

## Предисловие к 12-му изданию

Электроника средств связи занимает все более важное место в современном мире; в первую очередь это относится к беспроводным приемопередающим системам. Раньше приемники и передатчики для таких систем представляли собой аналоговые устройства и ориентировались на соответствующие способы модуляции сигнала. В отличие от прежних современные приемники и передатчики содержат высокочастотный аналоговый блок (Frontend), схема которого почти не зависит от способа модуляции, и цифровой блок, в состав которого входит процессор цифрового сигнала с соответствующим программным обеспечением. В этом блоке осуществляется модуляция или демодуляция методами цифровой обработки сигналов.

Высокочастотную часть составляют усилители, смесители и фильтры. Свойства этих компонентов на высокой частоте описываются особым образом: вместо полных сопротивлений используются коэффициенты отражения, а четырехполюсники характеризуются S-параметром. Сопротивления отдельных компонентов должны быть согласованы с волновым сопротивлением линий связи во избежание отражений на высоких частотах. Этим вопросам уделяется должное внимание в новом разделе, посвященном схемам, применяемым в технике связи. Рассмотрение части основной полосы частот предваряется введением в аналоговые способы модуляции, используемые в традиционных системах (например, в радиовещании с частотной модуляцией), и в цифровые способы модуляции, применяемые в современных системах (в частности, в мобильной связи).

Глава об усилителях дополнена разделом, посвященным шумам отдельных каскадов усиления и многокаскадных усилителей. Обновлено описание методики расчета параметров многокаскадных усилителей при наличии отрицательной обратной связи.

Наряду с популярным программным продуктом PSpice для анализа аналоговых схем приводится программа DesignExpert, помогающая проектировать цифровые схемы, а также дается перевод краткого руководства к ней.

Обновления и дополнения доступны на сайте авторов [www.Springer.de/engine-de/tietze-schenk/](http://www.Springer.de/engine-de/tietze-schenk/). Ваши пожелания и замечания об ошибках просим высылать по адресу электронной почты [tietze-schenk@springer.de](mailto:tietze-schenk@springer.de).

Мы выражаем признательность издательству SpringerVerlag, отдельное спасибо д-ру Меркле (Merkle) за приятное сотрудничество и г-ну Соссна (Sossna), РТП-Berlin, за тщательный набор. Особой благодарности заслуживает г-н Эберхард Гамм (Eberhard Gamm) за его вклад в новую главу, посвященную технике связи. Мы также благодарим читателей за сведения об ошибках и советы по улучшению книги: они тщательно проверяются и учитываются.

*У. Титце, К. Шенк,  
Эрланген и Мюнхен, январь 2002 г.*

## Из предисловия к 11-му изданию

Элементы высокой степени интеграции все шире применяются в электронных устройствах. В аналоговой технике интегральные усилители почти всюду вытеснили своих предшественников, собранных из дискретных транзисторов. Подобная тенденция наблюдается также в высокочастотной и силовой полупроводниковой технике. В цифровой технике все чаще используются программируемые логические устройства (ПЛУ), заменяя логические схемы на базе вентилях и триггеров. Элементы высокой степени интеграции позволяют сэкономить место, снизить расходы на комплектующие и оснастку и повысить надежность устройств.

В связи с этим происходит разделение конструкторских разработок на две области: создание устройств с использованием стандартных ИС (конструирование на уровне монтажной платы) и разработка собственно микросхем (конструирование на уровне транзисторов). Для правильного применения стандартных микросхем важно знать их внутреннее устройство, однако подробности на уровне транзисторов явно излишни. Напротив, конструктор интегральной схемы работает только на уровне транзисторов. Поэтому в настоящее время развитие схемотехники на транзисторном уровне равнозначно проектированию ИС. Однако есть важные различия между схемотехникой с применением микросхем и дискретных транзисторов. Самыми характерными особенностями являются масштабируемость транзисторов, использование схемы токового зеркала для установки рабочей точки активных нагрузок вместо резисторов и непосредственная связь между отдельными каскадами. Названным вопросам посвящены новые главы об основах схемотехники.

Моделирование электронных схем приобретает все большее значение с развитием схемотехники. Оно жизненно важно при конструировании ИС и разработке конкретных устройств. В наши дни схему реализуют лишь тогда, когда правильность ее функционирования проверена путем компьютерного моделирования, причем центральная роль принадлежит здесь самой модели. При конструировании конкретных устройств создаются макромодели стандартных микросхем, поставляемых изготовителями в законченном виде. Макромодели должны достаточно хорошо воспроизводить поведение ИС, не касаясь их внутренней структуры.

При конструировании интегральных схем пользуются стандартными моделями диодов, биполярных и полевых транзисторов; особенности процессов изготовления учитываются параметрами модели, которые заменяют характеристики из спецификаций одиночных транзисторов. Модели диодов и транзисторов вместе с их параметрами описываются в главах, посвященных основам схемотехники, однако мы ограничимся феноменологическим описанием, не углубляясь в фундаментальные вопросы физики полупроводников.

Главы, содержащие сведения о диодах, биполярных и полевых транзисторах состоят каждая из четырех частей. В первой части вопросы излагаются столь же просто, как и в предыдущих изданиях. Вторая часть посвящена внутреннему устройству диодов и

транзисторов. Модели и их параметры обсуждаются в третьей части. Четвертая часть посвящена принципиальным схемам.

В главе об усилителях представлены важнейшие принципиальные схемы интегральной схемотехники, в том числе токовое зеркало, каскодные схемы, дифференциальные усилители, преобразователи внутреннего сопротивления и эталонные источники тока для установки рабочей точки. Главу завершает раздел об общих свойствах и параметрах усилителей.

В главе, посвященной операционным усилителям, показано, что существует не один, а четыре типа ОУ, и говорится об их наиболее эффективных применениях. При расчете схем операционные усилители описываются простой моделью.

