

УДК 621.382
ББК 32.853
Х21

Коллектив авторов

П49 Полупроводниковая электроника. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 592 с.: илл. — (Серия «Схемотехника»).

ISBN 978-5-97060-312-3

Книга написана сотрудниками компании Infineon Technologies, одного из мировых лидеров в области полупроводниковой электроники. Сборник содержит проверенные временем фундаментальные знания по полупроводникам от А (АЦП) до Z (эффект Зенера), в том числе главы по диодам и транзисторам, силовым приборам, элементам оптоэлектроники, датчикам, микросхемам памяти и микроконтроллерам. Также приведены сведения по смарт-картам, полупроводниковым устройствам для автомобилей, коммуникационным модулям. Отдельная глава посвящена электромагнитной совместимости компонентов. Реальная новизна книги состоит в том, что авторы сумели изложить в ней все современные тенденции, веяния и достижения в области полупроводниковых технологий.

Издание будет полезно инженерам-электронщикам и электротехникам, а также преподавателям и студентам, которым всегда нужно иметь под рукой сборник справочных материалов по современной микроэлектронике.

УДК 621.382
ББК 32.853

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

ISBN 978-3-89578-071-4 (англ.)

© Infineon Technologies AG.

© Перевод, Издательский дом «Додэка-XXI»

ISBN 978-5-97060-312-3 (рус.)

© Издание, ДМК Пресс, 2015

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 монолитные 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 полосткового 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
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. Шестнадцатибитные 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 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
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 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
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