFP)

Корпус типа QFP с уменьшенным шагом выводов.

FRAM (Ferro-electrical RAM)

Ферроэлектрическое ОЗУ.

Front end

1. В полупроводниковой промышленности — начальный этап производства полупроводниковых компонентов.
2. Блок предварительной обработки данных. Компьютерный или процессорный блок, который обрабатывает и подготавливает данные для передачи в другой процессор.
3. В коммуникационных технологиях — входное устройство. Компьютер, расположенный между линиями передачи сигнала и главным компьютером (хостом), и разгружающий хост от задач управления процессом передачи данных (см. также *Back end*).

FSA (Fabless Semiconductor Association)

Ассоциация фирм-производителей полупроводниковой техники, не имеющих собственных производственных мощностей (fabless). Организована в 1994 году в Нью-Йорке, с 2007 года переименована в GSA (Глобальный альянс производителей полупроводников).

Full-custom IC

Полностью заказная ИС. Интегральная микросхема, разработанная по заказу пользователя; весь цикл производства такой ИС осуществляется на заводе компании-производителя полупроводниковых компонентов.

Fuzzy logic

Нечёткая логика. Концепция, в основе которой лежит принцип использования приблизительных правил управления информационными потоками, т.е. в зависимости от обстоятельств.

GaAs (Gallium Arsenide)

Химическое обозначение арсенида галлия. Полупроводниковый материал с высокой подвижностью носителей заряда, который хорошо подходит для применения в условиях ВЧ полей и в датчиках Холла.

GAL (Generic Array Logic)

Типовая матричная логика.

GBL (GigaBit Logic)

Гигабитная логика. Быстродействующая логическая схема, обеспечивающая скорость обработки данных более 1 Гбит/с.

Ge (Germanium)

Химическое обозначение германия — 32-го элемента периодической таблицы. Германий использовался при изготовлении первых транзисторов, а затем был в основном заменён кремнием (Si), который обладает лучшими свойствами.

GLSI (Giant Large Scale Integration)

Свербольшая интегральная схема (СБИС), кристалл которой содержит более 100 млн транзисторов (см. также *ULSI*, *ELSI*).

GMCF (Global Mobile Commerce Forum)

Всемирный форум мобильной торговли.

GMR (Giant Magneto Resistor)

Резистор, принцип работы которого основан на гигантском магнито-резистивном эффекте. Этот резистор чувствителен к магнитным полям и состоит из множества чрезвычайно тонких слоёв, изготовленных из магнитного материала.

GPR (General-Purpose Register)

Регистр общего назначения.

GPS (Global Positioning System)

Глобальная (спутниковая) система навигации и определения местоположения.

Graded-index fiber

Градиентное волокно, волокно с плавно изменяющимся (в поперечном сечении) показателем преломления (см. также *Световод*).

GSM (Global System for Mobile Communication)
Глобальная система мобильной связи.

GTO (Gate Turn-Off thyristor)
Запираемый тиристор.

HBT (Heterojunction Bipolar Transistor)
Биполярный гетеротранзистор.

HDGA (High Definition Gate Array)
Вентильная матрица высокого разрешения.

HDL (Hardware Description Language)
Язык программирования для описания технических (аппаратных) средств интегральных схем; в частности, поддерживает расчёт и согласование электрических процессов в ИС (см. также *Verilog*, *VHDL*).

HDLC (High level Data Link Control)
Высокоуровневый протокол управления каналом передачи данных. Этот стандартизированный ISO бит-ориентированный синхронный протокол управляет передачей данных на 2-м (канальном) уровне в модели взаимодействия открытых систем OSI. Передача осуществляется фреймами переменной длины и определённой организационной структуры.

HEMT (High Electron Mobility Transistor)
Транзистор с высокой подвижностью электронов (см. также *HJBT*).

HEXFET (HEXagonal cell FET)
Полевой транзистор с гексагональными *p*-областями.

HFET (Heterostructure FET)
Полевой транзистор на гетероструктуре.

HC
1. High Voltage Integrated Circuit — высоковольтная ИС.
2. Hybrid Integrated Circuit — гибридная ИС.

HIFET (Heterojunction Ion-implanted Field Effect Transistor)
Полевой транзистор, изготовленный методом ионной имплантации, с управляющим гетеропереходом. См. также *HJBT*.

HIGFET (Heterostructure Insulated Gate Field Effect Transistor)
Полевой транзистор с изолированным затвором на гетероструктуре.

HJBT (HeteroJunction Bipolar Transistor)
Биполярный транзистор на гетеропереходах.

H-LPBGA (High Temperature Low Profile BGA)
Низкопрофильный и рассчитанный на использование в условиях высоких температур окружающей среды корпус типа BGA для поверхностного монтажа ИС.

HMOS (High density Metal Oxide Semiconductor)
Высококачественная МОП-структура. Используется для изготовления полевых транзисторов.

HNIL (High Noise Immunity Logic)
Логическая схема с высокой помехоустойчивостью.

HTL (High Threshold Logic)
Высокопороговая логическая схема.

HTML (HyperText Markup Language)
Язык разметки гипертекста, позволяющий создавать в текстовых документах перекрёстные ссылки на веб-страницы в Интернете.

HVIC (High Voltage IC)
Высоковольтная ИС.

I2L (Integrated Injection Logic)
Интегральные инжекционные логические схемы (И2Л). Относятся к семейству БИС на основе биполярной логики (см. также *III*, *И2Л*).

ICE (In-Circuit Emulator)
Внутрисхемный эмулятор. Встроенный аппаратно-программный модуль, осуществляющий функцию симуляции работы схемы (см. также *Эмуляция*).

ICT (In-Circuit Testing)
Внутрисхемное тестирование. Тестирование с использованием целевой схемы (см. также *ICE*).

IEA (International Electrical Association)
Международная электрическая ассоциация.

IEC (International Electrotechnical Commission)
Международная электротехническая комиссия. Ведущая международная организация по разработке стандартов в области электротехники.

IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)

Институт инженеров по электротехнике и электронике со штаб-квартире в Нью-Йорке. Организация, осуществляющая в США те же функции, что VDE в Германии, а именно разработку стандартов в области электроники и подготовку их к законодательному утверждению.

IEEE-488

Предложенный компанией Hewlett Packard стандарт параллельного интерфейса, использующегося, главным образом, для связи компьютера с измерительным оборудованием. Кроме него, могут применяться такие интерфейсы, как GPIB (General-Purpose Interface Bus — универсальная шина интерфейса) или IEC (с другими типами разъёмов).

IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor)

Биполярный транзистор с изолированным затвором с увеличенной инжекцией.

IFL (Integrated Fuse Logic)

Интегральные логические схемы с плавкими перемычками. Предназначены для реализации концепции вентильных матриц, программирование функций которых осуществляется пользователем.

IFU (Instruction Fetch Unit)

Блок выборки команд.

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Биполярный транзистор с изолированным затвором. MOSFET, разработанный компанией Siemens. Объединяет преимущества MOSFET и биполярных транзисторов. Имеет чрезвычайно низкое сопротивление в открытом состоянии и поэтому хорошо подходит для работы в качестве силового ключа.

IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor (Transistor))

Запираемые тиристоры с интегрированным блоком управления.

IGFET (Insulated Gate FET)

Полевой транзистор с изолированным затвором.

IGT (Insulated Gate Transistor)

Полевой транзистор с изолированным затвором. Компонент силовой электроники в CMD-технологии (см. также *IGBT*).

IIL (Integrated Injection Logic)

См. *I²L*.

ILD (Injection Laser Diode)

Инжекционный лазерный диод.

IMOS (Ion-implanted MOS)

МОП-структура с ионной имплантацией.

IMPATT (Impact Avalanche Transit Time diode)

Лавиннопролётный диод.

IOC (Integrated Optical Circuit)

Оптическая ИС.

IOLC (Integrated Optical Logic Circuit)

Оптическая логическая ИС.

IOM (ISDN-Oriented Modular interface)

Модульный интерфейс сети ISDN. Стандартный интерфейс, который разработан компанией Siemens и позволяет абоненту сети ISDN подобрать наилучшую конфигурацию оборудования.

IP (Instruction Pointer)

Указатель текущей команды.

IPC (Institute for interconnecting and Packaging electronic Circuits)

Институт по реализации межсоединений и корпусированию интегральных электронных схем.

IPG (In-Plan Gate)

Транзисторы с планарным затвором; в технологии цифровых ИС могут использоваться как альтернатива КМОП.

IPLSI (Intelligent Power Large Scale Integration)

Интеллектуальная силовая большая интегральная схема.

IrDA (Infrared Data Association)

Ассоциация по инфракрасным технологиям передачи данных. Созданная в 1993 году, эта организация объединяет поставщиков компьютеров, полупроводниковых компонентов и телекоммуникационного оборудования с целью выработки стандартов по инфракрасным системам обмена данными между компьютерами и периферийным оборудованием.

IREDD (InfraRed Emitting Diode)

Инфракрасный светодиод.

IRLD (InfraRed Laser Diode)

Инфракрасный лазерный диод.

ISAM (Indexed-Sequential Access Method)

Индексно-последовательный метод поиска или доступа к данным, когда каждая запись («порция» данных) в файле снабжена собственным ключом, обращение к которому реализуется с помощью индексов. Этот метод применяется при работе с базами данных или подобными им программами, которые предполагают ввод и сохранение несортированных данных.

ISDN (Integrated Services Digital Network)

Цифровая сеть с интеграцией услуг. Обще-доступная телефонная сеть, базирующаяся на цифровых технологиях передачи данных, благодаря чему имеется возможность предоставления пользователям целого набора дополнительных услуг. Базовая скорость передачи данных по одному ISDN-каналу составляет 64 Кбит/с. Все услуги, обеспечивающие передачу голоса, текстовой и цифровой информации, объединены в рамках одной коммуникационной сети, и доступ к ним осуществляется по одному и тому же запросу.

ISFET (Ion-Sensitive FET)

Полевой транзистор с изменением концентрации ионов (ионно-селективный полевой транзистор). Полевой транзистор со специальным изолирующим слоем.

ISL (Integrated Schottky Logic)

Интегральные логические схемы с диодами Шоттки; данная технология используется в заказных ИС.

ISO (International Standardization Organization)

Международная организация по стандартам со штаб-квартирой в Женеве (см. также *OSI*).

ITG (InformationsTechnische Gesellschaft)

Общество по информационным технологиям (подразделение *VDE*).

ITO (Indium Tin Oxide)

Оксид индия и олова. Прозрачный материал для оптоэлектронных компонентов.

ITU (International Telecommunication Union)

Международный союз электросвязи. Всемирная организация, занимающаяся общими вопросами развития телекоммуникационной индустрии.

ITU-T

Подразделение ITU, разрабатывающее международные стандарты в области телекоммуникаций (ранее называлось *CCITT*).

JCCD (Junction Charge Coupled Device)

ПЗС с *p-n*-переходами.

JEDEC (Joint Electronic Device Engineering Council)

Объединённый технический совет по электронным приборам. Организация, базирующаяся в США и занимающаяся стандартизацией электронных компонентов.

JFET (Junction FET)

Полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом. Был предложен Шокли (W. Shockley) в 1952 году и впервые изготовлен Дэси (G. C. Dacey) и Росом (I. M. Ross) в 1953 году.

KEMA (Keuring van Elektrische Materialen)

Голландская организация, имеющая право официально испытывать электрические материалы, со штаб-квартирой в г. Арнем.

LBIC (Laser Beam Induced Current)

Ток, наведённый лазерным излучением.

LCA (Logic Cell Array)

Матрица логических элементов.

LCC:

1. Lateral Charge Control — боковое управление зарядом (термин, относящийся к технологии создания МОП-структур).
2. Leaded Chip Carrier — кристаллодержатель с выводной рамкой.
3. Leadless Chip Carrier — безвыводной кристаллодержатель.
4. Liquid Crystal Cell — жидкокристаллическая ячейка.
5. Logic Control Cell — управляющая логическая ячейка.

LCCC (Leadless Ceramic Chip Carrier)

Керамический кристаллодержатель без выводной рамки.

LCD (Liquid Crystal Display)

Жидкокристаллический дисплей. Устройство вывода визуальной информации, которое представляет собой тонкий слой поляризованных жидких кристаллов, размещённых между двумя плоскими прозрачными электродами. Управление ячейкой (пикселем) дисплея осуществляется с помощью сетки из электродов. Под воздействием

приложенного к выбранной ячейке электрического поля молекулы жидкого кристалла «разворачиваются» вдоль силовых линий электрического поля; при этом образуется структура, которая поляризует входящий свет. Поляризационный фильтр, выполненный в форме пластины и расположенный над электродами, блокирует прохождение поляризованного света. Таким образом, данный пиксель будет отображаться как чёрная (неотражающая) точка на экране.

LCDTL (Low Current DTL)

Интегральная схема диодно-транзисторной логики с малым током потребления.

LCOS (Liquid Crystal on Silicon)

«Жидкий кристалл-на-кремнии». Технология производства микродисплеев, когда ЖК-модуль интегрируется непосредственно в чип микроконтроллера.

LD (Laser Diode)

Лазерный диод.

LDD (Lightly Doped Drain)

Сток со слабым легированием.

LDR (Light Dependent Resistor)

Фоторезистор.

LED (Light Emitting Diode)

Светодиод.

LEOS (Lasers and Electro-Optics Society)

Общество «Лазеры и Электрооптика». Создано институтом IEEE.

LEP (Light Emitting Polymers)

Светоизлучающий полимер.

LFPGA (Low Fine pitch BGA)

Корпус BGA для поверхностного монтажа с низким профилем и уменьшенным шагом выводов.

LGA (Land Grid Array)

Корпус для поверхностного монтажа типа BGA, в котором вместо шариковых выводов сделаны контактные площадки для пайки.

LIF (Laser Induced Fluorescence)

Люминесценция с лазерным возбуждением.

Little-endian

Способ записи данных в регистры или устройства памяти, когда первым записывается младший значащий бит данных (LSB), см. также *Big-endian*.

LIW (Long Instruction Word)

Микропроцессорная команда повышенной разрядности.

LLCC (LeadLess Chip Carrier)

Кристаллодержатель без выводной рамки (см. также *LC*, *LCCC*).

LNA (Low Noise Amplifier)

Малошумящий усилитель.

LOC

1. Large Optical Cavity — структура полупроводникового лазера с широким оптическим резонатором.

2. Lead on Chip — рамка-на-кристалле. Технология сборки полупроводниковых чипов, когда направляющая (выводная) рамка корпуса размещается поверх кристалла.

3. Line of Code — строка кода. Строка программы или строка команды в исходном программном коде.

LOC MOS (Locally Oxidized CMOS)

КМОП-структура с использованием локального окисления. Технология, обеспечивающая электрическую изоляцию расположенных на кристалле ИС отдельных КМОП-структур путём добавления локальных оксидных слоёв.

LOCOS (LOCal Oxide of Silicon)

Технология МОП ИС с толстым защитным слоем оксида кремния.

LPLD (Low Power Laser Diode)

Маломощный лазерный диод. Обычно, не оказывающий вредного воздействия на зрение человека.

LQ (Limiting Quality)

Предельный уровень качества. Процент дефектов, вероятность обнаружения которых при эксплуатационных испытаниях полупроводниковых компонентов составляет 10%. Данный параметр иногда также называют «риск покупателя» или «допустимый процент брака».

LQFP (Low profile QFP)

Низкопрофильный корпус типа QFP.

LRU (Least Recently Used)

«Наиболее давний по использованию». Алгоритм кэширования памяти, позволяющий повысить скорость обращения к данным. Байты данных, к которым давно не производилось обращения программой,

выбрасываются из кэша и заменяются требуемыми в текущий момент данными.

LSB (Least Significant Bit)

Младший значащий бит двоичного числа (см. также *LSD*, *MSB*, *MSD*).

LSD (Least Significant Digit)

Младший значащий разряд числа. В позиционной системе счисления — разряд с наименьшим весовым коэффициентом (см. также *LSB*, *MSB*, *MSD*).

LSI (Large Scale Integration)

Интегральная схема с большой степенью интеграции (БИС), которая содержит 100...1000 транзисторов или других элементов (см. также *ELSI*, *GLSI*, *MSI*, *VLSI*, *ULSI*).

LSL (Low Speed Logic)

ИС низкоскоростной логики; характеризуется малым быстродействием, но повышенной помехозащищённостью.

LSTTL (Low power Schottky TTL)

Маломощные транзисторно-транзисторные логические схемы с диодами Шоттки. Семейство быстродействующих маломощных TTL-микросхем с использованием диодов Шоттки.

LTT (Light Triggered Thyristor)

Тиристор с прямым управлением светом (фототиристор).

LVC (Low Voltage CMOS)

Низковольтная (с напряжением питания 3.3 В) КМОП ИС.

LVTTTL (Low Voltage TTL)

Низковольтная TTL-логика. Интерфейс, предназначенный для преобразования стандартного уровня питания микросхем TTL (5 В) к пониженному напряжению питания 3.3 В.