# Содержание

<b>1. Диоды</b>	<b>17</b>
1.1 Свойства диодов	18
1.1.1 Характеристики	18
1.1.2 Описание диода с помощью уравнений	19
1.1.3 Режим переключения	22
Режим переключения при омической нагрузке	22
Режим переключения при омическо-индуктивной нагрузке	24
1.1.4 Режим малых сигналов	25
1.1.5 Предельные параметры и токи запирания	25
Предельные напряжения	25
Предельные токи	26
Ток запирания	26
Максимальная мощность рассеяния	26
1.1.6 Тепловые свойства	27
1.1.7 Температурная зависимость параметров диодов	27
1.2 Устройство диода	28
1.2.1 Дискретные диоды	28
Внутренняя структура	29
Корпус	29
1.2.2 Интегральные диоды	30
Внутренняя структура	30
Диод-подложка	30
Интегральный диод с р-п переходом и диод Шоттки	30
1.3 Модель диода	31
1.3.1 Статический режим	31
Диапазон средних значений прямых токов	31
Дополнительные эффекты	32
Эффект сильного тока	32
Ток утечки	32
Пробой	33
Прямое сопротивление	34
1.3.2 Динамическая характеристика	34
Барьерная емкость	35
Диффузионная емкость	36
Полная модель диода	36
1.3.3 Модель диода в режиме малых сигналов	38
Статическая модель режима малых сигналов	38
Динамическая модель диода в режиме малых сигналов	40
1.4 Специальные диоды и их применение	40
1.4.1 Стабилитроны	41
1.4.2 $\text{pin}$ -диод	44
1.4.3 Варикапы	45
1.4.4 Мостовые выпрямители	48
1.4.5 Смесители	49
Литература	51

<b>2. Биполярные транзисторы</b>	<b>52</b>
2.1 Свойства биполярных транзисторов	53
2.1.1 Характеристики транзисторов	53
2.1.2 Описание транзистора с помощью уравнений	55
2.1.3 Зависимость усиления по току	56
2.1.4 Рабочая точка и характеристики транзистора в режиме малых сигналов	58
Уравнения и параметры режима малых сигналов	60
Эквивалентная схема режима малых сигналов	62
Матрицы, описывающие четырехполюсники	63
Границы применимости концепции режима малых сигналов	64
2.1.5 Предельные параметры и обратные токи	64
Пробивные напряжения	65
Пробой второго рода	66
Предельные токи	66
Токи отсечки	66
Максимальная рассеиваемая мощность	67
Допустимый рабочий диапазон	67
2.1.6 Тепловые свойства транзисторов	69
Тепловые характеристики в статическом режиме	71
Тепловые характеристики в импульсном режиме	71
2.1.7 Температурная зависимость параметров транзистора	73
2.2 Устройство биполярного транзистора	74
2.2.1 Дискретные транзисторы	74
2.2.2 Интегральные транзисторы	76
2.3 Модели биполярных транзисторов	78
2.3.1 Статические свойства	78
Модель Эберса–Молла	78
Транспортная модель	81
Дополнительные эффекты	82
Усиление по току в нормальном режиме	85
Диоды-подложки	87
Объемные сопротивления	87
2.3.2 Динамические характеристики	89
Барьерные емкости	89
Диффузионные емкости	91
Модель Гуммеля–Пуна	93
2.3.3 Модель транзистора для режима малых сигналов	96
Статическая модель транзистора для режима малых сигналов	96
Динамическая модель транзистора для режима малых сигналов	98
Граничные частоты в режиме малых сигналов	100
Сводка параметров для режима малых сигналов	104
2.3.4 Шумы	105
Спектральная плотность шумов	105
Источники шумов биполярного транзистора	107
Эквивалентные источники шумов	108
Эквивалентный источник шума и коэффициент шума	109
Коэффициент шума биполярного транзистора	111
Определение объемного сопротивления базы	118
2.4 Типовые схемы	118
2.4.1 Схема с общим эмиттером	119

	Передаточная характеристика схемы с общим эмиттером .....	120
	Характеристики режима малых сигналов схемы с общим эмиттером ..	122
	Отрицательная обратная связь по току в схеме с общим эмиттером .....	125
	Схема с общим эмиттером и ООС по напряжению .....	131
	Частотная характеристика и верхняя граничная частота .....	147
	Заключение .....	154
2.4.2	Схема усилителя с общим коллектором .....	156
	Передаточная характеристика схемы с общим коллектором .....	156
	Характеристики схемы с общим коллектором в режиме малых сигналов .....	159
	Установка рабочей точки .....	163
	Частотная характеристика и верхняя граничная частота .....	165
	Преобразование импеданса посредством схемы с общим коллектором .....	172
2.4.3	Схема с общей базой .....	173
	Передаточная характеристика схемы с общей базой .....	174
	Режим малых сигналов схемы с общей базой .....	177
	Установка рабочей точки .....	180
	Частотная характеристика и верхняя граничная частота .....	182
2.4.4	Схема Дарлингтона .....	186
	Характеристики транзистора Дарлингтона .....	187
	Описание с помощью уравнений .....	189
	Зависимость усиления по току от тока коллектора .....	189
	Параметры режима малых сигналов .....	191
	Режим коммутации .....	193
	Литература .....	194

### **3. Полевые транзисторы 196**

3.1	Свойства полевых транзисторов .....	199
3.1.1	Характеристики .....	199
3.1.2	Описание транзистора с помощью уравнений .....	202
3.1.3	Полевой транзистор в качестве управляемого резистора .....	207
3.1.4	Рабочая точка и режим малых сигналов .....	209
	Рабочая точка .....	209
	Уравнения и параметры режима малых сигналов .....	210
	Эквивалентная схема полевого транзистора для режима малых сигналов .....	212
	Матрицы, описывающие четырехполюсники .....	212
	Границы применимости концепции малых сигналов .....	213
3.1.5	Граничные параметры и обратные токи .....	213
	Напряжения пробоя .....	214
	Граничные токи .....	215
	Обратные токи .....	216
	Максимальная мощность рассеяния .....	216
	Область устойчивой работы .....	217
3.1.6	Тепловые свойства .....	218
3.1.7	Температурная зависимость параметров полевых транзисторов .....	218
	МОП транзистор .....	218
	Полевой транзистор с управляющим р-п переходом .....	220
3.2	Устройство полевого транзистора .....	221
3.2.1	Интегральные МОП транзисторы .....	221
3.2.2	Дискретные МОП транзисторы .....	223

