



# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	11
<b>1. Полупроводники, основные сведения и исторический обзор .....</b>	<b>12</b>
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
<b>2. Диоды и транзисторы .....</b>	<b>40</b>
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 (ММІС) упрощают разработку .....	53
2.6.1. Три схемы устройств .....	56
2.6.2. Мобильные телефоны — не единственная область применения ММІС .....	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
<b>3. Силовые полупроводниковые приборы .....</b>	<b>60</b>
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
<b>4.</b>	<b>Оптоэлектронные приборы . . . . .</b>	<b>177</b>
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 волоконам в транспортных средствах . . . . .	200
4.5.	IgDA — передача данных с использованием инфракрасного излучения . . . . .	204
4.5.1.	IgDA — один стандарт для всех приборов. . . . .	204
4.5.2.	Полный IgDA-стандарт . . . . .	205
<b>5.</b>	<b>Датчики</b> . . . . .	<b>207</b>
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
<b>6.</b>	<b>Память</b> . . . . .	<b>226</b>
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

<b>7. Микроконтроллеры</b> .....	256
7.1. Введение .....	256
7.2. Восемьбитные 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. Шестнадцатитбитные 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
<b>8. Смарт-карты</b> .....	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
<b>9. Полупроводниковые устройства для автомобилей .....</b>	<b>341</b>
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
<b>10. Развлекательная бытовая электроника . . . . .</b>	<b>402</b>
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
<b>11. Коммуникационные модули . . . . .</b>	<b>413</b>
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 РСМ-коммутаторов . . . . .	435
11.6.5. Использование ИС семейства SWITI 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
<b>12. Заказные интегральные схемы . . . . .</b>	<b>459</b>
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
<b>13. Электромагнитная совместимость . . . . .</b>	<b>466</b>
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 EMC 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
<b>14. Корпуса ИС . . . . .</b>	<b>513</b>
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
<b>15. Контроль качества полупроводниковых компонентов . . . . .</b>	<b>527</b>
15.1. Критерии, определяющие качество продукции . . . . .	527
15.2. Меры по обеспечению качества бизнес-процессов . . . . .	528
15.3. Технологичность с точки зрения пользователя . . . . .	529
<b>16. Глоссарий . . . . .</b>	<b>535</b>
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 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*

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 ( $\text{SiO}_2$ ), 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 свыше +75°C. Кроме того, обратный ток вызывает появление помех даже при комнатной температуре. В отличие от германия, кристал-

лы кремния выдерживают температуру до +150°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 парофазного осаждения (ХПО), из газовой среды осаждаются бруски 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

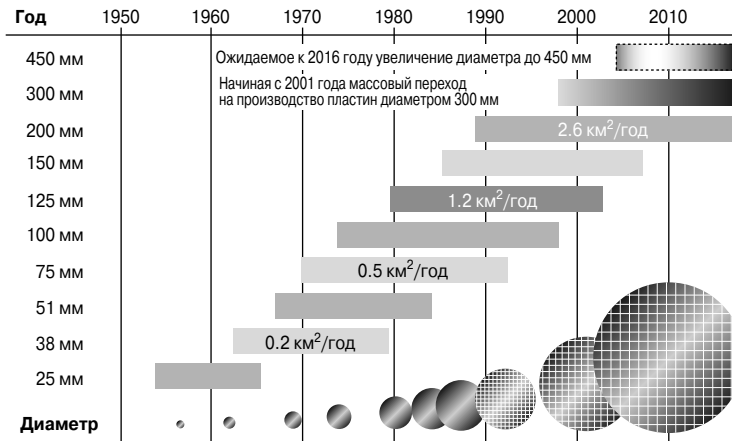


Рис. 1.1. Развитие производства полупроводниковых пластин.

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. Heil) 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
<b>Подложка</b>	Изготовление подложки
<b>Карманы</b>	Основное легирование для <i>n</i> - и <i>p</i> -канальных транзисторов в случае КМОП-технологии
<b>Изоляция</b>	Создание диэлектрической изоляции соседних приборов, в основном при помощи диоксида кремния SiO <sub>2</sub>
<b>Прибор</b>	Задание характеристик прибора путём изменения степени легирования канала, толщины подзатворного диэлектрика и подбора материала затвора
<b>Межсоединения</b>	Создание легирующего профиля для соединения области канала с уровнями соединительной разводки. Создание низкоомных соединений с уровнями разводки
<b>Локальные соединения</b>	Создание коротких высокоомных соединений внутри схемы (более высокие сопротивления не оказывают вредных воздействий на схему)
<b>Металлизация</b>	Основная разводка в зависимости от сложности схемы может насчитывать до 10 слоёв
<b>Глобальные монтажные соединения</b>	Создание низкоомной разводки с гибкими требованиями в отношении размера структуры для длинных соединений и организации электропитания блоков
<b>Пассивирование</b>	Изолирование (герметизация) схемы от внешних воздействий и, следовательно, обеспечение длительного срока службы
<b>Корпусирование на уровне 0</b>	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 (LOCOS — 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 маломощные 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 Гривом (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 Фаггин (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, Opretron 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 определенными 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 миниатюризованная 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:

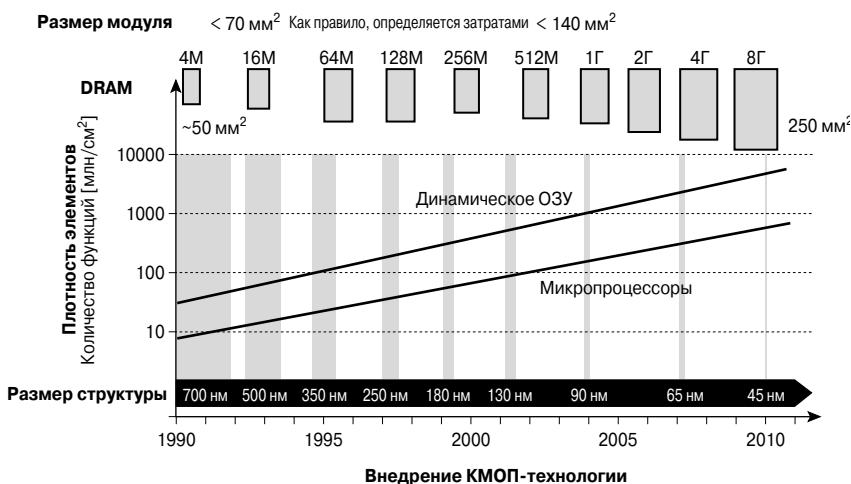


Рис. 1.2. Увеличение плотности размещения компонентов позволило изготавливать кристаллы с миллиардами кристаллов.