MBE

1. Molecular Beam Epitaxy — молекулярная (молекулярно-пучковая) эпитаксия.
2. Multi-Board Emulator — эмулятор, предназначенный для работы с системными платами различных типов.

MC (Memory Controller)

Контроллер памяти. Представляет собой набор интегрированных в чип программируемых контроллеров и разгружает ЦПУ от выполнения ряда специфических операций при обращении к модулям DRAM.

MCBF (Mean Cycles Between Failures)

Среднее количество рабочих циклов до отказа компонента (см. также *MTBF*).

MCM (Multi-Chip Module)

Многокристальный модуль (тип гибридной ИС).

MCP (Multi-Chip Package)

Несколько чипов в одном корпусе (тип гибридной ИС).

MCT (MOS Controlled Thyristor)

МОП-управляемый тиристор.

MCU (MicroController Unit)

Микроконтроллер.

MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition)

Усовершенствованный процесс химического осаждения из газовой фазы. Технология покрытия для оптоэлектронных полупроводниковых компонентов (см. также *CVD*).

MDA

1. Monolithic Diode Array — монолитная диодная сборка (матрица).
2. Monochrome Display Adapter — адаптер монохромного дисплея. Графическая карта, не поддерживающая возможность работы с цветом. Предшественник графических карт Hercules, выпускавшихся компанией IBM начиная с 1981 года.

MEMS (Micro Electro Mechanical System)

Микроэлектромеханическая система.

MESC (Modular Equipment Standards Committee)

Комитет по стандартизации модульного оборудования. Подразделение SEMI, занимающееся стандартизацией инструментальных интерфейсов для оборудования по производству полупроводниковых компонентов. До сих пор предпринималось очень мало попыток реальной стандартизации в данной области, хотя она представляет собой огромный интерес для исследований.

MESFET (Metal Semiconductor FET)

Полевой транзистор с затвором (барьером) Шоттки.

MFLOPS (Million Floating point Operations per Second)

Миллион операций над числами с плавающей точкой в секунду.

MIC

1. Media Interface Connector — разъём оптоволоконного сетевого интерфейса (FDDI); обеспечивает дуплексное соединение в соответствии со стандартом физического подуровня (PMD). Разъём MIC снабжён механическим ключом для защиты от случайного неправильного соединения (переплюсовки контактов).
2. Microwave Integrated Circuit — ИС диапазона СВЧ. Обычно, гибридная или многокристальная ИС (см. также *MMIC*).

MIL-Spec

Предназначенный для военного применения.

MIM (Metal Insulator Metal)

Структура типа металл — диэлектрик — металл, МДМ-структура.

MIPS (Million Instructions Per Second)

Параметр (миллионов команд в секунду), характеризующий производительность процессора. В качестве команд при расчёте значения этого параметра для конкретного процессора берутся его наиболее употребительные со статистической точки зрения команды. Отсутствие стандартизации при расчёте ограничивает реальную ценность этого параметра. С его помощью можно адекватно оценивать лишь производительность процессоров одного семейства или имеющих схожую архитектуру.

MIS (Metal conductor Insulator Semiconductor)

Структура типа металл — диэлектрик — полупроводник, МДП-структура.

MISFET (Metal conductor Insulator Semiconductor FET)

Полевой транзистор со структурой металл — диэлектрик — полупроводник, МДП-транзистор. См. также *MOSFET*, *MESFET*, *MNSFET*.

MISS (Metal conducting Insulator Semiconductor Switch)

Переключатель на МДП-транзисторе.

ML (MonoLayer)

Многослойный.

MMIC

1. Millimeter Wave Integrated Circuit — ИС миллиметрового диапазона (СВЧ).
2. Monolithic Microwave IC — монолитная ИС диапазона СВЧ.

MMU

1. Mass Memory Unit — массовая память, запоминающее устройство (сверх)большой ёмкости.
2. Memory Management Unit — диспетчер памяти.

MNOS (Metal Nitride Oxide Semiconductor)

Структура типа металл — нитрид — оксид — полупроводник, МНОП-структура. Полупроводниковая структура с двойным изолирующим слоем, выполненным из нитрида кремния и оксида кремния (см. также *SNOS/SONOS*).

MNOS FET (Metal Nitride Oxide Semiconductor FET)

Полевой транзистор со структурой металл — нитрид — оксид — полупроводник, МНОП-транзистор.

MNS FET (Metal Nitride Semiconductor FET)

Полевой транзистор металл — нитрид — полупроводник, МНП-транзистор.

MNS

1. Metal Nitride Semiconductor — полупроводниковая структура, состоящая из слоёв металла и нитрида кремния. В отличие от MNOS, не содержит оксидного слоя.
2. Multi-Numbering Scheme — многономерная схема. Использование одним абонентом телефонной сети нескольких телефонных номеров для различных сервисов.

MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition)

Химическое осаждение из паровой (газовой) фазы металлоорганических соединений (см. также *MOVPE*).

MODFET (MOdulation Doped FET)

Полевой транзистор, изготовленный по технологии с переменным (модулируемым) профилем примесей. Обладает чрезвычайно высоким быстродействием (см. также *HEMT*, *HIGFET*, *MESFET*, *TEGFET*, *SDHT*).

MOS (Metal Oxide Semiconductor)

Структура типа металл — оксид — полупроводник, МОП-структура.

MOSC (MOS Capacitor)

МОП-конденсатор.

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)

Полевой транзистор с МОП (металл — оксид — полупроводник) структурой затвора.

MOST (MOS Transistor)

МОП-транзистор (см. также MOSFET).

MOV (Metal Oxide Varistor)

Металлооксидный варистор.

MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy)

Процесс эпитаксии металлоорганических соединений из паровой фазы.

MPU (MicroProcessing Unit)

Блок микропроцессора. Центральное процессорное устройство на базе микросхемы микропроцессора.

MQFP (Metric Quad Flat Pack)

Плоский корпус ИС с четырёхсторонним расположением выводов, шаг которых соответствует метрическим (а не американским) единицам длины.

MQW (Multiple Quantum Well)

Структура с несколькими квантовыми ямами. Полупроводниковая структура, используемая для полупроводниковых лазеров (см. также *SQW*).

MRAM (Magnetic RAM)

Магнитное ОЗУ. Запоминающее устройство на магнитном носителе.

MSB (Most Significant Bit)

Старший значащий бит. Разряд двоичного числа с наибольшим весовым коэффициентом (см. также *LSB*, *LSD*, *MSD*).

MSD (Most Significant Digit)

Старший значащий разряд числа. В позиционной системе счисления — разряд с наибольшим весовым коэффициентом (см. также *LSB*, *LSD*, *MSB*).

MSI (Medium Scale Integration)

ИС средней степени интеграции, кристалл которой содержит от 10 до 100 активных элементов (см. также *LSI*, *VLSI*).

MSM (Metal Semiconductor Metal)

Металл — полупроводник — металл. Последовательность слоёв в специальном фотодиоде.

MTBF (Mean Time Between Failures)

Среднее время между отказами (среднее время безотказной работы). Статистическая характеристика надёжности технического оборудования (см. также *MTTF*, *MCBF*).

MTL (Merged Transistor Logic)

Совмещённая транзисторная логика. Интегральные логические схемы на основе би-

полярных транзисторов, с многоколлекторными *n-p-n*-транзисторами и боковыми *p-n-p*-транзисторами (см. также *I2L*).

MTNS (Metal Thick Nitride Semiconductor)

Кремниевая МОП-структура с изоляцией нитридом кремния.

MTOS

1. Metal/Tunnel Oxide/Semiconductor — туннельный элемент, состоящий из слоя оксида, обеспечивающий туннелирование электронов, который с одной стороны граничит с металлом, а с другой — с полупроводником.

2. Metal Thick Oxide Semiconductor — кремниевая МОП-структура с толстым изолирующим слоем.

MTTF (Mean Time to Failure)

Средняя наработка на отказ (см. также *MTBF*).

MTTR (Mean Time to Repair)

Средний срок службы до ремонта (или до утилизации).

Multiuser operation

Многопользовательская операция. Обеспечение нескольким рабочим станциям (абонентам) возможности сетевого доступа к таким ресурсам, как данные или периферийное оборудование.

MVL (Multi-Valued Logic)

Мнозначная логика. Не двоичная, а, как минимум, троичная.

NA (Numerical Aperture)

Числовая апертура. Входная угловая апертура световода.

NEP (Noise Equivalent Power)

Эквивалентная мощность шумов. Мощность на выходе усилителя или детектора, генерируемая входным сигналом, эквивалентная внутренним шумам усилителя или детектора.

Nesting

Вложенная структура; чередование программ.

NF (Noise Figure)

Коэффициент шума, шум-фактор.

NMOS (N-channel Metal Oxide Semiconductor)

МОП-структура с каналом *n*-типа.

NPN (Negative Positive Negative)

n-p-n-структура. Последовательность слоёв для биполярного транзистора (см. также *PNP*).

NRE (Non-Recurring Engineering)

Единовременные затраты на разработку.

NTC (Negative Temperature Coefficient)

Отрицательный температурный коэффициент (см. также *PTC*).

OBIC (Optical Beam Induced Current)

Ток, индуцированный лучом света. Используется для проверки электронных компонентов (см. также *EBIC*).

OC (Open Collector)

Открытый коллектор. Тип схемы, который позволяет объединять коллекторы нескольких биполярных транзисторов.

OD (Open Drain)

Открытый сток. Тип схемы на полевом транзисторе, аналогичный схеме с открытым коллектором на биполярном транзисторе (см. также *OC*).

OE (Output Enable)

Сигнал разрешения выхода.

OEIC (Opto Electronic Integrated Circuit)

Оптоэлектронная интегральная схема.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Ортогональное мультиплексирование с разделением частот.

OIC (Optical Integrated Circuit)

Оптическая ИС.

OIG (Optically Isolated Gate)

Оптически изолированный затвор.

OPA (Optoelectronic Pulse Amplifier)

Оптоэлектронный импульсный усилитель.

OPAMP (Operational Amplifier)

Операционный усилитель.

OROM (Optical Read Only Memory)

Оптическое ПЗУ.

OSEK (Offene Systeme und deren schnittstellen für die Elektronik im Kraftfahrzeug)

Немецкая аббревиатура, означающая открытые системы и соответствующие интерфейсы для автомобильной электроники. Стандарт для открытых систем был разработан совместно германскими и француз-

скими производителями автомобильных двигателей.

OSI (Open Systems Interconnection)

Модель взаимодействия открытых систем. Определяет процесс взаимосвязи открытых систем в соответствии с эталонной моделью ISO (она же — семиуровневая модель). Семиуровневая структура протокола основана на стандарте ISO 7498 и базовой эталонной модели OSI, которые разрешают постоянный и открытый обмен информацией. Интерфейсы взаимодействия между уровнями стандартизированы, что позволяет осуществлять контролируемый доступ. Функционирование любых индивидуальных устройств подчиняется требованиям данной модели.

OTP (One Time Programmable)

Однократно программируемое устройство (к таким устройствам относятся некоторые ПЗУ, см. также *PROM*).

Outsourcing (делеги́рование задач)

Передача тех или иных корпоративных задач на выполнение сторонним, обычно специализирующимся в определённой сфере, подрядчиком. К числу подобных задач относятся ввод данных, изготовление печатной платы, монтаж компонентов на ней, а часто и программирование. Делегирование части задач позволяет клиентам сконцентрироваться на реализации наиболее важных и относящихся к их компетенции задач.

OVPO (Outside Vapor Phase Oxidation)

Процесс осаждения окислов металлов из газовой фазы на поверхность стержня из графита.

Page mode RAM

ОЗУ с поддержкой страничного режима доступа к данным. При этом уменьшается время обращения к последовательно расположенным ячейкам памяти. Данный метод хорошо применим в устройствах видеопамати, поскольку графическая информация обычно записывается последовательно (см. также *FPM*).

PAL

1. Programmable Array Logic — программируемая матричная логика. Интегральная схема, объединяющая в себе программируемую матрицу элементов И и непрограммируемую матрицу элементов ИЛИ (см. также *PGA*, *PLA*).

2. Phase Alternating Line — построчное изменение фазы. Метод передачи цветового сигнала в телевидении. Система цветного телевидения PAL (см. также *NTSC*, *SECAM*).

Parity (чётность)

Равенство, однородность. При дистанционной передаче данных необходимость проверки данных на чётность устанавливается предварительным «соглашением» между отправителем и получателем данных; в наиболее простом варианте вместе с данными передаётся дополнительный бит чётности. Однако существуют и более сложные методы контроля целостности данных (см. также *CRC*).

Patch (патч)

В программировании — небольшая программа («заплата»), предназначенная для исправления программной ошибки (см. также *Bug*, *Отладчик*).

PBGA (Plastic BGA)

Пластиковый корпус типа BGA.

PC

1. Parity Check — контроль чётности.
2. Peak Clipping — ограничение по максимуму. Ограничение максимальных (пиковых) значений тока или напряжения.
3. PentaConta (Пентаконта) — координатная (коммутаторная) АТС производства компании ИТТ.
4. Personal Communicator — персональное устройство связи, коммуникатор.
5. Personal Computer — персональный компьютер. Термин, введенный в обращение компанией IBM. Первый персональный компьютер поступил в продажу в 1981 году.
6. PhotoConductor — материал с фотопроводимостью, фоторезистор.
7. Physical Contact — физический контакт.
8. Pocket Calculator — карманный калькулятор.
9. Printed Circuit — печатная плата (см. также *PCB*).
10. Program Counter — счётчик команд.
11. Programmable Controller — программируемый (микро)контроллер.
12. Protocol Converter — преобразователь протоколов.
13. Pulsating Current — пульсирующий ток.

PCB (Printed Circuit Board)

Печатная плата, на которой монтируются компоненты электронной схемы; часто

применяется термин «электронная плата» или просто «плата».

PCD (Plasma Coupled Device)

Прибор с плазменной связью.

PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association)

Международная ассоциация производителей карт памяти для персональных компьютеров. Объединяет производителей и дилеров, заинтересованных в создании и совершенствовании типовых стандартов для периферийного оборудования на базе PC-карт и соответствующих разъёмов для портативных компьютеров и т.п. Подобный стандарт для PCMCIA-карт в версии 1 был принят в 1990 году.

PCT (Photon Coupled Transistor)

Оптрон.

PCVD (Plasma activated Chemical Vapor Deposition)

Химическое осаждение из плазменной фазы. Технология покрытия, используемая для световодов.

PD

1. PhotoDiode — фотодиод.
2. Public Domain — государственная собственность; общедоступный.

PDA (PhotoDiode Array)

Матрица фотодиодов.

Peak-to-peak

См. *Размах*.

PEEL (Programmable Electrically Erasable Logic)

Программируемая электрически стираемая логическая схема.

PGA

1. Pin Grid Array — матрица штыревых выводов. Тип корпуса ИС, предназначенный для монтажа микросхем на печатных платах с большим количеством требуемых соединений.
2. Programmable Gate Array — программируемая вентильная матрица. Интегральная схема, представляющая собой матрицу логических элементов, каждый из которых может быть запрограммирован для выполнения функций И или И-НЕ (см. также *PAL*, *PLA*).

PIC (Power Integrated Circuit)

Силовая интегральная схема.

PIL (Picosecond Injection Laser)

Инжекционный лазер пикосекундного диапазона.

Pit

Паз, желоб.

PLA (Programmable Logic Array)

Программируемая логическая матрица (ПЛМ). Интегральная схема, представляющая собой матрицу логических элементов, которые могут быть запрограммированы как элементы И/ИЛИ и могут различным образом коммутироваться друг с другом (см. также *PAL*, *PGA*).

PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier)

Пластиковый корпус для поверхностного монтажа с J-образными выводами (см. также *CLCC*).

PLD

1. Pigtailed Laser Diode — лазерный диод с гибкими (волоконными) выводами.
2. Programmable Logic Device — программируемое логическое устройство (см. также *EPLD*).
3. Pulsed Laser Diode — импульсный лазерный диод.

PLL (Phase Locked Loop)

См. *ФАПЧ*.

PM

1. Phase Modulation — фазовая модуляция. Изменение фазы опорного колебания в соответствии с изменениями амплитуды полезного сигнала.
2. PhotoMultiplication — фотоумножение. См также *PMT*.
3. Physical Medium — физическая среда. Нижний (физический) уровень в модели взаимодействия открытых систем OSI.
4. Preventive Maintenance — профилактическое техническое обслуживание.
5. Pulse Modulation — импульсная модуляция. Способ модуляции, когда для передачи полезного сигнала используется импульсный сигнал.

PMOS (P-channel Metal Oxide Semiconductor)

МОП-структура с каналом *p*-типа. См. *MOS*.

PNP (Positive Negative Positive)

p-n-p-структура. Последовательность слоёв для биполярного транзистора (см. также *NPN*).