3.2.3	Полевые транзисторы с управляющим р-п переходом .....	226
3.2.4	Корпус .....	227
3.3	Модели полевых транзисторов .....	227
3.3.1	Статические свойства .....	227
	Модель МОП транзистора Уровня 1 .....	228
	Объемные сопротивления .....	233
	Вертикальные мощные МОП транзисторы .....	234
	Полевые транзисторы с управляющим р-п переходом .....	236
3.3.2	Динамический режим .....	237
	Модель МОП транзистора Уровня 1 .....	241
	Модель полевого транзистора с управляющим р-п переходом .....	246
3.3.3	Модель МОП транзистора для режима малых сигналов .....	247
	Статическая модель МОП транзистора для режима малых сигналов в области насыщения .....	247
	Динамическая модель МОП транзистора для режима малых сигналов в области насыщения .....	249
	Граничные частоты при режиме малых сигналов .....	251
	Сводный перечень параметров МОП транзистора для малых сигналов .....	253
3.3.4	Шумы .....	256
	Источники шумов полевого транзистора .....	256
	Эквивалентные источники шумов .....	257
	Коэффициент шума полевого транзистора .....	258
	Упрощенное описание .....	261
	Сопоставление коэффициентов шума полевых и биполярных транзисторов .....	262
3.4	Типовые схемы .....	262
3.4.1	Схема с общим истоком .....	263
	Передаточные характеристики схемы с общим истоком .....	264
	Режим схемы с общим истоком для малых сигналов .....	265
	Схема с общим истоком и отрицательной обратной связью по току ....	268
	Схема с общим истоком и обратной связью по напряжению .....	272
	Установка рабочей точки .....	277
	Частотная зависимость и граничная частота .....	279
	Заключение .....	285
3.4.2	Схема с общим стоком .....	286
	Передаточная характеристика схемы с общим стоком .....	286
	Режим малых сигналов схемы с общим стоком .....	288
	Установка рабочей точки .....	290
	Частотная зависимость и граничная частота .....	291
3.4.3	Схема с общим затвором .....	296
	Передаточная характеристика схемы с общим затвором .....	297
	Режим малых сигналов схемы с общим затвором .....	299
	Установка рабочей точки .....	301
	Частотная характеристика и граничная частота .....	301
	Литература .....	304
<b>4.</b>	<b>Усилители</b> .....	<b>305</b>
4.1	Схемы .....	308
4.1.1	Источники тока и токовое зеркало .....	314
	Принцип действия токового зеркала .....	314
	Простые источники тока для схем на дискретных элементах .....	318

	Простые схемы токового зеркала .....	319
	Токовое зеркало на основе каскодной схемы .....	332
	Каскодное токовое зеркало .....	335
	Токовое зеркало Вильсона .....	342
	Динамический режим .....	344
	Токовые зеркала и источники тока других типов .....	345
4.1.2	Каскодная схема .....	353
	Режим малых сигналов каскодной схемы .....	355
	Частотная зависимость усиления и граничная частота каскодной схемы .....	358
4.1.3	Дифференциальный усилитель .....	368
	Передаточная характеристика n-p-n дифференциального усилителя .....	372
	Дифференциальный усилитель с активной нагрузкой .....	383
	Напряжение смещения нуля дифференциального усилителя .....	385
	Дифференциальный усилитель в режиме малых сигналов .....	387
	Установка рабочей точки .....	406
	Частотная характеристика и граничные частоты дифференциального усилителя .....	415
	Краткие выводы .....	432
4.1.4	Преобразователь полного сопротивления .....	433
	Однокаскадный преобразователь полного сопротивления .....	433
	Многоступенчатые преобразователи полного сопротивления .....	434
	Комплементарный преобразователь полного сопротивления .....	438
4.1.5	Схемы для установки рабочей точки .....	444
	Источник опорного тока, использующий напряжение UBE .....	445
	Источник опорного тока, пропорционального температуре .....	450
	Температурно-независимые источники опорного тока .....	455
	Источники опорного тока на МОП схемах .....	456
	Источники тока с насыщением .....	457
	Установка рабочей точки в интегральных схемах усилителей .....	458
4.2	Свойства и параметры усилителя .....	459
4.2.1	Характеристики усилителя .....	460
4.2.2	Малосигнальные параметры .....	463
	Рабочая точка .....	463
	Малосигнальные переменные .....	464
	Линеаризация .....	464
	Малосигнальные параметры .....	464
	Малосигнальная эквивалентная схема усилителя .....	465
	Усилители с обратной связью .....	468
	Расчет малосигнальных параметров с помощью малосигнальной эквивалентной схемы .....	470
	Последовательное включение усилителей .....	473
4.2.3	Нелинейные параметры .....	478
	Разложение передаточной характеристики в ряд в рабочей точке ....	479
	Выходной сигнал при синусоидальном входном сигнале .....	480
	Коэффициент нелинейных искажений .....	483
	Точка сжатия .....	486
	Интермодуляция и точки перехвата .....	486
	Последовательное включение усилителей .....	491
4.2.4	Шумы .....	495



	Источник и плотность шумов усилителя .....	495
	Эквивалентный источник шумов и коэффициент шума .....	496
	Оптимальный коэффициент шума	
	и оптимальное внутреннее сопротивление источника .....	500
	Коэффициент шума последовательной цепочки усилителей .....	503
	Оптимизация коэффициента шума .....	507
	Эквивалентные источники шума типовых схем .....	516
	Средний коэффициент шума и отношение сигнал-шум .....	536
	Литература .....	540
<b>5.</b>	<b>Операционные усилители</b>	<b>541</b>
5.1	Общие сведения .....	541
5.1.1	Типы операционных усилителей .....	543
5.1.2	Принцип обратной связи .....	546
	Неинвертирующий усилитель .....	547
	Инвертирующий усилитель .....	549
5.2	Стандартные операционные усилители .....	551
5.2.1	Принцип действия .....	552
5.2.2	Универсальный усилитель .....	554
5.2.3	Напряжения питания .....	557
5.2.4	Усилитель с одним источником питания .....	558
	Инверсия фазы .....	559
5.2.5	Усилитель с размахом, равным напряжению питания .....	561
5.2.6	Широкополосные операционные усилители .....	565
5.2.7	Коррекция частотной характеристики .....	571
	Основные положения .....	571
	Универсальная коррекция частотной характеристики .....	574
	Расщепление полюсов .....	575
	Согласованная коррекция частотной характеристики .....	577
	Скорость нарастания выходного напряжения .....	577
	Емкостная нагрузка .....	581
	Внутренняя коррекция нагрузки .....	584
	Двухполюсная коррекция частотной характеристики .....	585
5.2.8	Параметры операционных усилителей .....	586
	Усиление разностного и синфазного сигналов .....	589
	Входное напряжение смещения нуля .....	592
	Входные токи .....	594
	Входные сопротивления .....	596
	Выходное сопротивление .....	598
	Примеры статических погрешностей .....	599
	Ширина полосы пропускания .....	601
	Шумы .....	603
5.3	Усилитель крутизны .....	606
5.3.1	Внутреннее устройство .....	607
5.3.2	Типовые применения .....	610
5.4	Усилитель полного сопротивления .....	611
5.4.1	Внутреннее устройство .....	611
5.4.2	Частотные характеристики .....	615
5.4.3	Типовые применения .....	618
5.5	Усилитель тока .....	619
5.5.1	Внутреннее устройство .....	620

5.5.2	Типовые применения .....	622
	Использование схем с обратной связью по току .....	622
	Использование обратной связи по напряжению .....	630
5.6	Сопоставления .....	633
5.6.1	Практические применения .....	639
5.6.2	Разновидности операционных усилителей .....	642
	Классификация .....	657
	Литература .....	659
<b>6.</b>	<b>Релаксационные схемы</b> .....	<b>660</b>
6.1	Транзистор как элемент цифровой схемы .....	660
	Динамические свойства .....	662
6.2	Релаксационные схемы с насыщенными транзисторами .....	663
6.2.1	Бистабильные релаксационные схемы .....	664
	Триггер .....	664
	Триггер Шмитта .....	666
6.2.2	Моностабильные релаксационные схемы .....	667
6.2.3	Астабильная релаксационная схема .....	668
6.3	Релаксационные схемы на транзисторах с эмиттерной связью .....	669
6.3.1	Триггер Шмитта с эмиттерной связью .....	669
6.3.2	Мультивибратор с эмиттерной связью .....	670
6.4	Релаксационные схемы на логических элементах .....	671
6.4.1	Триггеры .....	672
6.4.2	Одновибратор .....	672
6.4.3	Мультивибратор .....	673
6.5	Релаксационные схемы на компараторах .....	675
6.5.1	Компараторы .....	675
	Двухпороговый компаратор .....	677
6.5.2	Триггер Шмитта .....	677
	Инвертирующий триггер Шмитта .....	677
	Неинвертирующий триггер Шмитта .....	678
	Прецизионный триггер Шмитта .....	680
6.5.3	Мультивибраторы .....	680
	Мультивибратор с прецизионным триггером Шмитта .....	682
6.5.4	Одновибраторы .....	683
	Одновибратор с послезапуском .....	684
	Литература .....	685
<b>7.</b>	<b>Основы цифровой техники</b> .....	<b>686</b>
7.1	Основные логические функции .....	686
7.2	Составление логических функций .....	689
7.2.1	Таблица Карно .....	691
7.3	Основные производные функции .....	693
7.4	Схемотехническая реализация основных логических функций .....	694
7.4.1	Резисторно-транзисторная логика .....	696
7.4.2	Диодно-транзисторная логика .....	697
7.4.3	Медленнодействующая помехоустойчивая логика .....	697
7.4.4	Транзисторно-транзисторная логика .....	698
	Выходы с открытым коллектором .....	699
	Трехстабильные выходы .....	701
7.4.5	Эмиттерно-связанная логика .....	702
	Функция «монтажное» ИЛИ .....	705

7.4.6	Комплементарная МОП логика .....	706
	Меры предосторожности при работе с КМОП схемами .....	708
	Логические КМОП элементы .....	709
	Логический ключ .....	709
7.4.7	n-канальная МОП логика .....	710
7.4.8	Заключительный обзор .....	711
7.5	Межсоединения .....	713
	Литература .....	715
<b>8.</b>	<b>Комбинационные логические схемы</b> .....	<b>716</b>
8.1	Представление чисел .....	718
8.1.1	Положительные целые числа в двоичном коде .....	718
	Восьмеричный код .....	718
	Шестнадцатеричный код .....	718
8.1.2	Положительные целые числа в двоично-десятичном коде .....	719
8.1.3	Целые двоичные числа с произвольным знаком .....	719
	Представление модуля и знака .....	719
	Представление с поразрядным дополнением до двух .....	720
	Расширение знакового разряда .....	721
	Смещенный двоичный код .....	722
8.1.4	Двоичные числа с фиксированной запятой .....	722
8.1.5	Двоичные числа с плавающей запятой .....	723
8.2	Мультиплексор .....	726
8.2.1	Дешифратор «один из n» .....	726
8.2.2	Демультиплексор .....	727
8.2.3	Мультиплексоры .....	728
8.3	Приоритетный дешифратор .....	729
8.4	Регистры сдвига .....	730
8.5	Компараторы .....	732
8.6	Сумматоры .....	734
8.6.1	Полусумматоры .....	734
8.6.2	Полный сумматор .....	735
8.6.3	Логика параллельного переноса .....	736
8.6.4	Вычитание .....	738
8.6.5	Переполнение при сложении чисел в дополнительном коде .....	739
8.6.6	Сложение и вычитание чисел с плавающей запятой .....	740
8.7	Умножители .....	740
8.7.1	Умножение чисел с фиксированной запятой .....	740
8.7.2	Умножение чисел с плавающей запятой .....	743
	Литература .....	743
<b>9.</b>	<b>Переключающие схемы</b> .....	<b>744</b>
9.1	Интегральные триггеры .....	744
9.1.1	Статические триггеры .....	744
	Синхронный RS-триггер .....	745
	Синхронный D-триггер .....	746
9.1.2	Триггеры с временным запоминанием .....	746
	Триггеры, срабатывающие по двум фронтам импульса .....	747
	Триггеры, срабатывающие по одному фронту импульса .....	749
9.2	Двоичные счетчики .....	752
9.2.1	Асинхронный двоичный счетчик .....	753
9.2.2	Синхронный двоичный счетчик .....	754