POH (Power-on-Hours)

Время нахождения во включенном состоянии.

Power-down

Отключение; пониженное энергопотребление.

P-PGA (Plastic Pin Grid Array)

Пластиковый корпус ИС с матрицей штырьковых выводов (см. также *PGA*, *CPGA*).

ppm (Parts Per Million)

Промиль (миллионная часть). Распространённая единица измерения относительного содержания (концентрации или частоты).

PQFP (Plastic Quad Flat Package)

Пластиковый квадратный плоский корпус ИС.

PRO Electron

Принятая в Европе система обозначений полупроводниковых приборов.

Действующая под эгидой ЕЕЕСА международная организация, задачей которой является стандартизация и регистрация обозначений различных типов полупроводниковой продукции, произведённой в Европе.

Process computer

Технологический компьютер.

Компьютер, предназначенный для обработки данных в режиме реального времени; характеризуется очень малым временем отклика на внешние сигналы.

PROM (Programmable Read Only Memory)

Программируемое ПЗУ (ППЗУ). Постоянное запоминающее устройство, которое может программироваться пользователем (как правило, это однократно программируемое ПЗУ; см. также *EEPROM*, *EPROM*).

PRTN (Piano della Regolamentazione Telefonica Nazionale)

Итальянская распорядительная (административная) организация в области национальных телекоммуникаций.

PTC (Positive Temperature Coefficient)

Положительный температурный коэффициент (см. также *NTC*).

PVC

1. Permanent Virtual Circuit (также Connection) — постоянное виртуальное соединение в АТМ. С точки зрения абонента,

данное соединение работает как постоянная выделенная линия.

2. PolyVinylChloride — поливинилхлорид. Пластик, который относительно дешёв в производстве и широко применяется в качестве изоляционного материала и/или для оплётки кабелей.

PVD

1. PhotoVoltaic Diode — фотодиод с запирающим слоем.

2. Physical Vapor Deposition — конденсация из паровой (газовой) фазы.

PZT (PieZoelectric Transducer)

Пьезоэлектрический измерительный преобразователь.

QA (Quality Assurance)

Контроль (гарантия) качества.

QCCN (Quad Chip Carrier Non leaded)

Бессвинцовый корпус для поверхностного монтажа с четырёхсторонним расположением выводов.

QE (Quantum Efficiency)

Квантовая эффективность, квантовый выход.

QW (Quantum Well)

Квантовая яма.

Race condition

Состояние гонок. Неустойчивое состояние логического элемента, когда данные поступают на соответствующие входы быстрее (раньше), чем управляющий синхросигнал.

RADAR (Radio Detection and Ranging)

Радар — устройство радиообнаружения и измерения расстояния до объекта.

RAM (Random Access Memory)

Память с произвольным доступом для записи и чтения данных. Как правило, используется в качестве ОЗУ в компьютерных системах. Основным недостатком устройств памяти этого типа является их энергозависимость, т.е. при отключении напряжения питания содержимое памяти теряется (см. также *Память*, *ROM*, *DRAM*).

Ramp-down

Свёртывание производства продукции; снятие с производства.

Ramp-up

Запуск продукции в производство (вывод производственного оборудования на рабочий режим).

Random

Произвольный — независимый; выборочный (доступ к ячейкам памяти).

RAS (Row Address Strobe)

Строб адреса строки — управляющий сигнал, разрешающий приём адреса строки при адресации микросхем DRAM (см. также *RE*).

RCEEA (Radio Communication and Electronic Engineering Association)

Британская ассоциация радиосвязи и электронной техники.

RCTL (Resistance Capacitance Transistor Logic)

Резистивно-ёмкостная транзисторная логика. Архитектура логических ИС, в которой связь между транзисторными каскадами осуществляется с использованием резисторов и конденсаторов. Обладает большим быстродействием, чем резисторно-транзисторная логика (RTL).

RE (Row Enable)

Выбор строки. Управляющий сигнал для микросхем памяти (вместо сигнала RAS).

Read only

Доступный только для чтения. Параметр, относящийся, например, к атрибутам файлов, правам доступа или защищённым устройствам.

RHET (Resonance tunneling Hot Electron Transistor)

Транзистор на горячих электронах с резонансным туннелированием.

RIBE (Reactive Ion Beam Etching)

Реактивное травление пучком ионов (ионно-лучевое травление).

RIE (Reactive Ion Etching)

Реактивное ионное травление (см. также *RIBE*).

RIN (Relative Intensity Noise)

Относительная интенсивность шума.

RISC (Reduced Instruction Set Computer)

Архитектура компьютера с сокращённым набором команд. Данный тип компьютеров не обеспечивает особой гибкости програм-

мирования, зато характеризуется повышенным быстродействием (см. также *CISC*).

RMOS (Refractory MOS)

МОП-структура с затвором из тугоплавкого металла (молибдена, вольфрама).

ROM (Read Only Memory)

Память, доступная только для чтения (ПЗУ). Запись информации в память, в зависимости от типа ПЗУ, может осуществляться на этапе его производства, с использованием механических, магнитных, электрических или оптических методов.

ROR (RAS Only Refresh)

Построчная регенерация. Метод обновления (регенерации) данных в ячейках памяти DRAM с использованием только сигнала RAS.

RPC (Rigid Printed Circuit)

Жёсткая печатная плата (см. также *FPC*).

RTD (Resonant Tunneling Diode)

Резонансный туннельный диод (см. также *RTT*, *TSRAM*).

RTL (Resistor Transistor Logic)

Резисторно-транзисторная логика. Тип логических ИС, в которых связь между транзисторными каскадами (инверторами) осуществляется с помощью резисторов.

RTT

1. Resonant Tunnel Transistor — быстродействующий транзистор с резонансным туннельным эффектом (см. также *RTD*).
2. Road Transport Telematics — система централизованного управления движением автотранспорта.

SAGMOS (Self Aligning Gate MOS)

МОП-структура с самосовмещёнными затворами.

SAMOS (Stacked gate Avalanche injection MOS)

Лавинно-инжекционная МОП-структура с многоуровневыми затворами (см. также *SIMOS*).

SBD (Schottky Barrier Diode)

Диод Шоттки.

SCCD (Surface Charge Coupled Device)

ПЗС с поверхностным каналом (см. также *CCD*).

SCEW

Тестовый сигнал, позволяющий определить разность времени распространения сигнала в различных направлениях вдоль полупроводникового кристалла.

SCFL (Source Coupled FET Logic)

Истоково-связанная логика на полевых транзисторах.

SCH (Separate Confinement Heterostructure)

Гетероструктура с отдельным удержанием.

SCL (Source Coupled Logic)

Истоково-связанная логика. Аналог *ECL*, использующейся в биполярной технологии.

SCLA (SemiConductor Laser Amplifier)

Усилитель сигнала полупроводникового лазера (см. также *TWSLA*).

SCLC (Space Charge Limited Current)

Ограничение тока пространственного заряда.

SCOS (Smart Card Operating System)

Операционная система смарт-карты.

SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Кремниевый управляемый диод (тиристор), триистор.

SCSOA (Short Circuit Safe Operating Area)

Область безопасной работы для режима короткого замыкания. В силовой электронике данный параметр описывает значения основных характеристик полупроводникового компонента (напряжения, тока, мощности рассеяния), при которых в режиме короткого замыкания компонент сохраняет свою работоспособность без риска выхода из строя.

SCT (Surface Charge Transistor)

Транзистор с поверхностным зарядом.

SDFL (Schottky Diode FET Logic)

Логические схемы на полевых транзисторах с диодами Шоттки. Семейство ИС на GaAs MESFET.

SDHT (Selectively Doped Heterojunction Transistor)

Селективно легированный (полевой) транзистор на гетеропереходе.

SDRAM (Synchronous DRAM)

Синхронная DRAM. Архитектура микросхем ОЗУ, в которой запись и считывание информации осуществляются в синхронном режиме с использованием тактовых импульсов. Таким образом, при обращении

к памяти не требуется ждать появления данных на соответствующем выводе ИС, прежде чем очередной адрес сможет быть «выставлен» на шине. Технология SDRAM обеспечивает существенное повышение пропускной способности при обращении к памяти.

SECAP (Semiconductor Equipment Consortium for Advanced Packaging)
Консорциум по разработке оборудования для передовых технологий корпусирования в полупроводниковой промышленности.

SEED (Self Electro optic Effect Device)
Электро-оптический переключатель.

SEL (Surface Emitting Laser)
Плоскостной лазер.

SELD (Surface Emitting Laser Diode)
Плоскостной лазерный диод.

SEM (Silicon Electron Multiplication)
Кремниевый электронный умножитель.

SEMATECH (SEMiconductor MANufacturing TECHNOlogy)
Технология производства полупроводников.

SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International)
Международная организация производства полупроводникового оборудования и материалов.

SEMKO (Svenska Elektriska MaterielKontrollanstalten)
Шведская служба контроля электрических материалов со штаб-квартирой в Стокгольме.

SEP (Stowarzyszenie Elektrykow Polskich)
Польская ассоциация инженеров-электротехников со штаб-квартирой в Варшаве.

SER (Soft Error Rate)
Коэффициент и методика оценки случайных отказов полупроводниковых модулей.

SFR (Special Function Register)
Регистр специальных функций.

SGML (Standard Generalized Markup Language)
Стандартный обобщенный язык разметки (стандарт описания офисных документов, утвержденный ISO на базе стандарта 8879). См также *HTML*.

SGRAM (Synchronous Graphics RAM)
Синхронное ОЗУ машинной графики. Специальный расширенный вариант SDRAM-модулей, используемый для графических карт.

SGT (Surrounding Gate Transistor)
Транзистор с окружающим затвором. Трёхмерный транзистор.

SIA (Semiconductor Industry Association)
Американская ассоциация предприятий полупроводниковой промышленности.

SIC (Semiconductor Integrated Circuit)
Полупроводниковая интегральная схема.

SiC (Silicon Carbide)
Карбид кремния — полупроводниковый материал, который может использоваться даже при очень высокой температуре (свыше +400°C).

SID (Slewing Induced Distortion)
Искажения от резкого изменения.

SIEGET® (Siemens Grounded Emitter Transistor)
Разработанный компанией Siemens транзистор с заземлённым (общим) эмиттером. ВЧ транзистор с граничной частотой 25 ГГц.

SIL (Single In Line)
Корпус с однорядным расположением выводов.

SIMM (Single In-line Memory Module)
Модуль памяти в корпусе с однорядным расположением выводов.

SIMOS (Stacked gate Injection MOS)
Инжекционная МОП-структура с многоуровневыми затворами (см. также *SAMOS*).

SIP (Single In-line Package)
Корпус с однорядным расположением выводов.

SIPP (Single In-line Pin Package)
Корпус с однорядным расположением штыревых выводов.

SIT (Static Induction Transistor)
Транзисторы со статической индукцией.

Skew
Сдвиг — пространственное смещение или временная задержка (как правило, нежелательные).

SLA (Semiconductor Laser Amplifier)

Усилитель сигнала полупроводникового лазера.

SLD (Superluminescent Diode)

Сверхлюминесцентный диод (см. также *LED*).

SLED (Surface emitting LED)

Плоскостной светодиод.

SLSI (Super LSI)

Технология производства ИС, когда кристалл содержит более 100 тысяч транзисторов.

SMD (Surface Mounted Device)

Компонент, предназначенный для поверхностного монтажа. Электронный компонент, подключаемый в схему без использования каких-либо соединительных проводников путём непосредственного монтажа (припаивания) на поверхность печатной платы.

SMH (Societe suisse de Microelectronique et d'Horlogerie)

Швейцарская корпорация микроэлектроники и часовой промышленности.

SMIF (Standard Mechanical Interface)

Стандартный механический интерфейс. Производственный стандарт, разработанный компанией Hewlett Packard для инженерных работ в условиях особо чистых производственных помещений.

SMPGA (Surface Mount Pin Grid Array)

Корпус ИС, выполненный в виде матрицы штырьковых выводов и предназначенный для поверхностного монтажа.

SMPS (Switched Mode Power Supply)

Импульсный источник питания. Принцип его работы основан на преобразовании, с помощью полупроводниковых ключей, выпрямленного и сглаженного входного сетевого напряжения в импульсы тока, с последующим выделением и фильтрацией постоянной составляющей. Поскольку (в идеальном случае) полупроводниковый ключ либо коммутирует большой ток, либо вообще не пропускает его, потери как при переключении, так и в открытом состоянии ключа оказываются невелики. Благодаря этому импульсный источник питания характеризуется гораздо более высоким КПД, чем

аналоговый (трансформаторный) источник с регулированием синфазного напряжения.

SMT (Surface Mounting Technology)

Технология поверхностного монтажа (см. также *SMD*).

SNOS (Silicon Nitride Oxide Semiconductor)

Полупроводники на основе нитрид-оксида кремния. Используются при производстве ячеек памяти EPROM (см. также *MNOS/SONOS*).

SNR (Signal to Noise Ratio)

Отношение сигнал/шум.

SO (Small Outline)

Малогабаритный корпус.

SOA

1. Semiconductor Optical Amplifier — полупроводниковый оптический усилитель.
2. Safe Operating Area — область безопасной работы.

SoG (Sea-of-Gates)

Технология «Море вентиляей».

SOIC

1. Secret Object Identification Code — секретный код идентификации объекта. Используется при авторизации доступа для проверки аутентичности пользователя (см. также *POIC*).
2. Small Outline Integrated Circuit — малогабаритная интегральная схема.

SOJ (Small Outline J-leaded package)

Малогабаритный корпус с J-образными выводами.

SONOS (Silicon Oxide Nitride Oxide Semiconductor)

Кремний-оксид-нитрид-оксидный полупроводник. См. также *SNOS/MNOS*.

SOP (Small Outline Package)

Малогабаритный корпус.

SOS (Silicon on Sapphire)

Кремний на сапфире. Вариант КМОП-технологии, при котором вместо кремниевой подложки используется сапфировая.

SOT (Small Outline Transistor)

Малогабаритный корпус транзисторного типа.

SP (Stack Pointer)

Указатель стека.

SPICE (Simulation Program for In-Circuit Emulation)

Популярная программа моделирования с ориентацией на интегральные схемы (для применения совместно с внутрисхемными эмуляторами).

SPT (Siemens Power Technology)

Специальная технология производства мощных полупроводниковых компонентов, разработанная компанией Siemens. Позволяет реализовывать в одном кристалле биполярные, КМОП- и ДМОП-структуры.

SQUID (Superconducting Quantum Interference Detector)

Сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик.

SRAM (Static RAM)

Статическое ОЗУ. Ячейка памяти такого ОЗУ состоит из нескольких транзисторов и фактически представляет собой триггер с двумя устойчивыми состояниями. После переключения в одно из логических состояний оно может быть сброшено лишь путём подачи специального управляющего сигнала либо выключения питания. Именно поэтому структура памяти данного типа называется статической (это вовсе не говорит о её быстродействии, которая выше, чем у микросхем DRAM). Однако ИС статической памяти сложнее и, соответственно, дороже, чем ИС динамической памяти.

SSD (Solid State Disk)

Твердотельный (полупроводниковый) диск.

SSI (Small Scale Integration)

Малая степень интеграции. Микросхемы этого типа содержат не более 10 активных элементов (см. также *MSI*, *LSI*).

SSL

1. Solid State Logic — ИС на основе твердотельной логики (т.е. на основе полупроводниковых схем).

2. Solid State Laser — твердотельный лазер.

SSOP (Shrink Small Outline Package)

Миниатюрный (малогабаритный) корпус (типа SO) из усадочной плёнки. Уменьшенный корпус интегральных микросхем с выводами, расположенными по двум длинным сторонам. Разновидность SOP-корпуса микросхем, предназначенного для поверхностного монтажа.

SSPC (Solid State Power Controller)

Твердотельный контроллер питания.

SSR

1. Solid State Relay — твердотельное реле.

2. Sub-Mode Suppression Rate — коэффициент подавления субмоды (для лазеров).

STI (Shallow Trench Isolation)

Изоляция с неглубокими канавками.

STR (SelfTime Refresh)

Специальный цикл обновления данных (в микросхемах DRAM).

TAB (Tape Automated Bonding)

Технология (устаревшая) автоматизированного монтажа с использованием ленты-носителя.

Tag

Тег — специальный программный идентификатор (признак), используется для контроля состояния заданного объекта (см. также *Семафор*, *Флаг*).

TFBGA (Thin Fine Pitch BGA)

Тонкий корпус с малым шагом матрицы шариковых выводов.

TFEL (Thin Film Electroluminescent Display)

Тонкоплёночный электролюминесцентный дисплей.

TF-FET (Thin Film FET)

Тонкоплёночный полевой транзистор (см. также *TFTLC*).

TFTLC (Thin Film Transistor Liquid Crystal)

ЖК дисплей тонкоплёночной технологии.