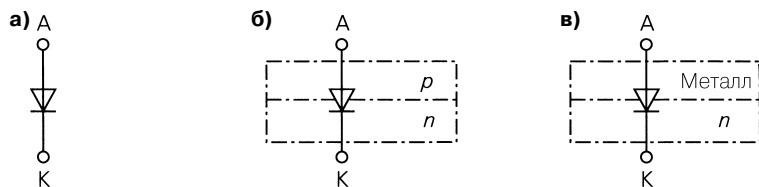
9.2.3	Реверсивные счетчики .....	756
	Счетчики с переключаемым направлением счета .....	757
	Счетчики с входами прямого и обратного счета .....	758
	Устранение совпадений .....	758
	Метод вычитания .....	760
9.3	Двоично-десятичный счетчик в коде 8421 .....	760
9.3.1	Асинхронный двоично-десятичный счетчик .....	761
9.3.2	Синхронный двоично-десятичный счетчик .....	762
9.4	Счетчики групп .....	763
9.5	Регистры сдвига .....	765
9.5.1	Принципиальная схема .....	765
9.5.2	Регистр сдвига с параллельным вводом .....	766
9.6	Обработка асинхронных сигналов .....	766
9.6.1	Устранение вибраций механических контактов .....	767
9.6.2	RS-триггер с запуском по фронту импульса .....	768
9.6.3	Синхронизация импульсов .....	768
9.6.4	Синхронный одновибратор .....	769
9.6.5	Синхронный детектор изменений .....	771
9.6.6	Синхронный тактовый переключатель .....	771
9.7	Системное проектирование последовательностных схем .....	772
9.7.1	Диаграмма состояний .....	772
9.7.2	Пример проектирования счетчика групп .....	774
9.7.3	Сокращение потребности в объеме памяти .....	777
	Входной мультиплексор .....	778
9.8	Обозначения зависимостей .....	780
	Литература .....	783
<b>10.</b>	<b>Полупроводниковые запоминающие устройства</b> .....	<b>784</b>
10.1	Оперативные запоминающие устройства .....	786
10.1.1	Статические ОЗУ .....	786
	Временные условия .....	789
10.1.2	Динамические ОЗУ .....	792
	Контроллер динамического ОЗУ .....	792
10.2	Расширение возможностей ОЗУ .....	796
10.2.1	Двухпортовые ОЗУ .....	796
10.2.2	ОЗУ в качестве регистра сдвига .....	797
10.2.3	Память FIFO .....	798
	Реализация памяти FIFO на стандартных ОЗУ .....	800
10.2.4	Распознавание и коррекция ошибок .....	802
	Бит четности .....	802
	Код Хэмминга .....	804
10.3	Постоянные ЗУ .....	806
10.3.1	ПЗУ, программируемое фотошаблоном .....	807
10.3.2	Программируемое ПЗУ .....	807
10.3.3	Постоянное ЗУ с УФ стиранием .....	809
10.3.4	Электрически стираемое программируемое ПЗУ .....	812
10.4	Программируемые логические устройства .....	814
10.4.1	Программируемая матричная логика .....	818
10.4.2	Компьютерное проектирование ПЛУ .....	819
10.4.3	Обзор типов ПЛУ .....	821
10.4.4	Матрицы логических элементов, программируемые пользователем .....	825
	Литература .....	827

# Глава 1

## Диоды

Диод представляет собой полупроводниковый элемент с двумя выводами, один из которых называют *анодом* (А), а другой – *катодом* (К). Различают *дискретные диоды* в виде отдельного элемента, предназначенного для монтажа на плате и заключенного в собственный корпус, и *интегральные диоды*, которые вместе с другими элементами схемы изготавливаются на общей полупроводниковой подложке. У интегральных диодов имеется третий вывод, необходимый для соединения с общей подложкой. Иногда его называют *субстратом* (S), но он играет второстепенную роль в функционировании самого диода.

**Устройство.** Диоды представляют собой электронно-дырочный переход р-п или переход металл–полупроводник и называются соответственно диодами с р-п переходом или диодами Шоттки. Зона *p* обогащена дырками, а зона *n* – электронами. Условное графическое обозначение и структура диода показаны на рис. 1.1. Обычно зоны *p* и *n* диода с р-п переходом изготавливаются из кремния. Кроме этого существуют дискретные диоды на основе германия. Им свойственно низкое прямое падение напряжения, однако они устарели. В диодах Шоттки зона *p* заменена слоем металла, что также приводит к низкому прямому падению напряжения, поэтому они часто используются вместо германиевых диодов с р-п переходом.



**Рис. 1.1.** Условное графическое обозначение и устройство диода: а – графический символ; б – диод с р-п переходом; в – диод Шоттки

На практике кремниевые диоды с р-п переходом называют просто диодами. За исключением ряда диодов особого типа, все они изображаются на схемах одним и тем же графическим символом. Диоды разного типа различают лишь по маркировке на корпусе и техническим данным.

**Режимы работы.** В процессе работы диод может находиться в областях проводимости, запирания и пробоя, подробное описание которых дается в следующем разделе.

Диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока, называются *выпрямительными*; они попеременно работают в областях проводимости и запирания. Диоды, сконструированные для работы в области пробоя – *стабилитроны* (диоды Зенера) применяют для стабилизации напряжения. Еще один важный класс диодов составля-

ют *варикапы*. Они функционируют в режиме запирания и благодаря зависимости емкости запирающего слоя (барьерной емкости) от приложенного напряжения могут использоваться для настройки колебательных контуров на нужную частоту. Существует также множество специальных диодов, которые здесь не рассматриваются.

## 1.1

### Свойства диодов

Поведение диода проще всего представить с помощью его вольт-амперной характеристики, описывающей зависимость тока, протекающего через диод от приложенного к нему напряжения в случае, когда все величины постоянны или медленно меняются во времени. Для расчетов необходимы уравнения, строго описывающие поведение прибора. Чаще всего достаточно простых соотношений. Кроме того, имеется модель, хорошо воспроизводящая динамическое поведение диода под воздействием синусоидальных или импульсных сигналов. Эта модель рассматривается в разделе 1.3 и не требуется для изучения основных понятий. А теперь обратимся к поведению кремниевого диода с p-n переходом.

#### 1.1.1

#### Характеристики

Если к диоду приложить напряжение  $U_D = U_{AK}$  и измерить ток  $I_D$ , полагая, что на анод относительно катода поступает напряжение, мы получим характеристики, представленные на рис. 1.2. Обратите внимание на гораздо более крупный масштаб в области положительных напряжений. При  $U_D > 0$  В диод работает в области проводимости. Здесь ток растет экспоненциально с напряжением. У диодов с p-n переходом заметный ток течет при  $U_D > 0,4$  В. При  $-U_{BR} < U_D < 0$  В диод заперт, и ток становится пренебрежимо малым. Этот участок называют *областью запирания*. Напряжение пробоя  $U_{BR}$  зависит от типа

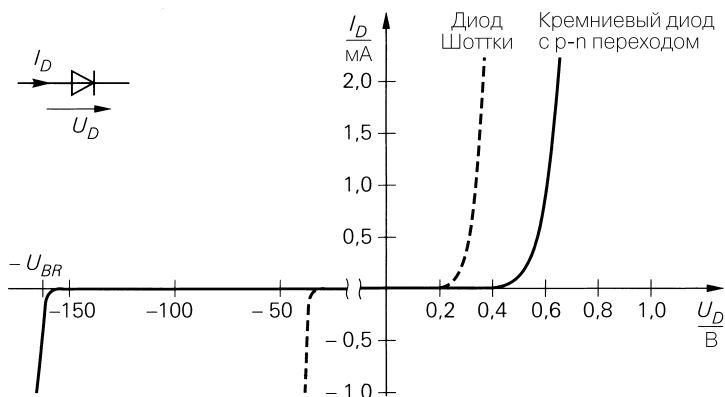
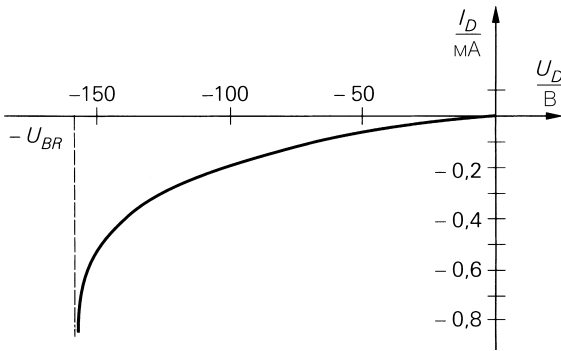


Рис. 1.2. Характеристики маломощных диодов

элемента и у выпрямительных диодов составляет от  $-50$  до  $-1000$  В. При  $U_D < -U_{BR}$  наступает пробой диода и возникает обратный ток. В этой области способны работать длительное время только стабилитроны и варикапы. Для диодов других типов наличие обратного тока при отрицательном напряжении нежелательно. В случае германиевых диодов или диодов Шоттки заметный ток в области проводимости возникает уже при  $U_D > 0,2$  В, а напряжение пробоя  $U_{BR}$  составляет от  $-10$  до  $-200$  В.

В области проводимости диода при средних токах напряжение оказывается почти постоянным благодаря крутому подъему характеристики. Это напряжение  $U_f$  называется *прямым*. Для германиевых диодов и диодов Шоттки оно имеет величину  $U_{f,Ge} \approx U_{f,Шоттки} \approx 0,3...0,4$  В, а у кремниевых диодов  $U_{f,Si} \approx 0,6...0,7$  В. У силовых диодов при токах в несколько ампер оно бывает существенно выше, так как в дополнение к внутреннему прямому напряжению появляется заметное падение напряжения на прямом сопротивлении и сопротивлении вводов диода:  $U_f = U_{f,I} + I_D R_B$ . В предельном случае  $I_D \rightarrow \infty$  диод ведет себя, как очень малое сопротивление  $R_B \approx 0,01...10$  Ом.

Область запирания в увеличенном масштабе представлена на рис. 1.3. Ток в запирающем направлении (обратный ток)  $I_R = -I_D$  весьма мал при запирающем напряжении  $U_R = -U_D$  и с приближением к напряжению пробоя сначала медленно увеличивается, а затем резко возрастает.



**Рис. 1.3.** Характеристика маломощного диода в области запирания

### 1.1.2

#### Описание диода с помощью уравнений

Характеристика диода в области  $U_D > 0$  в полулогарифмическом масштабе почти линейна (рис. 1.4). Следовательно, в силу  $\ln I_D \sim U_D$  (пропорционально) между  $I_D$  и  $U_D$  действует экспоненциальная зависимость. Исходя из закономерностей физики полупроводников [1.1], имеем:

$$I_D(U_D) = I_S \left( e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \text{ для } U_D \geq 0.$$