THC (Through Hole Contact)

Сквозной контакт. Металлизированное сквозное отверстие в печатной плате, в которое вставляется соответствующий вывод монтируемого на этой плате компонента.

TQFP (Thin Quad Flat Pack)

Тонкий квадратный плоский корпус. Тип корпуса ИС, отличающийся очень малой толщиной, благодаря чему ИС может быть с лёгкостью размещена на пластиковой карте или ленте.

TQM (Total Quality Management)

Полный контроль качества. Концепция, ориентированная на то, чтобы путём последовательных улучшений качества продукции достичь её соответствия заданным критериям качества.

TRAPATT (TRApped Plasma Avalanche Triggered Transit)

Структура, используемая в лавинно-ключевых диодах (см. также *IMPATT*).

TRIAC (TRIode Alternating Current)

Триодный переключатель переменного тока; симистор. См. также *DIAC*.

TriCore

Перспективная 32-битная архитектура микроконтроллеров, разработанная компанией Infineon с целью удовлетворить растущим требованиям к производительности микроконтроллеров.

TSL (Tunable Semiconductor Laser)

Перестраиваемый полупроводниковый лазер.

TSOJ (Thin Small Outline J-lead)

Тонкий малогабаритный корпус с J-образными выводами.

TSOP (Thin Small Outline Package)

Тонкий малогабаритный корпус.

TSSOP (Thin Shrink Small Outline Package)

Малогабаритный корпус уменьшенной толщины.

TTL (Transistor-to-Transistor Logic)

Транзисторно-транзисторная логика. Ещё недавно — наиболее распространённый тип логических интегральных схем, основанный на использовании биполярных транзисторов в качестве логических элементов (вентилей).

TWA (Traveling Wave semiconductor optical Amplifier)

Полупроводниковый оптический усилитель на лампе бегущей волны (см. также *TWSLA*).

TWSLA (Traveling Wave Semiconductor Laser Amplifier)

Полупроводниковый лазерный усилитель на лампе бегущей волны (см. также *SCLA*, *TWA*).

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)

Универсальный асинхронный приёмопередатчик. Интерфейсный модуль периферийного оборудования, осуществляющий в асинхронном режиме операции по обмену последовательными данными (см. также *USART*, *V.24*).

UJT (UniJunction Transistor)

Однопереходный транзистор.

ULA (Uncommitted Logic Array)

Нескоммутированная логическая матрица. Полузаказная логическая ИС, которая может быть окончательно запрограммирована под выполнение тех или иных функций путём использования шаблона (маски) межсоединений (см. также *PLA*).

ULSI (Ultra Large Scale Integration)

Сверхвысокая степень интеграции; термин, означающий, что в состав ИС входит более 1 миллиона транзисторов (см. также *VLSI*).

UMTS (Universal Mobile Telephone System)

Универсальная система мобильной телефонной связи.

UQFP (Ultra thin QFP)

Ультратонкий корпус типа QFP.

USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter)

Универсальный синхронно-асинхронный приёмопередатчик. Универсальный модуль интерфейса, осуществляющий обмен последовательными данными с периферийным оборудованием как в синхронном, так и в асинхронном режимах (см. также *UART*).

USB (Universal Serial Bus)

Универсальная последовательная шина. Периферийная шина, позволяющая осуществлять «горячее» (т.е. непосредственно в процессе работы) подключение периферийных устройств. В персональных компьютерах интерфейс USB заменил такие интерфейсы, как RS-232 и Centronics.

VCD (Variable Capacitance Diode)

Диод переменной ёмкости, варикап.

VDE (Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik)

Германская ассоциация производителей электротехники, электроники и информационных технологий со штаб-квартирой во Франкфурте-на-Майне.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure)

Германская ассоциация инженеров со штаб-квартирой в Дюссельдорфе.

VDL (Visible Diode Laser)

Лазерный диод, излучающий в видимой (красной) области спектра.

VDMOS (Vertical Double diffused MOS)

Двухдиффузионная вертикальная МОП-структура.

VDR (Voltage Dependent Resistor)

Нелинейный резистор (его сопротивление зависит от приложенного напряжения).

Verilog

Язык описания технических средств, наиболее широко распространённый в США (см. также *HDL*, *VHDL*).

VFET (Vertical Field Effect Transistor)

Полевой транзистор с вертикальной структурой (см. также *VDMOS*, *VMOS*).

VHDL (VHSIC HDL)

Алгоритмический язык описания аппаратуры сверхбыстродействующих интегральных схем. Используется, главным образом, в Европе при разработке микросхем (см. также *Verilog*, *HDL*, *VHSIC*).

VHSIC (Very High Speed Integrated Circuit)

Технология производства сверхбыстродействующих ИС и язык их описания и разработки.

VLD (Visible Laser Diode)

Лазерный диод, излучающий в видимой (красной) области спектра.

VLSI (Very Large Scale Integration)

Сверхвысокая степень интеграции, сверхбольшая ИС (СБИС), когда количество элементов в одной ИС превышает (иногда во много раз) 1000 (см. также *LSI*, *MSI*).

VMOS (Vertical (также V-Groove) MOS)

Вертикальная МОП-структура, МОП-структура с V-образной канавкой. Быстродействующая MOSFET-структура с V-образным, коротким каналом (см. также *VFET*).

VQFP (Very thin QFP)

Сверхтонкий корпус типа QFP.

VRAM (Video RAM)

Собственное ОЗУ видеокарты компьютера, предназначенное для хранения графической информации (изображений). В настоящее время вместо модулей VRAM используется *SGRAM*.

VTL (Variable Threshold Logic)

Логические схемы с переменным порогом.

W (Write)

Запись; см. *WE*.

Wafer

Пластина или диск из полупроводникового материала, на которой в процессе пошаговой обработки формируется большое количество одинаковых кристаллов (чипов).

WAP (Wireless Application Protocol)

Протокол беспроводных приложений (беспроводного доступа).

WARC (World Administrative Radio Conference)

Всемирная административная конференция по радиочастотам. Международная организация, которая осуществляет распределение доступных радиочастот между различными регионами мира и отдельными государствами.

WE (Write Enable)

Сигнал разрешения записи; управляет процессом записи информации в микросхемы памяти (см. также *W*).

Whetstone

Тестовая программа, предназначенная для сравнения характеристик производительности различных компьютеров и получившая своё название по месту разработки — городу Уэтстон (Whetstone) в Великобритании. Программа написана на языках ALGOL и FORTRAN; поддерживаются версии с одинарной (32-битной) и двойной (64-битной) точностью.

WPB (Write per Bit)

Режим побитовой записи данных в ОЗУ.

WSI (Wafer Scale Integration)

Интеграция в масштабе (целой) пластины. Технология разработки и производства электронных устройств, полностью размещаемых на одной полупроводниковой пластине.

WSTS (World Semiconductor Trade Statistics)

Мировая статистика продаж полупроводниковых компонентов.

XDSL (X Digital Subscriber Line)

Аббревиатура, обозначающая совокупность различных технологий реализации систем цифровой абонентской линии, т.е. широкополосной передачи цифровых данных с использованием абонентских шлейфов на основе стандартной витой пары медных проводников. В зависимости от конфигурации подобной системы, символ «X» заменяется на соответствующий символ

(наиболее распространёнными являются стандарты ADSL и HDSL).

X-лучи (рентгеновское излучение)

Самое коротковолновое электромагнитное излучение (длина волны менее 30 нм). Открыто в конце XIX века Вильгельмом Конрадом Рентгеном, который дал ему название X-лучи, т.е. лучи, неизвестные науке (на момент своего открытия).

ZIP (Zigzag-In-line Package)

Плоский корпус с зигзагообразно расположенными штырьковыми выводами. Высокая плотность компоновки ИС достигается за счёт использования так называемой панельной (push-through) технологии с вертикальным размещением кристаллов.

ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik-und Elektronikindustrie)

Германская ассоциация производителей электроники со штаб-квартирой во Франкфурте-на-Майне.

ZZF (Zentralamt für Zulassungen im Fernmeldewesen)

Германское центральное аттестационное бюро по телекоммуникациям со штаб-квартирой в г. Саарбрюкен. Переименовано в BZT.

Автоматизация

Оснащение технической системы автоматическими устройствами.

Автоматическая тест-машина

Устройство, которое автоматически осуществляет испытания тех или иных образцов полупроводниковых изделий, используя предварительно заданный набор параметров и процедур.

Автоматическое устройство

Устройство (робот), которое при поступлении соответствующей команды со схемы управления (триггера) в автоматическом режиме выполняет заданную последовательность операций.

Адаптер

Соединительное устройство (переходник), предназначенное для сопряжения систем, отличающихся по уровням сигналов, синхронизации, а также для механического сопряжения и т.п. Примером такого устройства является дополнительная (сменная) карта расширения, которая вставляется в

компьютер и служит для сопряжения различных интерфейсов или соединения с нестандартными устройствами.

Адаптивное управление

Методика управления с использованием контрольных алгоритмов адаптации к текущим условиям среды.

Адресация

Обращение (активация) к определённой ячейке или группе ячеек памяти.

Адресное пространство

Максимальный объём памяти, которая может быть адресована в компьютере.

Адсорбция

Физический процесс поглощения газов или частиц вещества поверхностным слоем твёрдого тела.

Аккумулятор

1. Устройство, предназначенное для накопления энергии (в виде электрического заряда) и её последующей передачи потребителям. В отличие от первичных источников тока (гальванических элементов), аккумулятор рассчитан на большое количество циклов зарядки/разрядки. В определённом смысле, любой конденсатор также можно рассматривать как аккумулятор. Однако на практике такие «аккумуляторы» оказываются неэффективными, поэтому повсеместно применяются электрохимические устройства.

2. Регистр процессорного ядра, предназначенный для осуществления арифметических или логических операций (например, суммирования).

Активная область

В электронике — электрически или оптически эффективная область компонента.

Активный компонент

В отличие от пассивного компонента, данный компонент может увеличивать полезную электрическую мощность сигнала (см. также *Усиление*). Активные компоненты — это в основном полупроводниковые приборы, но иногда (пока ещё) и электровакуумные приборы.

Активный фильтр

Схема фильтра со встроенным усилителем, что позволяет улучшить характеристики фильтра (ср. фильтр Баттерворта, фильтр Бесселя, фильтр Чебышева).

АЛУ

Арифметико-логическое устройство — один из важнейших модулей электронного компьютера.

Аналоговая схема

Электронный функциональный блок, генерирующий или обрабатывающий аналоговые сигналы (см. также *Логическая схема*, *Память*).

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

Преобразователь аналогового сигнала в цифровой код (см. также *ЦАП*).

Анион

Отрицательно заряженный ион (см. также *Катион*).

Анод

Положительно заряженный электрод.

Аппаратная ловушка

Условие стопа, реализуемое в процессе тестирования (отладки) микроконтроллерной системы.

Аппаратная ошибка

Постоянная (систематическая) ошибка, вызванная неисправностью аппаратуры (см. также *Программная ошибка*).

Аппаратное обеспечение

Оборудование, «железо», материальная часть компьютера. Сюда не относятся программы и данные, для которых применяется термин «программное обеспечение».

Аппаратный (Hard-wired)

Постоянно подключённый процессорный блок на микроконтроллере.

Аррениуса закон

Закон, в соответствии с которым интенсивность отказов полупроводниковых компонентов увеличивается экспоненциально с ростом температуры.

Аррениуса модель

Модель, используемая при испытаниях полупроводниковых компонентов на надёжность. В данной модели повышение интенсивности отказов рассматривается как следствие возрастания температуры компонентов (см. также *Эйринга модель*, *Пека модель*).

Ассемблер

Машинно-ориентированный язык программирования, в котором команды запи-

сываются в виде мнемонических кодов, каждому из этих кодов соответствуют определённые машинные коды (см. также *Ассемблирование*). Достоинствами языка ассемблера являются ускоренная обработка последовательностей команд и непосредственный доступ к аппаратным средствам системы. Однако он не столь интуитивно понятен и удобен в использовании, как языки программирования высокого уровня.

Ассемблирование

В программировании — преобразование (компилирование) программы, написанной на языке ассемблера, в последовательность соответствующих машинных кодов.

Ассоциативное ЗУ

Запоминающее устройство (память с адресацией по содержанию), обращение к ячейкам которого осуществляется не по фиксированным адресам или позиции в адресном пространстве, а на основе анализа данных, содержащихся в этих ячейках.

Аттестация

Результат испытаний, в ходе которых измеряются и оцениваются все основные характеристики электронного компонента. Лишь после проведения этой процедуры можно с достоверностью утверждать, что компонент подходит для использования по назначению (см. также *Сертификация*).

База

Очень тонкий полупроводниковый слой в биполярном транзисторе с одним граничным слоем к коллектору и одним — к эмиттеру.

Байт

Единица измерения информации, а также логически единая группа из 8 бит (обеспечивает кодирование 256 комбинаций чисел). Слово «байт» (byte) образовано как производное от английского выражения «By Eight» («по 8»); иногда используется термин «октет» (см. также *Полубайт*).

Баркгаузена эффект

Одновременное и иногда слышимое сворачивание молекулярных структур (ферромагнитных доменов), которое происходит, когда определённые материалы подвергаются перемагничиванию. Открыт Г. Баркгаузенем в 1917 году.

Барнета эффект

Явление, наблюдаемое в некоторых ферромагнитных материалах самопроизвольной намагниченности при простом вращении в отсутствии внешнего магнитного поля.

Безопасность данных

Защита данных от несанкционированного доступа или от физических повреждений.

Бета-версия

Предварительная версия аппаратного или программного обеспечения. Обычно выпускается с целью тестирования («обкатки») в реальных условиях.

Библиотека стандартных элементов (ASIC library)

Набор типовых схемотехнических решений, позволяющих реализовывать такие функции, как логические вентили, счётчики, мультиплексоры и т.д.

Бинарный файл

Файл, который состоит из последовательности 8-битных данных или исполняемых кодов.

Бинарный

Двоичный, состоящий из двух компонентов. Работа всех современных цифровых компьютеров основана на использовании двоичных кодов (см. также *Троичный*).

Биполярный

Свойство полупроводниковых компонентов, в которых используются как *p*-, так и *n*-области. Простейшей структурой является *p-n*-диод (см. также *Униполярный*).

Бистабильный

Данный термин относится к описанию систем или компонентов, имеющих два возможных рабочих состояния, например «включено» и «выключено».

Бит переноса

Позиция бита, который сигнализирует о наличии переполнения (переноса) при выполнении операции сложения.

Бит

Минимальная единица измерения информации, соответствующая одному разряду двоичного числа, которая содержит информацию об одном из двух возможных состояний. Множественное число для этого термина, если речь идёт о количественном выражении единиц информации, пишется так

же, как и единственное, т.е. «бит» (например, объём памяти составляет 16 бит). В прочих же случаях слово «бит» пишется в соответствии с правилами русского языка (например, два последних бита в слове данных).

Боде диаграмма

Способ отображения частотной зависимости амплитуды и/или фазы в электрической цепи на круговой диаграмме.

Брак

Продукция, качество которой не соответствует заданным требованиям.

Булева алгебра

Разработанная Джорджем Булем система операций над логическими величинами, которая особенно хорошо подходит для применения в цифровых технологиях.

Бута алгоритм

Алгоритм, реализующий быстрое поэтапное перемножение и деление двоичных чисел. Данный алгоритм часто используется при обработке сигналов в микроконтроллерах и DSP-процессорах.

Варистор

Пассивный полупроводниковый компонент. Величина его сопротивления электрическому току зависит от приложенного напряжения (см. также *VDR*). Часто применяется в качестве ограничителя выбросов напряжения (см. *Выбросы*).

Вентиль

Электронный логический элемент, реализующий ту или иную логическую операцию (например, И-НЕ, И, ИЛИ, и т.д.; см. также *Булева алгебра*).

Вентильная матрица

Данный тип заказных интегральных микросхем (при его описании употребляются также термины ASIC и логическая матрица) представляет собой размещённый на полупроводниковом кристалле массив базовых логических ячеек (вентилей). Связь между ними осуществляется через проводящие каналы, проложенные в кристалле (так называемая канальная технология вентильной матрицы). Каждый вентиль содержит от 2 до 8 транзисторов. Лишь на самом последнем этапе производства ИС на поверхность кристалла наносится слой, предназначенный для коммутации вентилей с целью реа-

лизации заданных логических функций. Единственный недостаток данной технологии состоит в том, что большая часть чипа остаётся незадействованной.

Вибростенд

Установка для испытаний полупроводниковых компонентов и оборудования на устойчивость к вибрациям.

Вложение программ

Вызов подпрограмм из уже выполняющейся подпрограммы.

Восьмеричный

Термин относится к числам, представленным в системе счисления по основанию 8 (см. также *Двоичный*, *Десятичный*, *Шестнадцатеричный*).

Время нарастания

Период времени с момента инициации процесса включения до его завершения, т.е. до того момента, когда ключ оказывается в открытом состоянии (этот момент определяется как параметрами самого ключа, так и требованиями к уровню входного сигнала; как правило, ключ считается открытым при достижении 90% от уровня сигнала).

Время предзаряда

Время, которое требуется запоминающему устройству, для обновления данных.

Время простоя

Время (в абсолютном или процентном выражении), в течение которого устройство или система находятся в нерабочем состоянии (см. также *Отказ*).

Время спада

Период времени с момента инициации процесса выключения до его завершения, т.е. до того момента, когда ключ оказывается в разомкнутом состоянии (этот момент определяется как параметрами самого ключа, так и требованиями к уровню входного сигнала; как правило, ключ считается закрытым при достижении 10% от исходного уровня сигнала).

Время хранения

Интервал времени, в течение которого содержимое ячейки памяти DRAM всё ещё является корректным, несмотря на процессы утечки заряда (также используется термин «время обновления данных»).

Встречно-параллельно

Тип схемы включения, при которой два диода соединяются параллельно в противоположных направлениях.

ВЧ (HF)

Высокие частоты. Не совсем чётко определённый частотный диапазон, в нижней части которого располагается область радиочастот, наиболее часто используемых на практике.

Выборка и хранение

Метод дискретизации, когда определяется мгновенное значение измеряемой переменной величины (например, напряжения) и запоминается в аналоговом буфере.

Выборка с упреждением

Концепция работы с запоминающими устройствами длительного хранения данных, когда содержимое ячеек памяти, к которым вероятно вскоре будет производиться обращение, заранее переписывается в кэш.

Выбраковка

Сортировка партии продукции и исключение из неё изделий с дефектами качества.

Выбросы (spike)

Неконтролируемые импульсы напряжения, возникающие при переключательных и тому подобных процессах. Выбросы напряжения могут привести к генерации значительных электромагнитных помех.

Выводная рамка

Прямоугольная металлическая рамка (кристаллодержатель) со смонтированными на ней выводами и соединительными элементами, представляющая собой основной элемент корпуса ИС. При монтаже корпуса кристалл соединяется с контактами выводной рамки (которую иногда называют «пауком» из-за топологии выводов).

Выводной монтаж

Способ монтажа компонентов на печатной плате, когда штыревые выводы компонента вставляются в сквозные отверстия, просверленные в печатной плате.

Выделенное аппаратное обеспечение

Аппаратные средства, предназначенные для выполнения узко специализированных задач.

Высокая производительность

Важный, хотя и не совсем чётко заданный критерий, определяющий быстродействие компьютерных систем и их отдельных компонентов (см. также *Whetstone*).

Выход годных изделий

Процент полупроводниковых устройств (микросхем), признанных годными (т.е. удовлетворяющих определённым критериям), по отношению ко всему объёму произведённой продукции.

Выход

Точка, откуда «снимается» выходной сигнал той или иной схемы.

Гарвардская архитектура

Компьютерная архитектура, предусматривающая хранение данных и кода программ в отдельных областях памяти (см. также *Фон-неймановская архитектура*).

Генератор

Электронная схема, которая генерирует (формирует) периодически изменяющийся выходной сигнал. На практике, почти все генераторы состоят из усилителя с положительной обратной связью и частото-задающего элемента (см. также *Кварц*, *VCO*).

Герц

Единица измерения частоты в международной системе СИ. 1 Гц = 1 колебание в секунду. Названа в честь Генриха Герца, прославившегося своими исследованиями радиоволн.

Гетеропереход (гетероструктура)

Граничный слой между двумя полупроводниковыми материалами, например AlAs/GaAs.

Гибкий соединитель

Волоконно-оптический соединитель, в котором два сопрягаемых световода изогнуты под таким углом, чтобы свет выходил из центра изгиба (см. также *Паяный соединитель*).

Гибрид

В общем смысле, это объединение двух различных технологий.

Гигабитный чип

Микросхема памяти, в состав которой входит 1 миллиард и более ячеек памяти ($2^{30} = 10^9$).

Гиратор

1. Электронная схема, которая сдвигает фазу сигнала на 180° .

2. Схема, которая обеспечивает ток, пропорциональный входному напряжению (источник тока).

Гнездо (розетка)

Разъём, установленный на печатной плате и предназначенный для монтажа в него соответствующего электрического или электронного компонента.

Горячие электроны

Свободные электроны, кинетическая (тепловая) энергия которых значительно больше kT (k — постоянная Больцмана, T — температура в градусах Кельвина).

Гроува закон

Эндрю Гроув, один из основателей корпорации Intel, выступая в 1999 году на конференции «Бизнес и технология в следующем тысячелетии», обвинил боссов американской телекоммуникационной индустрии в стремлении получать прибыль не путём расширения рынка и объёмов предоставляемых услуг, а путём банального повышения тарифов, что, в свою очередь, сдерживает развитие новых телекоммуникационных технологий. В связи с этим он сформулировал «закон Гроува»: «...полоса пропускания телекоммуникационных систем США удваивается каждые 100 лет». Гроув также добавил: «Если бы мы (компания Intel) действовали подобным образом, то до сих пор продавали бы процессоры 8086».

Групповое время задержки

Период времени, в течение которого в приёмное устройство по линии передачи поступают различные составляющие сигнала, переданные в линию одновременно. В идеальном случае, групповое время задержки должно быть равно нулю, однако на практике сказывается влияние эффекта дисперсии (зависимости скорости распространения сигнала по линии передачи от частоты). Таким образом, различные гармоники исходного сигнала «прибывают» в приёмное устройство не одновременно. Это приводит к искажению формы сигнала, фазовым сдвигам и вызванному этим снижению производительности канала передачи.

Дарлингтона схема

Последовательное включение транзисторов, при котором эмиттер первого транзистора обеспечивает базовый ток для второго. В результате получается чрезвычайно большое усиление по току.

Датчик положения

Датчик, выходной сигнал которого содержит информацию о текущем положении контролируемого объекта (относительно некой опорной точки). По принципу действия подобные датчики могут быть индуктивными, ёмкостными, резистивными, оптическими или ультразвуковыми.

Двунаправленный

1. В системах передачи данных — возможность передачи в обоих направлениях, одновременно или в режиме разделения по времени (см. также *Дуплекс*).
2. В матричных принтерах — возможность печати как на прямом, так и на обратном проходе печатающей головки.
3. В переключателях — возможность коммутации тока в обоих (прямом и обратном) направлениях.

Деградация

Для всех полупроводниковых электронных компонентов, являющихся источниками электромагнитных излучений, с увеличением срока службы наблюдается снижение выходной мощности; причины этого до сих пор не вполне объяснимы.

Декодер

Устройство, предназначенное для декодирования сигналов.

Декрементирование

Уменьшение значения числа на 1 (см. также *Инкрементирование*).

Демодуляция

Процесс восстановления исходного сигнала из модулированного сигнала (см. также *Модуляция*).

Десятичная система счисления

Международная стандартизированная система счисления с основанием десять.

Детектор

Устройство, предназначенное для обнаружения, распознавания и фиксирования (записи) электрических сигналов или других физических явлений; чаще всего представляет собой электронную схему.

Джампер (jumper)

Съёмная перемычка между электрическими контактами; устанавливая или снимая её, пользователь может задавать (выбирать) те или иные функции устройства.

Джиттер (jitter)

Случайные непредсказуемые изменения фазы периодического сигнала, выражающиеся в «дрожании» точки перехода через нуль. В цифровых устройствах подобные флуктуации могут стать причиной нарушения синхронизации.

Джоя закон

Открытый Биллом Джоем (Bill Joy), основателем компании Sun Microsystems, этот закон гласит, что вычислительная мощность процессоров имеет экспоненциальную зависимость от времени. Так, RISC-процессоры «соблюдают» эту закономерность вот уже с десятков лет (однако развитие CISC-процессоров происходило несколько медленнее). И ещё одна цитата из Б. Джоя: «Лучшие игроки на поле всегда в чужой команде».

Дизассемблер

Программа, которая преобразует (транслирует) машинные коды в последовательность команд на языке ассемблера.

Дисковая операционная система

Наиболее хорошо известна MS-DOS, которая была разработана компанией Microsoft и с 1981 года использовалась в качестве операционной системы в компьютерах IBM PC. Дисковая операционная система целиком располагается на внешнем носителе данных и загружается с него.

Дискретизация

В системах обработки аналоговых сигналов — периодическая выборка (измерение) значения сигнала, как правило, с целью последующего его преобразования в цифровой сигнал (см. также *Частота дискретизации*).

Дифференциальный детектор

Детектор, который реагирует на изменение сигнала.

Диффузия

Спонтанное распределение молекул и/или носителей заряда внутри полупроводникового материала.

Драйвер

Схема, к выходу которой подключается, как минимум, одно внешнее устройство (схема) или которая управляет, как минимум, одним внешним устройством (см. также *Нагрузочная способность по выходу*).

Дробовой шум

Шум, связанный с дискретностью носителей заряда и проявляющийся в виде флуктуации токов и напряжений. Его уровень возрастает с увеличением амплитуды сигнала и не зависит от температуры (см. также *Шум*).

Дуплекс

Возможность передачи информации по каналу связи в обоих направлениях. Дуплексный режим означает, что информация передаётся одновременно и в прямом, и в обратном направлениях. В полудуплексных системах информация поочередно передаётся в одном или в другом направлении.

Ёмкость (объём) памяти

Общий объём памяти модуля памяти или иного носителя информации; выражается в битах или байтах.

Зависание (блокировка)

Ситуация, которая возникает, когда две программы или два взаимодействующих между собой устройства ожидают друг от друга ответа (отклика), либо некое устройство ожидает наступления некоторого заданного события (условия). Поскольку даже при самом тщательном программировании существует вероятность того, что в какой-то момент зависание системы всё-таки произойдёт, должны быть предусмотрены аппаратные механизмы, надёжно распознающие ситуацию зависания (см. также *Сторожевой таймер*).

Загрузка

Процесс переписывания данных, хранящихся на внешнем носителе, в рабочую память компьютера, с тем чтобы они могли быть прочитаны и обработаны процессором.

Запоминающее устройство

Электронный функциональный блок, предназначенный для сохранения информации и последующей «выдачи» её в неизменном виде (см. также *Аналоговая схема*, *Логическая схема*).

Затухание

Снижение уровня сигнала (потери) в электрической схеме или в линии передачи; обычно выражается в дБ.

Зашёлка

Регистр, предназначенный для временного сохранения (удержания) данных.

Защита данных

Законодательно регулируемая процедура, ограничивающая возможность некорректного использования персональной информации, например несанкционированного доступа к ней сторонних лиц.

Защита файлов

Меры по защите файлов в компьютере от несанкционированного доступа или повреждения.

Зона локального перегрева (hot spot)

Некоторая точка на поверхности полупроводникового кристалла, температура в которой очень сильно повышается вследствие концентрации тепловой энергии, рассеиваемой в процессе работы микросхемы. Производители полупроводниковых компонентов всегда сталкиваются с необходимостью предсказывать и предотвращать появление таких зон; поэтому обычно предпринимаются соответствующие меры по оптимизации разводки соединений внутри микросхемы. Существует немало симуляционных программ, предназначенных для этой цели (см. также *FEM*).

И2Л (I2L)

Интегральная инжекционная логика (известна также как логическая схема с «совмещёнными» транзисторами). Тип цифровых логических микросхем, в которых используется совмещение в одной области полупроводникового кристалла токозадающего (инжекционного) *p-n-p*-транзистора и переключающего *n-p-n*-транзистора (их базы совмещены между собой). Микросхемы И2Л характеризуются относительно высокой скоростью переключения и малым энергопотреблением, а также высокой плотностью интеграции (площадь, приходящаяся на один логический элемент И2Л, почти в 10 раз меньше, чем в микросхемах ТТЛ).

Избыточность

Дублирование функций в электронных устройствах. Смысл этого состоит в том, чтобы предотвратить возможные сбои в работе

или, по крайней мере, гарантировать функционирование системы в аварийных режимах. Кроме того, избыточность функций нужна при детектировании аварийных режимов и, при возможности, для коррекции ошибок. В идеальном варианте, уровень избыточности должен быть как можно меньшим (чтобы снизить затраты) и, в то же время, достаточно большим, чтобы удовлетворить вышеперечисленным требованиям и обеспечить надёжность системы.

Изолятор

Материал с очень низкой электрической проводимостью.

Индукция

1. Метод, в соответствии с которым общий логический вывод (умозаключение) производится на основании ограниченного числа положений (т.е. от частного — к общему).
2. Возникновение электродвижущей силы в проводнике при изменении напряжённости окружающего магнитного поля.

Инициализация

Перевод системы в состояние готовности к началу работы (см. также *Начальная загрузка*).

Инкрементирование

Увеличение значения числа на 1 (см. также *Декрементирование*).

Инсталляция

1. Настройка параметров аппаратного оборудования компьютерной системы.
2. Установка в компьютер дополнительного аппаратного оборудования и его настройка.
3. Копирование программного обеспечения на жёсткий диск компьютера и последующая настройка его параметров под работу в системе.

Инструментальные средства разработки

Программные или аппаратные средства, облегчающие процесс разработки электронных схем или программного обеспечения.

Интенсивность отказов

Относительное количество компонентов, вышедших из строя в течение определённого периода времени. Обычно выражается в «фитах» (fit, сокращение от «failures-in-time»). 1 фит = 1 отказ / 10^9 компоненто-часов.

Интерпретатор

Транслятор; в системах обработки данных — программа, которая преобразует команды, написанные на языке программирования, в соответствующие машинные коды и немедленно их исполняет.

Информационные технологии

Область знаний, связанных с изучением и обработкой информации.

Инфракрасный

Оптическое излучение с длиной волны в диапазоне примерно от 780 нм до 400 мкм.

ИС

Интегральная схема. Первая гибридная ИС была разработана в 1958 году Джеком Кирби в исследовательской лаборатории компании Texas Instruments; независимо от него в 1959 году сотрудники компании Fairchild Роберт Нойс и Гордон Мур (в дальнейшем они вошли в число основателей Intel) спроектировали первую планарную ИС.

Испытания на виброустойчивость

Метод испытаний полупроводниковых компонентов на устойчивость к вибрациям, когда проверяемый образец подвергается периодическому ударному воздействию заданной величины.

Источник питания

Силовой блок, который осуществляет непосредственное питание электрооборудования напряжением постоянного тока. Источник питания обычно преобразует переменное напряжение, поступающее из электрической сети, в постоянное напряжение. В качестве источников питания могут также использоваться аккумуляторы и батареи гальванических элементов.

Исходный код

Программа для компьютера в том виде, в каком она изначально была написана программистом (например, на языке высокого уровня). Исходный код не является исполняемым и предварительно должен быть преобразован (оттранслирован) в машинный код программой-компилятором (см. также *Ассемблирование*, *Машинный код*).

Исходный файл

Файл, из которого считываются данные (например, при копировании данных).

Канал связи

В коммуникационных технологиях — физическое соединение (канал передачи данных).

Катион

Положительно заряженный ион (см. также *Анион*).

Катод

Отрицательно заряженный электрод.

Качество

В соответствии с определениями стандарта DIN 5530, качество есть «совокупность характеристик продукции или процесса, влияющих на их способность удовлетворять заданным требованиям».

Квантовая эффективность (квантовый выход)

Количество носителей заряда, высвобожденных фотоном в результате фотоэлектрического эффекта. Квантовая эффективность зависит от соответствующей энергии фотона, т.е. от длины волны.

Кварц

Кристаллическая структура, выполненная из диоксида кремния (SiO_2). Основным параметром кварцевой пластины является частота собственного резонанса, отличающаяся высокой стабильностью и дискретностью. Поэтому кварцы с успехом применяются для стабилизации частоты колебаний генераторов, особенно если предусмотрена их температурная стабилизация.

Квота (доля) отказов

Доля отказов (за определённый период времени). Процент отказов, проявляющихся во время *Термотренировки* компонентов.

Кермет

Композитный материал (металлокерамика), используемый, например, при производстве резисторов.

Климатическая камера

Помещение, в котором обеспечивается возможность регулировки температуры и уровня влажности воздуха. Используется при испытаниях полупроводниковых компонентов в заданных условиях окружающей среды (см. также *Термотренировка*).

Клон

Копия объекта или структуры данных, имеющая связь с оригиналом. Любые последующие

изменения оригинала непосредственно отображаются и в копии.

КМОП (CMOS)

Комплементарная МОП-технология, используемая при построении логических элементов. Применение данной технологии позволяет существенно снизить требования к мощности источника питания ИС, поскольку в режиме хранения логический элемент КМОП практически не потребляет энергии. Энергия потребляется лишь динамически в процессе перезарядки переключаемых (с помощью полевых транзисторных ключей) конденсаторов.

Когерентность

В оптике — свойство электромагнитных волн, имеющих постоянное соотношение фаз. Например, лазерные диоды имеют сильную когерентность, в противоположность светодиодам.

Код операции

Часть слова в формате записи команды микропроцессора.