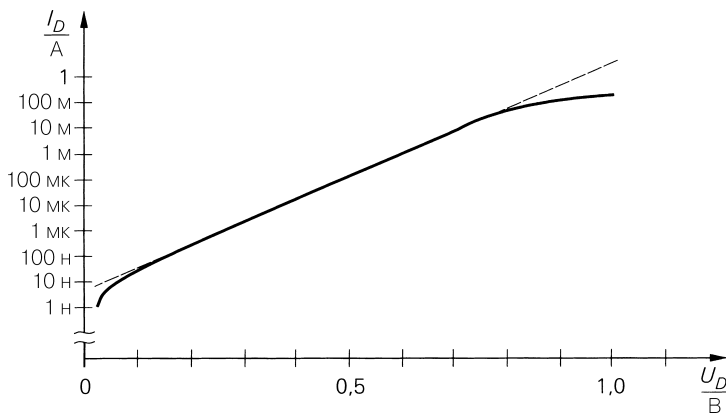


Рис. 1.4. Характеристика диода в полулогарифмическом масштабе при  $U_D > 0$

Для правильного описания реальных диодов требуется поправочный коэффициент, который позволил бы привести наклон прямой в соответствие с ее представлением в полулогарифмическом масштабе [1.1]:

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{U_D}{nU_T}} - 1 \right). \tag{1.1}$$

Здесь обратный ток насыщения  $I_S$ ,  $I_S \approx 10^{-12} \dots 10^{-6}$  А, коэффициент эмиссии  $n \approx 1 \dots 2$  и температурное напряжение  $U_T = kT/q \approx 26$  мВ при комнатной температуре.

Строго говоря, уравнение (1.1) выполняется только при  $U_D \geq 0$ , однако иногда его применяют и при  $U_D < 0$ . При  $U_D \ll -nU_T$  получим постоянный ток  $I_D = -I_S$ , как правило, значительно меньший, нежели фактически текущий. Поэтому справедливо лишь качественное утверждение о том, что в области запирания через диод протекает малый отрицательный ток; для описания его зависимости согласно рис. 1.3 необходимы дополнительные уравнения (см. раздел 1.3).

В области проводимости соблюдается условие  $U_D \gg nU_T \approx 26 \dots 52$  мВ, следовательно, можно воспользоваться приближением

$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{nU_T}}; \tag{1.2}$$

отсюда для напряжения получим

$$U_D = nU_T \ln \frac{I_D}{I_S} = nU_T \ln 10 \lg \frac{I_D}{I_S} \approx 60 \dots 120 \text{ мВ} \times \lg \frac{I_D}{I_S}.$$

Таким образом, при десятикратном увеличении тока напряжение возрастает на 60...120 мВ. При больших токах следует учитывать падение напряжения  $I_D R_B$  на прямом сопротивлении  $R_B$ , складывающемся с падением напряжения на р-п переходе:

$$U_D = nU_T \ln \frac{I_D}{I_S} + I_D R_B.$$



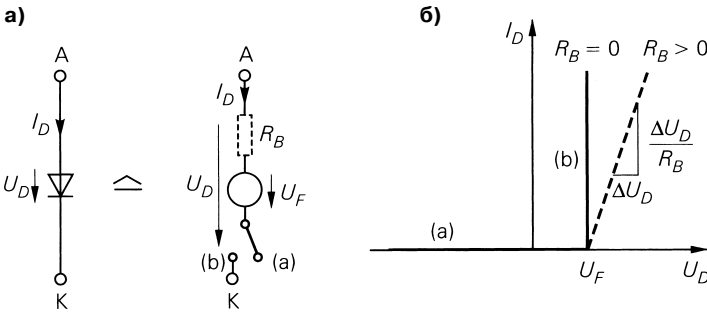
В данном случае представить ток в виде функции  $I_D = I_D(U_D)$  нельзя.

При несложных вычислениях диод можно рассматривать в виде ключа, разомкнутого в области запирания или замкнутого в области проводимости. Если допустить, что напряжение на диоде в области проводимости постоянно, а в области запирания ток не течет, диод легко заменить идеальным ключом, который управляется напряжением, и источником прямого напряжения  $U_F$  как показано на рис. 1.5а. Характеристика, соответствующая эквивалентной схеме, приведена на рис. 1.5б. Она состоит из двух полупрямых:

$$\begin{aligned} I_D &= 0 && \text{для } U_D < U_F && \rightarrow \text{ключ разомкнут (а)} \\ U_D &= U_F && \text{для } I_D > 0 && \rightarrow \text{ключ замкнут (б)} \end{aligned}$$

С учетом прямого сопротивления  $R_B$  получим:

$$I_D = \begin{cases} 0 & U_D < U_F \rightarrow \text{ключ разомкнут (а)} \\ \frac{U_D - U_F}{R_B} & U_D \geq U_F \rightarrow \text{ключ замкнут (б)} \end{cases}$$



**Рис. 1.5.** Простая эквивалентная схема диода с прямым сопротивлением (пунктир) и без него (сплошная линия)

У кремниевых диодов с р-п переходом  $U_F \approx 0,6$  В, а у диодов Шоттки  $U_F \approx 0,3$  В. Соответствующая схема и характеристика выделены на рис. 1.5 пунктиром.

В обоих вариантах необходимо учитывать различия ситуаций, то есть принимать во внимание как разомкнутое, так и замкнутое состояние ключа, и находить непротиворечивое решение. Достоинство подхода в том, что оба случая описываются линейными уравнениями, которые легко решаются. Напротив, при использовании экспоненциальной зависимости согласно (1.1) появляются неявные нелинейные уравнения, поддающиеся только численному решению.