Кодек

См. *CODEC*.

Коммуникационные технологии

Общее название технологий, связанных с реализацией систем связи и обмена информацией. Сюда относятся как телекоммуникационные, радио- и телевизионные, так и компьютерные системы, а также технологии хранения информации и печати.

Коммутация

Переключение электрической нагрузки в устройствах усилительной и силовой электроники; процесс, который может стать причиной нежелательных эффектов (например, выбросов на вершинах импульсов).

Компаратор

Устройство, которое сравнивает два входных уровня напряжения и определяет, какой из них выше.

Компилятор

Специальная программа, которая преобразует программу, написанную на языке высокого уровня, в машинный код. RISC-компиляторы, к тому же, размещают этот машинный код в памяти таким образом, чтобы обеспечить оптимальность работы RISC-конвейера команд.

Компиляция

Перевод (трансляция) программы, написанной на языке программирования, в исполняемый машинный код.

Комплектация

Составление из компонентов, поставляемых по отдельности, полного набора компонентов, который затем обычно используется для окончательного изготовления продукции.

Компьютер

Вычислительное устройство. Некогда компьютеры были механическими, затем электромеханическими; начиная с 1950-х годов, они строятся исключительно на электронных логических элементах. Большинство современных компьютеров являются цифровыми и построены на переключателях двоичных сигналов (см. также *ALU*, *CPU*, *PC*).

Конвейер

В системах обработки данных — метод ступенчатой обработки последовательностей команд или данных.

Конвейеризация

Метод одновременного исполнения команд процессора с целью ускорения работы программ. Если реализован полный конвейер, то в среднем каждая команда исполняется за один цикл тактовой частоты.

Конденсационная пайка

Известна также как пайка струёй горячего пара. Метод пайки, когда постоянная температура припоя поддерживается за счёт того, что печатная плата целиком находится в атмосфере паров кипящего паяльного флюса.

Конкатенация

Каскадирование, включение одной электронной схемы последовательно с другой.

Контактная площадка

Относительно большая (по площади) металлизированная область на поверхности полупроводникового кристалла ИС, которая позволяет обеспечить электрический контакт с соответствующим выводом корпуса ИС или с тестовым пробником.

Контактное сопротивление

Сопротивление электрическому току, возникающее в точке соединения двух проводников. Загрязнение контактных поверхностей, их неровность и неоднородность могут привести к тому, что контактное сопротивление в итоге значительно превысит вели-

чину, определяемую электрическими свойствами применяемых материалов.

Контактное усилие

Механическое усилие, с которым электрические контакты разъёмных соединений прижимаются друг к другу.

Контроллер

Управляющий модуль или устройство.

Контроль качества

Совокупность мер, направленных на обеспечение определённого уровня качества продукции или услуг. Эти меры должны предприниматься как на этапе разработки продукции, так и в течение всего процесса её производства и даже после её отправки потребителю.

Кошачий глаз

Типичное графическое представление процесса циклического переключения высокочастотных сигналов. Такой процесс легко детектируется до тех пор, пока можно устойчиво определить момент перехода через нуль при переключении. С увеличением частоты переключения начинают возникать ошибки, вызванные дисперсным разбросом момента перехода через нуль. В каналах передачи данных это приводит к росту интенсивности ошибок передачи (см. также *BER*). Графическое представление процесса переключения по мере увеличения частоты видоизменяется от упорядоченного прямоугольного периодического сигнала в сторону сложной «переплетающейся» картины (так называемых кошачьих глаз).

Коэффициент заполнения

Отношение длительности импульса к интервалу между соседними импульсами в импульсной последовательности (отношение времени включённого состояния к времени выключенного состояния).

Кристалл (die)

С точки зрения технологии производства полупроводниковых компонентов, это определённая часть полупроводниковой пластины, подвергшейся окончательной обработке и представляющая собой функционально полностью работоспособное электронное изделие. Часто для его обозначения используется термин «чип», особенно в тех случаях, когда эта функционально завершённая часть отделяется от полупроводниковой пластины.

Критическая нагрузка

Предельное значение электрической нагрузки (величины нагрузочного сопротивления) электронного компонента, при котором он ещё сохраняет работоспособность без риска получить повреждение.

Кросс-ассемблер

Специальная программа-транслятор, которая преобразует (транслирует) программы, написанные на машинно-ориентированном языке программирования (ассемблере), в код, который может быть выполнен на другой компьютерной платформе.

Кросс-компилятор

Программа-компилятор, преобразующая исходный машинный код в исполняемый машинный код для другой компьютерной платформы.

Крутизна характеристики

Первая производная от функции, описывающей зависимость одной величины от другой (например, зависимость светового потока, генерируемого лазерным диодом, от величины тока через диод). В графическом виде крутизна представляет собой касательную к характеристике, отображающей указанную зависимость.

Кэш с отложенной записью

Стратегия обработки данных в компьютере, в соответствии с которой данные, предназначенные для загрузки в устройство хранения данных компьютера, сначала сохраняются в системном кэше, если к ним недавно производилось обращение (соответственно, при последующих обращениях к этим данным они будут извлекаться уже из кэша). Таким образом, удаётся снизить количество относительно медленных операций обращения к внешнему устройству хранения данных (например, жёсткому диску) для чтения и записи, чем достигается повышение общей производительности системы.

Кэш

От *франц.* «тайник». В компьютерных технологиях данный термин обозначает буферное устройство памяти, использование которого позволяет уменьшить количество циклов ожидания при работе системы. Благодаря предварительной буферизации данных, которые, скорее всего, в ближайшие моменты времени будут востребованы системой, можно повысить скорость обработ-

ки данных, расположенных в основной памяти, и/или уменьшить время обращения к этим данным (см. также *Кэш с отложенной записью*).

Лавинный эффект (умножение)

Если очень высокое напряжение падает в области пространственного заряда, где есть *p-n*-переходы, то область пространственного заряда теряет свои изолирующие свойства. Высокое напряжение ускоряет носители заряда в области пространственного заряда до такой степени, что новые носители заряда генерируются лавинообразно путём ударной ионизации. Лавинный эффект представляет собой результат действия сильного электрического поля в полупроводниках.

Лицензия

Документ, подтверждающий правомерность использования продукции, например книги или программного обеспечения. Обычно лицензия прилагается при покупке копии продукта.

Логика

Научный метод познания, цель которого состоит в получении непротиворечивых выводов и решений.

Логистика

Управление материальными ресурсами производства. Например, организация системы поставки комплектующих и их использования в процессе производства.

Логическая алгебра

См. *Булева алгебра*.

Логическая операция

Любая операция, основанная на использовании булевой алгебры.

Логическая схема

Электронный функциональный блок, предназначенный для обработки входной информации, представленной в двоичном коде (см. также *Аналоговая схема*, *Память*).

Логический анализатор

Сложное устройство, предназначенное для контроля функционирования логических схем и процессоров, а также для коррекции их работы с целью обеспечить максимально возможный уровень автоматизации в «машинно-ориентированном» смысле. Это предполагает реализацию следующих задач: контроль сигналов на системной шине в

процессе исполнения текущей загруженной программы; остановка исполнения программы, если к запрошенной области памяти уже осуществляется обращение для чтения или записи; трассировка некоторого числа команд в случае, когда исполнение программы по той или иной причине было прервано (см. также *Отладчик*, *Точка останова*).

Макетная плата

Тестовая плата с отверстиями, предназначенными для предварительного размещения электронных компонентов. Обычно макетные платы изготавливаются из гетинакса или других пластиков.

Макроассемблер

Язык программирования, который, по сути, близок к машинному языку, но использует символьные обозначения команд, что облегчает их восприятие человеком.

Макрос

Небольшая программа, выполняющая чётко определённую прикладную функцию.

Максимально допустимый режим работы

См. *Критическая нагрузка* и *Ограничение допустимых значений*.

Малозатратный

Данный термин употребляется в отношении к аппаратным или программным продуктам или технологиям и означает, что для их производства или реализации не требуется больших материальных затрат. Малозатратность тесно связана с экономической эффективностью.

Массив

1. Матрица или определённым образом упорядоченный набор однородных (схожих) элементов.
2. В программировании — список данных (также используется термин «поле переменных») одного типа. Массивы представляют собой основные структуры данных.

Мастер (master):

1. Основное устройство или схема (например, задающий генератор), определяющая работу последующих устройств.
2. Базовый матричный кристалл. Готовая полупроводниковая пластина, содержащая элементы вентильной матрицы.
3. Ведущее устройство, которое, например, инициирует процесс передачи данных через интерфейс ПК.

Матплата

Основная (материнская) печатная плата электронного устройства (например, компьютера), на которой расположены все наиболее важные для работы электронные блоки и модули. Если в системе требуется использовать дополнительные платы устройств, то они обычно вставляются в специальные разъёмы на материнской плате или подключаются к шинному интерфейсу через другие виды соединений.

Машинная команда

Машинно-ориентированная команда (может быть включена в систему команд языка высокого уровня), которая может исполняться процессором непосредственно (не требует трансляции).

Машинный код

Последовательность команд, предназначенная для непосредственного исполнения процессором (однако очень мало наглядная с точки зрения человеческого восприятия). Фактически, это последовательность логических нулей и единиц, лишь косвенно «привязанная» к соответствующим командам программы. Последняя должна быть сначала откомпилирована или ассемблирована, чтобы получить машинный код, удовлетворяющий определённым правилам. Иногда вместо термина «машинный код» используют термины «объектный код» или «машинный язык».

Мехатроника

Технология, объединяющая в себе проектирование датчиков, исполнительных устройств и технологии цифровой обработки сигналов.

Микроконтроллер

Управляющий модуль на базе микропроцессора, с помощью которого реализуется работоспособная компьютерная система. Практически все основные компоненты такой системы интегрированы непосредственно в микроконтроллер.

Микрологика

Набор электронных логических схем или команд, записанных в двоичном виде, которые определяют и контролируют процессы переключения сигналов и передачи данных внутри микропроцессора.

Микропрограмма

Последовательность микрокоманд (микрокод) процессора, которая на самом низком, процессорном уровне управляет элементарными операциями над его внутренними регистрами. Каждая из команд машинного кода представляет собой микропрограмму. Некоторые системы (в первую очередь, миникомпьютеры и большие ЭВМ) допускают возможность программирования на уровне микрокоманд, даже после инсталляции процессора.

Микропроцессор

Программируемый однокристалльный модуль (интегральная схема), реализующий основные функции «большого» компьютера. Включает в себя вычислительную часть — арифметико-логическое устройство (АЛУ), декодер команд и блок управления очередью команд. Кроме того, в чип микропроцессора может быть интегрировано большое количество различных периферийных функций (см. также *Микроконтроллер*).

Микрочип

Небольшая полупроводниковая пластина с интегральной схемой.

МикроЭВМ

Общий термин, обозначающий компьютер, ЦПУ которого представляет собой микропроцессор.

Микроэлектроника

Общий термин, относящийся к технологиям производства интегральных электронных схем (см. также *Микрочип*).

Мнемоника

Система ассоциаций, облегчающая пользователю запоминание аббревиатур команд и т.п. Большинство языков программирования и операционных систем имеют свои словари мнемонических кодов. Например: «Ctrl» вместо Control или «JMP» вместо Jump (переход).

Многозадачность

Одновременное исполнение двух и более программ в компьютере.

Многопоточность

Параллельное исполнение нескольких программ в рамках одной программы. Задачи также могут одновременно исполняться и сохраняться в памяти.

Многопроцессорная система

Система, в которой два или более процессоров работают совместно, с большей (жёсткое соединение) или меньшей (нежёсткое соединение) степенью их взаимодействия друг с другом. Синхронизация совместной работы имеет особенно большое значение и обычно реализуется посредством так называемого семафорного механизма. Назначение многопроцессорных систем состоит в повышении производительности системы за счёт разделения задач и их параллельной обработки.

Модем

Искусственное слово, образованное комбинацией слов Модулятор и Демодулятор, и обозначающее устройство, которое преобразует дискретные данные в аналоговый сигнал с целью его дальнейшей передачи по аналоговой телефонной линии. Модем осуществляет также и обратную операцию и комплектуется соответствующей программой (драйвером), предназначенной для управления процессом обмена данными.

Монокристалл

Полупроводниковый кристалл с гомогенной (однородной) структурой, в идеальном случае — без каких-либо изъянов.

Море вентилей (технология)

Разработанная компанией Siemens AG технология производства специализированных заказных интегральных схем (ASIC). Вентили коммутируются друг с другом не с помощью специальных проводящих каналов, а соединяются непосредственно через ячейки (логические элементы) вентильной матрицы. Применение данной технологии позволяет уменьшить размеры кристалла.

Мультивибратор

Триггерная электронная схема с двумя состояниями. Оба этих состояния могут быть устойчивыми (тогда получаем мультивибратор, или flip-flop) либо устойчивым является только одно состояние (у одновибратора, который вырабатывает одиночный импульс и снова возвращается в это устойчивое состояние). Как правило, для изменения состояния мультивибратора/одновибратора требуется внешний запускающий импульс. Существуют, однако, и мультивибраторы с самовозбуждением, состояние которых изменяется периодически и без внешнего воздействия (см. также *Генератор*).

Мультиплексирование

Мультиплексор, реализованный аппаратным или программным способом, обеспечивает чередование сигналов (т.е. на выходе схемы в каждый момент времени может присутствовать только один из нескольких входных сигналов). При этом может использоваться пространственное, временное или частотное разделение сигналов. Для осуществления обратной операции используется демультиплексор.

Мура закон

В 1964 году Гордон Мур (один из основателей компании Intel) обратил внимание на тот факт, что количество транзисторов, интегрированных в одну интегральную схему, ежегодно удваивается. Этот «закон» продолжает действовать и по сей день (несмотря на то что практически до конца 1970-х годов удвоение числа транзисторов происходило приблизительно через каждые полтора года). Не так давно Мур совершил ещё одно открытие: оказывается, суммы инвестиций, вкладываемых в производство ИС, удваиваются с появлением каждого нового поколения микросхем (см. также *Гроува закон*, *Джоя закон*).

Набор команд

Полный набор машинных команд, которые могут быть «восприняты» и выполнены данным конкретным процессором и/или поддерживаются соответствующим языком программирования (см. также *Ассемблер*, *Микрокод*).

Нагрузочная способность по выходу

Характеристика драйвера, выражающаяся в количестве входов внешних устройств, которые могут быть одновременно подключены к выходу драйвера. Следовательно, данная характеристика зависит от параметров входов внешних устройств.

Надёжность

Способность технического устройства обеспечивать заданные рабочие характеристики в течение определённого промежутка времени (см. также *MTBF*, *MTTF*, *MTTR*, *Отказ*).

Нанотехнология

Технология, связанная с исследованиями и производством материалов, размер структуры которых не превышает 1 мкм.

Нарастающий фронт

Начало, область нарастания электрического импульса (см. также *Спадающий фронт*).

Начальная загрузка

Процесс инициализации компьютера после подачи питания. Осуществляется под управлением *Программы начальной загрузки* и состоит в записи определённых значений в различные регистры процессора и в сохранении содержимого определённых ячеек памяти в определённых местах.

Неконтактный переключатель (proximity switch)

Электронный переключатель, который срабатывает в случае приближения на определённое расстояние к объекту.

Нелинейные искажения

Форма искажений, появляющихся из-за нелинейных характеристик многих электронных компонентов. Согласно анализу Фурье любой негармонический периодический сигнал можно разложить на несколько гармонических составляющих.

Непропаянное соединение («холодная пайка»)

Спонтанно возникший (вследствие нагревания, вибраций и т.п.) дефект паяного соединения, характеризующийся высоким контактным сопротивлением. Подобный дефект, который бывает довольно трудно обнаружить, может стать причиной неисправностей в работе электронного устройства.

Носитель данных

Устройство, предназначенное для постоянного хранения данных. К таким устройствам можно отнести дискеты, сменные диски, компакт-диски, винчестеры, носители на магнитной ленте и т.п.

Обжим кабеля

Завершающий этап изготовления кабеля, когда куски кабеля обрезаются до нужной длины и комплектуются требуемыми разъёмами (соединителями).

Обнаруживающая способность

Характеристика детектора (порог чувствительности), относящаяся к его способности распознавать малые сигналы, т.е. минимальная амплитуда сигнала, который ещё может быть распознан детектором.

Обновление (регенерация)

Механизм периодического восстановления (обновления) данных в ячейках памяти DRAM (см. также *Время хранения*).

Обратная волна

Отражённая волна в лампе бегущей волны, которая распространяется в направлении, противоположном направлению движения электронов.

Обратная связь

Необходимое условие реализации замкнутых контуров управления. Благодаря тому, что значение сигнала на выходе системы управления сравнивается с предварительно заданным значением, любые ошибки, возникающие по пути прохождения сигнала, могут быть скорректированы.

Обратное аннотирование

Корректировка заказных схем в соответствии с требованиями заказчика.

Объявление

В программировании — задание типов данных для переменных.

Ограничение допустимых значений

Метод, позволяющий обеспечить надёжность работы полупроводниковых компонентов в экстремальных режимах; заключается, например, в ограничении потребляемой мощности при достижении определённой рабочей температуры.

Ограничение по максимуму

Снижение величины нежелательных максимальных (пиковых) значений напряжения или тока, которое достигается, как правило, путём использования специальных схем коррекции (см. также *Ограничитель*).

Ограничитель

Схема, предохраняющая от чрезмерного повышения амплитуды сигнала. Иногда такая схема выполняется как простой ограничитель, но обычно с её помощью осуществляется не столь «грубое», а плавное понижение амплитуды сигнала (см. также *Ограничение по максимуму*).

Операционная система

Базовая программа, загружаемая в компьютер и обеспечивающая выполнение всех необходимых базовых операций (ввода/вывода, сохранения данных, администрирования и т.д.).

Операционный усилитель

Инструментальный усилитель. Усилитель с очень хорошими линейными характеристиками, широкой полосой пропускания, низким уровнем шумов и малым дрейфом. Первоначально был разработан для вычислительных операций в аналоговых компьютерах, откуда и получил своё название — операционный усилитель.

Основная память

Рабочая память компьютера; ОЗУ.

Отказ

Временное или постоянное нарушение функционирования системы. В том числе, понятие «отказ» относится и к ситуации, когда в целом исправное устройство или компонент переводятся в режим работы, в котором они уже не способны удовлетворять заданным требованиям. Отказ может возникать как в результате внутрисистемных аппаратных или программных сбоев, так и по внешним причинам, например из-за аварии источника питания (см. также *Надёжность*).

Откат

Переход в аварийный режим работы в том случае, когда система не может функционировать в нормальном режиме. Примерами таких операций являются переход на ручное управление системой, если автоматика дала сбой, или понижение скорости передачи данных при возникновении ошибок в линии связи.

Отладчик (отладочная программа)

Средство тестирования и отладки программ, использующееся, в том числе, в микроконтроллерных технологиях. Как правило, отладчик — это специальная программа, которая обнаруживает ошибки в другой, целевой программе (см. также *Bug*).

Пайка в струе горячего пара

См. *Конденсационная пайка*.

Пайка оплавлением припоя (reflow)

Метод пайки, применяемый в технологии поверхностного монтажа. Он заключается в оплавлении припоя, содержащегося в предварительно нанесённой на контактные площадки печатной платы паяльной пасте, таким образом, что размещённые на печатной плате электронные компоненты припаяются к контактным площадкам.

Пакетная передача

Дискретная передача сигналов отдельными порциями (пакетами).

Память

Устройство, способное сохранять информацию, своего рода «хранилище данных» в компьютере. Память, выполненная по полупроводниковым технологиям, оперирует с данными, представленными в двоичном коде. Практически все типы памяти позволяют считывать содержимое памяти без его повреждения. Однако некоторые из этих устройств (относящиеся к так называемой энергозависимой памяти) при отключении питания теряют записанную в них информацию. В некоторые устройства памяти (*ПЗУ*) данные могут быть загружены лишь однократно, в то время как в другие — много раз, а некоторые (*ОЗУ*) даже обеспечивают произвольный доступ к данным.

Партия (изделий)

Количество полупроводниковых электронных компонентов, одновременно изготавливаемых в ходе одного процесса производства. Любые изменения этого процесса сказываются на характеристиках всех компонентов, входящих в партию.

Пассивация

Наложение устойчивого к внешним воздействиям защитного слоя на готовый полупроводниковый кристалл. Защищает от механических повреждений и загрязнения. Пассивирующий слой — это последний этап покрытия компонентов в полупроводниковом производстве (см. также *Покрывание*).

Пассивный компонент

В отличие от активного компонента, пассивный компонент только сохраняет, потребляет или передаёт полезную электрическую мощность. Примеры таких компонентов — резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности.

Пека модель

Модель ускоренных испытаний полупроводниковых компонентов на надёжность, в которой с целью увеличения интенсивности отказов компоненты подвергаются воздействию повышенных температуры и влажности (см. также *Аррениуса модель*, *Эйринга модель*).

Передача данных

Перемещение данных между двумя блоками, осуществляющими их обработку (например, между компьютерами).

Перекры́стные помехи

Помехи, возникающие в близко расположенных проводниках или сигнальных линиях вследствие взаимных электрических наводок между ними.

Переменный ток

Электрический ток, который периодически изменяет своё направление (см. также *Постоянный ток*).

Перенапряжение (surge)

Кратковременное (импульсное) превышение номинального значения напряжения или тока в электронной схеме, которое может отрицательно сказаться на функционировании схемы или даже, в исключительных случаях, привести к её повреждению (см. также *Выбросы*).

Переносимость (мобильность)

Возможность загружать файлы в другие программы.

Переход через нуль

Точка на временной диаграмме периодического сигнала, соответствующая нулевой амплитуде сигнала. Рекомендуются производить коммутацию переменного напряжения или тока именно в момент перехода через нуль, что позволит избежать появления в линии соответственно выбросов напряжения или индукционных токов.

Переход

В полупроводниках — граничный слой между материалами с *p*- и *n*-проводимостями.

ПЗУ

См. *ROM*.

Плавающая точка

Способ записи числа, когда положение десятичной точки, отделяющей целую часть числа от дробной части, может изменяться.

Плотность упаковки (размещения) компонентов

1. Количество ячеек памяти, отнесённое на единицу длины или площади полупроводникового кристалла — носителя информации. Измеряется в бит/см или бит/см².

2. Количество интегральных компонентов, приходящихся на определённую площадь, например, печатной платы.

Поверхностный монтаж

Метод монтажа электронных компонентов на печатной плате, когда они и проводящие дорожки размещаются на одной стороне платы. Выводы компонентов, специально разработанных для поверхностного монтажа, не впаиваются в предварительно просверленные отверстия на печатной плате (как это делалось в соответствии с использовавшимися ранее технологиями монтажа), а припаиваются непосредственно к контактными площадкам, расположенным на поверхности печатной платы. Это позволяет сделать печатную плату компактнее и устойчивее к механическим вибрациям (см. также *SMD*).

Подвижность носителей заряда

Термин, относящийся к технологиям производства полупроводниковых компонентов и означающий возможность свободных носителей заряда передвигаться внутри кристалла, чем определяется проводимость полупроводникового материала.

Покрытие

Наложение защитного слоя на кристалл полупроводникового компонента или его корпус. Для оптоэлектронных компонентов часто накладывается также дополнительный слой для уменьшения отражений.

Полоса пропускания

В аналоговых системах передачи сигналов — интервал между верхней и нижней граничными частотами, значение которого измеряется в Гц и зависит от того, каким способом задаётся граничная частота (чаще всего она соответствует уровню -3 дБ, т.е. половинному уровню сигнала). В цифровых системах под полосой пропускания (точнее, пропускной способностью) понимается максимально возможный объём передаваемых данных в единицу времени, который измеряется в бит/с.

Полосовой (полосно-пропускающий) фильтр

Фильтр, который практически без затухания пропускает излучение или сигнал исключительно в пределах заданного частотного диапазона (полосы частот).

Полубайт

Слово данных разрядностью 4 бита. Соответственно, обеспечивается 16 возможных двоичных комбинаций. Иногда используется также название *Тетрада*.

Полузаказная ИС

Интегральная схема, которая разработана с использованием готовых базовых матричных кристаллов (вентильных матриц) или стандартных ячеек, и может быть разработана пользователем самостоятельно при поддержке компании-производителя полупроводниковых компонентов.

Пороговое значение

Минимальное значение того или иного параметра, соответствующее некоторому определённому состоянию (например, проводимости или излучению) электронного компонента. Существование пороговых уровней напрямую связано с нелинейностью характеристик электронных компонентов.

Порт

Линия или совокупность линий ввода/вывода сигналов.

Портирование

Передача информации с одновременным её переформатированием/трансляцией с целью адаптации к различным условиям; например перенос машинного кода на другую компьютерную архитектуру.

Постоянное напряжение

Электрическое напряжение с неизменяющейся полярностью и постоянной или почти неизменяющейся амплитудой.

Постоянный ток

Электрический ток, полярность которого не меняется с течением времени (см. также *Переменный ток*).

Пошаговая обработка (wafer stepping)

Последовательность технологических шагов (этапов), в ходе которой на основе полупроводниковой пластины формируются или модифицируются полупроводниковые структуры микросхем.

Преобразование адреса

Процесс преобразования одного адреса в другой, например виртуального адреса в физический или относительного адреса в абсолютный.

Прерывание

Приостановка работы текущей программы микроконтроллера, вызванная появлением соответствующего сигнала прерывания, и запуск специальной подпрограммы, которая осуществляет действия по определённому сценарию. После завершения подпрограммы-обработчика прерывания исполнение текущей программы возобновляется.

Проводящие дорожки

Элементы разводки электрических соединений на печатной плате, выполненные путём использования металлической плёнки.

Проволочное соединение

Как правило, это тонкая золотая проволока, соединяющая полупроводниковый кристалл ИС с выводами корпуса.

Программа начальной загрузки

Процедура операционной системы, под управлением которой инициализационные данные загружаются из носителя данных в рабочую область памяти.

Программное обеспечение

Нематериальная, в отличие от аппаратных средств, часть компьютера. Представляет собой совокупность данных и программ, используемых в компьютере.

Проектирование на стандартных ячейках

Технология разработки заказных полупроводниковых микросхем с использованием готовых моделей (стандартных ячеек).

Протокол

Набор правил и соглашений, относящихся к выполнению определённых задач. В системах дистанционной передачи данных протокол включает в себя все правила управления и действий для реализации требуемых процедур.

Прототип

Опытный образец, макет. Первая, предварительная версия реализации продукции.

Процент брака

Процент дефектных изделий в партии продукции.

Процессор

Интегральная схема, предназначенная для исполнения компьютерных программ (см. также *Микропроцессор, MPU, CPU*).

Размах (peak-to-peak)

Характеристика переменного сигнала, отображающая его амплитуду «от пика до пика», т.е. от максимального отрицательного до максимального положительного значения сигнала.

Разрядность (ширина) шины

Количество линий передачи данных в шине параллельного типа.

Ранний отказ

Выход компонента из строя в период приработки или в начальный период эксплуатации.

Реальное время

Термин, изначально относившийся к проектированию систем с разомкнутым или замкнутым контуром обратной связи. В отличие от систем пакетной обработки данных, для которых время не является критическим параметром, системы реального времени должны обладать высоким быстродействием и малым временем отклика на внешние сигналы, чтобы обеспечить корректность обработки данных.

Регенерация (памяти)

См. *Обновление*.

Регистр сдвига

Модуль памяти данных (регистр), содержимое которого может сдвигаться на определённое количество разрядов (битов). Данная операция используется при умножении двоичных чисел (см. также *Циклическое сдвиговое устройство*).

Режим ожидания

Режим работы системы, в котором она не активна, но может быть активизирована незамедлительно (по первому требованию).

Резервирование

Режим работы электронной системы, когда параллельно с основным устройством всегда работает запасное («горячий резерв»), что обеспечивает возможность быстрого переключения системы на резервное устройство в случае отказа основного.

Сброс (reset)

Процедура, в результате которой электронное устройство переводится в исходное состояние или в режим ожидания.

Свет

Электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом, с длиной волны в диапазоне от 380 до 700 нм.

СВЧ

Диапазон частот около 1 ГГц.

Секционированный процессор

Микропроцессорный чип, разрабатываемый для осуществления специальных задач в соответствии с требованиями пользователя. Функционирует подобно обычным процессорам, но обладает меньшей разрядностью (обычно 2 или 4 бит). Если требуется обрабатывать данные с большей разрядностью, то несколько секционированных процессоров могут быть объединены в единый процессорный модуль.

Семафор

В системах обработки данных и управления технологическими процессами данный термин означает контрольный сигнал (флаг), который устанавливается при выполнении определённых условий. Управляющая программа в некоторые моменты времени производит опрос семафоров и тем самым получает информацию о состоянии системы. Примером семафоров (применительно к такой системе, как управление дорожным движением) являются уличные светофоры.

Сенсор (датчик)

Электронный компонент, используемый при реализации *Сенсорной технологии*.

Сенсорная технология

Технология преобразования тех или иных физических величин (например, давления или температуры) в электрический сигнал (в напряжение, частоту или длительность импульсов), который затем может быть проанализирован.

Сенсорный переключатель

Контактный переключатель. Имеет проводящую поверхность, лёгкое прикосновение к которой вызывает его срабатывание.

Сертификация

Подтверждение соответствия определённым стандартам качества (см. также *Аттестация*).

Сеть

Взаимосвязанная структура, предназначенная для коммуникационных или транспортных целей. Существуют различные топо-

логии сетей: звезда, кольцо, сотовая структура. Обмен данными, изменение направления потока данных или другие изменения в потоках данных осуществляются в так называемых узловых точках (узлах) сети.

Сжатие данных (компрессия)

Сокращение объёма данных без потери ценной информации, основанное на методе удаления избыточных данных. Такая процедура позволяет обеспечить более эффективное хранение (упаковку) или передачу данных.

Силиконовая долина

Долина Санта-Клара — район в Калифорнии к югу от бухты Сан-Франциско, между городами Пало-Альто и Сан-Хосе. Здесь сосредоточены предприятия, занимающиеся исследованием, разработкой и производством электроники и компьютерной техники, и расположены штаб-квартиры целого ряда ведущих компаний-производителей полупроводниковых компонентов. Многие из этих компаний были основаны именно в Силиконовой долине.

Система (комплект) разработки

Набор компонентов аппаратного и программного обеспечения, необходимых при разработке тех или иных прикладных программ.

Системное прерывание

Аппаратное или программное прерывание, возникающее в том случае, если в процессе работы микроконтроллера было выполнено некое заранее заданное условие (т.е. сработала «ловушка»).

Скорость нарастания (сигнала)

Характеризует величину отклика электронной схемы на импульсное воздействие.

Скремблирование

1. Шифрование адреса — процедура, используемая в запоминающих устройствах. Входной виртуальный адрес пересчитывается таким образом, чтобы осуществить обращение к заданной физической ячейке памяти. Это необходимо по той причине, что ячейки в микросхеме памяти обычно не образуют «идеальную» матрицу.

2. Помимо шифрования адреса, существует также скремблирование (шифрование) данных. В зависимости от того, происходит ли адресация числовой шины (строк) или разрядной шины (столбцов), текущий сигнал

сохраняется в инвертированном или в неизменном виде. При реализации этого метода требуется иметь информацию о реальном физическом расположении ячеек памяти.

Скрытая регенерация

Режим работы микросхем DRAM, позволяющий исключить задержки при обращении к ОЗУ, вызванные необходимостью периодического обновления (регенерации) данных и снижающие производительность системы. Так же, как и в режиме «CAS before RAS», адресный счётчик указывает и адрес ячейки, подлежащей регенерации. Отличие, однако, состоит в том, что, например, в цикле чтения выход микросхемы остаётся активным даже после того, как был запущен цикл регенерации.

См

Сименс — единица электрической проводимости.

Совместимость «вверх»

Совместимость с продукцией более позднего поколения. Совместимость достигается проще, когда продукция соответствует общепринятым стандартам и соглашениям (см. также *Совместимость «вниз»*).

Совместимость «вниз»

Совместимость с продукцией предыдущего поколения (см. также *Совместимость «вверх»*).

Совместимый

Соответствующий заданным параметрам; подходящий для совместной работы; сопоставимый по параметрам, согласованный.

Спад мощности

Снижение или резкое уменьшение мощности.

Спадающий фронт

Окончание (область спада) электрического импульса (см. также *Нарастающий фронт*).

Сплавное соединение

Соединение оптических волноводов, реализованное таким образом, чтобы два волновода оказались очень плотно прижаты друг к другу (сплавлены), так что свет может проникать из одного волновода в другой (см. также *Гибкий соединитель*).

Стандарт де-факто

Технический стандарт, ставший таковым «естественным» образом. Это означает, что

его эффективность доказана на практике, либо его продвижение лоббируют достаточно влиятельные силы. Однако подобным стандартам часто не хватает признания со стороны официальных организаций в области стандартизации, таких как ANSI или ISO (см. также *Стандарт де-юре*).

Стандарт де-юре

Стандарт, официально принятый в результате осуществления формальной процедуры одним из общепризнанных институтов в области стандартизации (см. также *Стандарт де-факто*).

Стек

Устройство (регистр или область памяти) хранения данных «магазинного типа». В стеке сохраняются адреса возврата из подпрограмм или процедур обработки прерываний. Кроме того, через стек может быть организован обмен параметрами между основной программой и подпрограммами. Управление стеком осуществляется с помощью регистра-указателя стека. При каждой операции загрузки (PUSH) или извлечения (POP) данных из стека значение указателя стека соответствующим образом инкрементируется или декрементируется.