**Пример.** На рис. 1.6 показан диод, включенный в мостовую схему. Рассчитывая напряжения  $U_1$  и  $U_2$  и напряжение на диоде  $U_D = U_1 - U_2$ , исходят прежде всего из его способности запирает цепь. Иначе говоря, справедливо неравенство  $U_D < U_F = 0,6$  В, и ключ в эквивалентной схеме разомкнут. В этом случае  $U_1$  и  $U_2$  определяются по формуле делителя напряжения:

$$U_1 = \frac{U_b R_2}{R_1 + R_2} = 3,75 \text{ В и } U_2 = \frac{U_b R_4}{R_3 + R_4} = 2,5 \text{ В.}$$

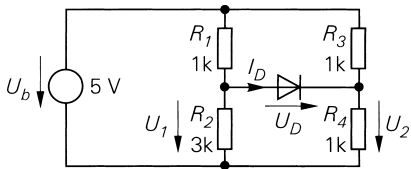


Рис. 1.6. Пример применения простой эквивалентной схемы

В результате  $U_D = 1,25$  В, что противоречит исходному допущению. Затем диод считаем проводящим, а ключ в эквивалентной схеме – замкнутым. Тогда  $U_D = U_F = 0,6$  В и  $I_D > 0$ . Используя узловые уравнения

$$\frac{U_1}{R_2} + I_D = \frac{U_b - U_1}{R_1}, \quad \frac{U_2}{R_4} = I_D + \frac{U_b - U_2}{R_3}$$

и заменяя  $U_1 = U_2 + U_F$ , исключаем неизвестные  $I_D$  и  $U_1$  и получаем

$$U_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) = U_b \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) - U_F \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Отсюда  $U_2 = 2,76$  В и  $U_1 = U_2 + U_F = 3,36$  В. После подстановки в одно из узловых уравнений находим  $I_D = 0,52$  мА. Теперь условие  $I_D > 0$  соблюдается, противоречие устранено и решение найдено.

### 1.1.3

#### Режим переключения

Во многих устройствах диоды работают попеременно в областях проводимости и запираания, примером чему служит выпрямление переменного тока. Процесс переключения не соответствует статической характеристике из-за накопления нарастающего и убывающего (при включении и выключении соответственно) заряда паразитной емкостью диода. На рис. 1.7 представлена схема, с помощью которой можно найти характеристику процесса переключения при омической ( $L = 0$ ) и омически-индуктивной ( $L > 0$ ) нагрузке. Питая схему напряжением прямоугольной формы, получим изменение во времени напряжения на диоде и протекающего через него тока (рис. 1.8) при  $U = 10$  В,  $f = 10$  МГц,  $R = 1$  кОм и  $L = 0$  или  $L = 5$  мкГн.

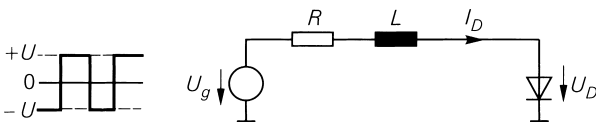
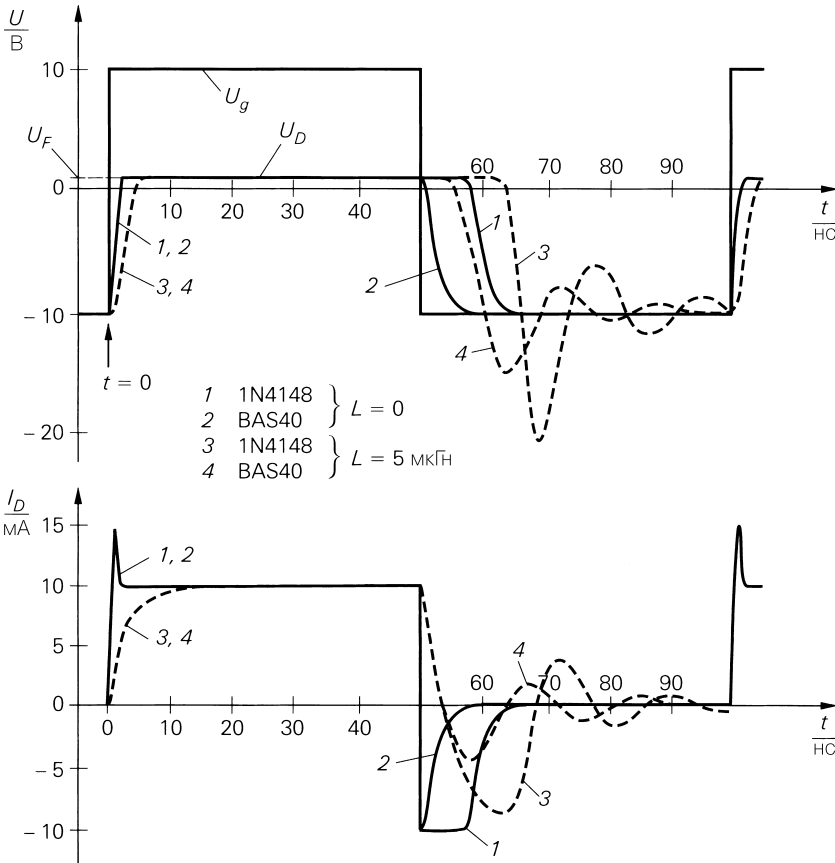


Рис. 1.7. Схема для измерения характеристики процесса переключения

#### Режим переключения при омической нагрузке

В случае омической нагрузки при включении питания заряжается емкость диода и, как следствие, наблюдается скачок тока. Одновременно напряжение нарастает от начального уровня, соответствующего напряжению запираания, до прямого напря-



**Рис. 1.8.** Характеристика процесса переключения кремниевого диода 1N4148 и диода Шоттки BAS40 в схеме измерений на рис. 1.7

жения  $U_F$ , чем и завершается процесс включения. У рpn-диодов имеется беспримесный или слабопримесный слой между слоями р и п, обеспечивающий более высокое напряжение пробоя. При сильных токах рpn-диоды характеризуются избыточным прямым напряжением (рис. 1.9), так как им свойственно высокое прямое сопротивление  $R_B$  сразу после включения. Вслед за тем оно убывает, и напряжение уменьшается до своей статической величины. При выключении ток течет в обратном направлении, пока емкость не разрядится. В конечном счете ток прекращается и напряжение на диоде падает до отрицательного уровня. Поскольку емкость диодов Шоттки существенно меньше емкости кремниевых диодов, имеющих сравнимые размеры, их отличает заметно меньшее время выключения (рис. 1.8). Поэтому диоды Шоттки используются как выпрямители в высокочастотных цепях ( $f > 20$  кГц), тогда как более дешевые кремниевые диоды служат выпрямителями в сетях промышленной частоты  $f = 50$  Гц. Если частота настолько высока, что емкость не успевает разрядиться до следующего включения, эффект выпрямления исчезает.