Степень (уровень) интеграции

Характеристика, задающая «плотность упаковки» элементов интегральной схемы (т.е. связанная с количеством транзисторов и функциональных элементов, входящих в её состав).

Сторожевой таймер

Следящее устройство (супервизор), входящее в состав микроконтроллера и генерирующее аварийный сигнал или соответствующие выходные сигналы, если происходит заранее определённое событие ошибки (см. также *Зависание*).

Стохастический

Нестационарный, с неопределёнными интервалами. Например, стохастическая ошибка представляет собой случайные сбои, которые трудно локализовать вследствие их непредсказуемости.

Структура данных

Организационная схема записи или массива данных (см. также *Формат данных*).

Сумматор

1. Структурный элемент ЦПУ, реализующий операцию сложения двух чисел.
2. Аппаратная схема суммирования амплитуд двух сигналов.

Сухое соединение

Соединение без пайки; непропаянное соединение.

Схема с общей базой

Схема включения биполярного транзистора, когда электрод базы является общим для входного и выходного сигналов. Схема с общей базой характеризуется низким входным импедансом.

Схема с общим коллектором

Схема включения транзистора, при которой выходной сигнал формируется за счёт протекания тока через резистор в цепи коллектора (см. также *Эмиттерный повторитель*).

ТЕМ-камера

Камера поперечной электромагнитной волны. Используется при тестировании электронных компонентов на *ЕМС*.

Темновой ток

Обратный ток в фотоэлементе при отсутствии света.

Тепловой удар

Метод испытаний электронных компонентов, заключающийся во внезапном нагревании или охлаждении компонента, вследствие которого могут проявляться его скрытые дефекты.

Теплоотвод (радиатор)

Конструктивный элемент, который рассеивает тепловую энергию, выделяемую электронным компонентом, предотвращая его перегрев. Теплоотводы обычно изготавливаются из металла и имеют охлаждающие рёбра.

Термистор

Пассивный компонент, электрическое сопротивление которого уменьшается с ростом температуры. Также называется *NTC-резистором*.

Термотренировка

Испытания на устойчивость к внешним воздействиям, в ходе которых электронные компоненты работают в течение нескольких часов или дней в условиях повышенных дав-

лений, температур и напряжений, чтобы отказы, вызванные производственными дефектами, были выявлены прежде, чем партия продукции будет направлена потребителям. Использование данных испытаний позволяет повысить надёжность электронных компонентов (см. также *Bathtub-кривая*).

Тетрада

См. *Полубайт*.

Технологическая норма

Минимальная ширина (размер) полупроводниковой структуры на кристалле, обеспечиваемая той или иной технологией. Значение этого параметра год от года уменьшается. Например, для разработанной компанией Infineon технологии производства микросхем, предусматривающей использование полупроводниковых пластин размером от 300 мм, технологическая норма составляет 110 нм (для арсенид-галлиевых ИС — 0.5 или 0.8 мкм). Стандартная технологическая норма при производстве логических микросхем ещё недавно составляла 180 нм, однако в 2004 году компания Infineon приступила к выпуску 90-нм модулей памяти.

Технология «чистой комнаты»

При изготовлении полупроводниковых компонентов чрезвычайно важно обеспечить чистоту воздуха в производственных помещениях, поскольку даже мельчайшие частички пыли оказываются достаточно велики по сравнению с полупроводниковой структурой кристалла ИС, и их наличие может стать причиной возникновения дефектов в ИС. В зависимости от требуемого уровня чистоты, технологии «чистой комнаты» подразделяются на несколько классов.

Технология канализированной вентильной матрицы

Технология производства ИС на основе вентильных матриц, когда базовые ячейки (логические вентили) соединяются между собой с помощью проводящих каналов в кристалле.

Тип данных

Категория, относящаяся к описанию данных определённого формата, например констант, переменных, строковых переменных, и т.д.

Тиристорный эффект (эффект защёлкивания)
Паразитный эффект в полупроводниковых устройствах, проявляющийся в необрати-

мом отпирании паразитных тиристоров, образованных слоями различной проводимости внутри КМОП-структур. Это приводит к внезапному возникновению сквозных токов (токов короткого замыкания) в КМОП-устройствах, что может вывести их из строя. «Отключить» защёлкивание можно лишь снятием напряжения питания.

Точка останова

Контрольная точка (строка) в последовательности команд программы, в которой выполнение программы останавливается по условию ошибки. Использование точек останова играет важную роль при отладке программ.

Транзисторная логика

Метод реализации логических функций путём использования транзисторных схем, часто в сочетании с резисторами и диодами. Логические состояния представляются в виде уровней электрических сигналов (см. также *DTL*, *RTL*).

Трансивер

Термин, образованный путём слияния двух английских слов — transmitter (передатчик) и receiver (приёмник). Данный термин означает устройство или модуль, способный как передавать, так и принимать сигналы.

Триггер Шмитта

Двухпороговый мультивибратор с гистерезисом, который переключается по достижении входным сигналом порогового уровня и возвращается в исходное состояние лишь тогда, когда напряжение входного сигнала оказывается на определённую величину ниже этого порогового уровня.

Триггер

Схема с двумя устойчивыми состояниями, один из базовых элементов цифровой техники; применяется также при организации статической памяти с произвольным доступом (*SRAM*).

Указатель стека

Регистр микропроцессора, в котором хранится текущий адрес обращения к стеку.

Ультрафиолетовый

Оптическое излучение (света) с длиной волны в диапазоне от 30 до 380 нм.

Уровневая модель

См. *OSI*.

Установки по умолчанию

Стандартные, базовые, исходные установки (значения) тех или иных параметров.

Устойчивый отказ

Отказ, вызванный неисправностью оборудования.

Файл

Некоторая совокупность элементов информации, имеющая индивидуальное имя, например: программа; таблица данных, используемых при работе программы; документ, созданный пользователем. Файлы представляют собой основные единицы хранения информации в компьютере, обеспечивая возможность обращения к конкретным «блокам» информации.

ФАПЧ (PLL)

Фазовая автоподстройка частоты. Схематехническое решение, позволяющее стабилизировать или синхронизировать частоту генератора.

Фиксирующий (ограничительный) диод

Диод (обычно, обратный), который также используется для подавления помех при переключении.

Фильтр верхних частот

Фильтр, не пропускающий сигналы с частотой ниже граничной и практически не ослабляющий сигналы, частота которых выше граничной частоты фильтра (см. также *Фильтр нижних частот*).

Фильтр нижних частот

Фильтр, полоса пропускания которого простирается от нуля до некоторой граничной частоты. Для частот, превышающих граничную, фильтр является заградительным (см. также *Фильтр верхних частот*).

Фильтр

1. Устройство, обладающее определёнными характеристиками пропускания или заграждения. Так, механические фильтры пропускают (или не пропускают) определённые вещества; электрические и оптические фильтры «настроены» на сигналы определённой частоты.

2. Дополнительная прикладная программа, которая преобразует формат внешнего файла таким образом, что он может быть прочитан и затем обработан основной прикладной программой.

Флаг

Битовая переменная, значение которой соответствует текущему состоянию отслеживаемого сигнала или результата операции (см. также *Семафор*).

Флэш-память

Память с постраничной перезаписью. Электрически перезаписываемое ПЗУ. Стирание области данных произвольного размера осуществляется путём подачи на соответствующий вход ПЗУ импульса напряжения (flash); после этого в указанную область могут быть записаны новые данные (см. также *EAROM*, *FAMOS*).

ФМ (РМ)

Фазовая модуляция.

Фон-неймановская архитектура

Наиболее часто используемая на сегодняшний день компьютерная архитектура (предложена фон Нейманом). Одна из важнейших её особенностей состоит в том, что данные и программный код могут храниться в одном универсальном модуле памяти (в отличие от *Гарвардской архитектуры*, предусматривающей раздельное хранение данных и программ).

Формат данных

Определённая система представления и записи данных, которая может варьироваться от программы к программе. Обмен данными между различными программами возможен лишь в том случае, если эти программы поддерживают соответствующие форматы данных (см. также *Структура данных*).

Фотолитография

Технология, используемая в производстве ИС. Уменьшенное до размеров кристалла изображение структуры микросхемы (фотомаска) используется для экспонирования на поверхность полупроводниковой пластины-заготовки, покрытой слоем фоторезиста. Под воздействием света, проходящего через фотомаску, поверхностная структура полупроводника соответствующим образом изменяется. Непроявленные остатки фоторезиста затем удаляются с поверхности пластины, после чего она обрабатывается методом химического травления.

Фоторезистор

Компонент, омическое сопротивление которого под воздействием света снижается.

Большинство фоторезисторов изготавливаются из сульфида кадмия (CdS).

Фототранзистор

Транзистор, коллекторный ток которого под воздействием света возрастает.

ЦАП

Цифро-аналоговый преобразователь — устройство, осуществляющее преобразование сигналов, представленных в цифровой форме, в аналоговые сигналы (как правило, ЦАП служит для восстановления исходной аналоговой формы сигнала после аналого-цифрового преобразования, см. также *Аналого-цифровой преобразователь*).

Цветовой код

Маркировка резисторов и других электронных компонентов при помощи различных цветовых комбинаций, в которых зашифрованы номиналы или названия компонентов.

Целостность данных

Корректность передачи (состояния) данных.

Цикл

1. Последовательность работы какого-либо устройства или системы.
2. Одно из важных понятий, используемых в программировании.

Циклическое сдвиговое устройство

Устройство, входящее в состав аппаратного ядра микропроцессора или микроконтроллера и предназначенное для осуществления нескольких операций сдвига данных в одном цикле исполнения команды. Наличие этого устройства существенно повышает быстродействие системы.

Цифровизация (оцифровка)

Запись аналогового сигнала в цифровом (обычно двоичном) виде. Обычно предполагает использование процедуры дискретизации — периодической выборки и записи в буфер значений (отсчётов) аналогового сигнала. В более широком понимании, цифровизацией можно назвать и процесс цифрового преобразования и сохранения символов в системах передачи информации (см. также *Выборка и хранение*, *Частота дискретизации*).

Цифровой

От лат. «digitus» — палец. Данный термин относится к представлению результатов тех или иных действий в виде счётных величин

(целых чисел). Таким образом, он не применим к промежуточным (не дискретным) величинам. В системах обработки данных практически вся информация представлена в цифровом виде. Применительно к компьютерам, это двоичное представление, поскольку едва ли не все логические схемы технически основаны на использовании именно двоичной логики (см. также *Бит*, *Байт*). Противоположным термином является термин аналоговый.

Цоколёвка

Назначение выводов ИС или другого электронного компонента.

Частота дискретизации

Частота, с которой осуществляется дискретизация (выборка) сигнала, соответствующего измеряемой физической величине (например, звуковому сигналу).

Частота обновления

Частота, с которой производится обновление (регенерация) содержимого (контента) при выводе изображения на экран дисплея. Значение этого параметра должно быть достаточно высоким (обычно для кадровой развёртки используются частоты в диапазоне 75...120 Гц), чтобы обеспечить стабильное изображение без эффекта мерцания.

Частота отказов

Количество отказов за определённый период времени. Частота отказов является одной из важнейших характеристик при оценке надёжности устройств или компонентов (см. также *Надёжность*).

Чередование адресов памяти

Процедура адресации, когда каждое новое обращение происходит не по последовательным (ближайшим) адресам, а с интервалом в один или два адреса от текущего. Обращение по следующему (ближайшему) адресу может производиться лишь в начале каждого нового цикла. Такой метод адресации обеспечивает более высокую производительность при обращении к данным; при выводе графической информации на экран дисплея уменьшается заметное для глаз мерцание экрана.

Четырёхполюсника модель

Модель для представления и описания характеристик транзистора на основе четырёхполюсника.

Чип

Полупроводниковый кристалл электронного компонента.

Чип-карта

Пластиковая карта (например, телефонная), в которую встроена полупроводниковая микросхема, предназначенная для записи и хранения информации.

Чипсет

Набор различных полупроводниковых микросхем, которые работают как единый блок и выполняют общую задачу.

Число с плавающей точкой

Используемый в процессоре способ представления двоичных чисел, когда положение десятичной точки (т.е. количество разрядов в соответствующих им десятичных числах) не фиксировано, а зависит от значения экспоненты («плавает»; см. также *Число с фиксированной точкой*).

Число с фиксированной точкой

Десятичное число с фиксированным (в отличие от *Числа с плавающей точкой*) количеством разрядов.

Шестнадцатеричная система

Система счисления на базе числа 16. Каждая цифра в этой системе может быть представлена с помощью 4 разрядов. Благодаря этому данная система очень удобна для обработки данных. Для числового представления используются цифры от 0 до 9 и латинские буквы от A до F, в конце числа добавляется буква h.

Шина

Система межсоединений, обеспечивающая доступ к системе передачи данных путём механического подключения через разъёмы (слоты), своего рода автобусные остановки, на которых потоки данных (словно пассажиры) могут входить в систему или выходить из неё. Большинство подобных систем являются параллельными, однако существуют и последовательные шины (см. *USB*).

Шум

Отклонение сигнала от «идеального» связано с наличием в цепи его прохождения нежелательных шумовых токов и напряжений. Источниками этих шумов, как правило, являются тепловые эффекты в проводниках, эффекты дисперсии и отражения сигнала, а также воздействия внешних ис-

точников помех (см. также *Дробовой шум*, *NF*, *NEP*, *RIN*).

эВ

Электрон-вольт — внесистемная единица энергии, определяемая как энергия, приобретаемая или теряемая электроном при его перемещении в электрическом поле между точками с разностью потенциалов 1 В. Численно эта величина соответствует 1.602210^{-19} Дж.

Эйринга модель

Модель ускоренных испытаний полупроводниковых компонентов на надёжность, в которой с целью увеличения интенсивности отказов компоненты подвергаются воздействию повышенной температуры и повышенной электрической нагрузки (см. также *Аррениуса модель*, *Пека модель*).

Эквивалентная схема

Упрощённая гипотетическая схема электронного компонента или устройства, входные и выходные характеристики которой в точности соответствуют характеристикам реального устройства.

Экранирование

Создание барьера, препятствующего электрическим, электромагнитным и/или магнитным полям проникать в защищаемую область пространства или выходить из неё. Экранирование от электрических и электромагнитных полей наиболее эффективно осуществляется с использованием клеток, экранов или корпусов из проводящего материала, лучше всего — металла. В случае защиты от магнитного поля, корпус следует изготавливать из материала с высокой диэлектрической проницаемостью (см. также *ЕМС*).

Электрическая связь

В электротехнике — обеспечение возможности обмена электрической энергией между двумя смежными токопроводящими линиями (в частности, обмотками катушек индуктивности) за счёт эффекта электромагнитной индукции.

Электролюминесценция

Люминесцентное излучение. Излучение света под воздействием протекающего тока, которое может происходить в некоторых материалах при определённых условиях (см. также *ELD*).

Электронная ловушка

Маленькая полупроводниковая структура, в которую «попадают» электроны из-за воздействия различных квантово-механических эффектов. На основе таких структур разработаны компоненты памяти (см. также *ЕТОМ*).

Электронная печатная плата

Пластиковая плата, на которую устанавливаются электронные компоненты схемы и наносятся соединительные проводящие дорожки (см. также *PCB*, *Печатная плата*).

Электросмог

«Проникновение» в окружающую среду электрических и магнитных полей, связанных с протеканием тока в проводниках. Влияние электросмога на здоровье человека до сих пор обсуждается.

Эмиссия

Испускание электромагнитного излучения или носителей электрического заряда в окружающую среду.

Эмиттерный повторитель

Схема включения транзистора, при которой выходной сигнал формируется за счёт протекания тока через резистор в цепи эмиттера (см. также *Схема с общим коллектором*).

Эмулятор

Аппаратно-программное устройство, реализующее функции эмуляции той или иной системы.

Эмуляция

Воспроизведение (моделирование аппаратными или программными средствами) работы той или иной системы. Данный метод часто используется при тестировании компьютерных технологий. В отличие от симуляции, которая производится «в отрыве» от моделируемой системы, эмуляция обычно осуществляется непосредственно в рамках самой этой системы.

Энергозависимая память

Память, содержимое которой теряется при выключении питания (см. также *Память*).

Энергонезависимая

Характеристика памяти, означающая, что хранящаяся в ней информация не будет потеряна, даже если отключить напряжение питания (см. также *ROM*, *ПЗУ*).

Эталонная модель

См. *OSI*.

Язык программирования

Система символов и правил, аналогичная языку в лингвистике, предназначенная для создания последовательностей компьютерных команд. Существуют так называемые языки программирования высокого уровня, которые по уровню доступности для вос-

приятия приближаются к «реальному» человеческому языку (как правило, английскому), а также машинно-ориентированные языки, которые гораздо труднее для восприятия (см. также *Ассемблер*, *Машинный код*).

Язык разметки

Например, язык разметки гипертекста *HTML* (см. также *SGML*).