Ульрих Титце
Кристоф Шенк

Полупроводниковая схемотехника

Том I

U. Tietze
Ch. Schenk

Halbleiter-Schaltungstechnik

12. Auflage

У. Титце
К. Шенк

Полупроводниковая схемотехника

12-е издание

Том I

УДК 621.382
ББК 32.852
Т45

Титце У., Шенк К.
Т45 Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том I: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с.: ил.

ISBN 978-5-94120-200-3

Книга Ульриха Титце и Кристофа Шенка «Полупроводниковая схемотехника» представляет собой фундаментальный труд, объединяющий принципы устройства полупроводниковых элементов (диоды, биполярные и полевые транзисторы, интегральные микросхемы) и основы создания из этих элементов различных функциональных узлов аналоговой техники (усилители, модуляторы, фильтры, радиоприемники) и цифровой (спусковые схемы, счетчики, регистры, шифраторы и дешифраторы, устройства памяти и т.д.).

Книга разбита на два тома: первый посвящен основам схемотехники, второй – применениям функциональных узлов при создании более сложных устройств.

При изложении материала широко используются эквивалентные схемы как полупроводниковых элементов, так и функциональных узлов, соответствующие их работе в области постоянного и переменного тока. Особое внимание уделено также переходным процессам цифровых схем. Описание каждого элемента или схемы сопровождается необходимым количеством достаточно элементарных формул, служащих для их инженерного расчета.

Энциклопедическая полнота, обилие самых разных схем и доступное математическое обоснование делают книгу полезной широкому кругу читателей: радиолюбителям, инженерам радиотехники и электроники и научным работникам.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельца авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно остается, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможный ущерб любого вида, связанный с применением содержащихся здесь сведений.

Все торговые знаки, упомянутые в настоящем издании, зарегистрированы. Случайное неправильное использование или пропуск торгового знака или названия его законного владельца не должно рассматриваться как нарушение прав собственности.

ISBN 3-540-42849-6 (нем.)

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
Springer-Verlag is a company in the BertelsmannSpringer publishing group.
All Rights Reserved.

ISBN 978-5-94120-200-3 (рус.)

© Перевод на русский язык, оформление ДМК Пресс, 2008

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/. Ваши пожелания и замечания об ошибках просим высылать по адресу электронной почты tietze-schenk@springer.de.

Мы выражаем признательность издательству SpringerVerlag, отдельное спасибо д-ру Меркле (Merkle) за приятное сотрудничество и г-ну Соссна (Sossna), PTP-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 вентилей 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

1. Диоды **17**

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 p-n 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 pin-диод ... 44
1.4.3 Варикапы ... 45
1.4.4 Мостовые выпрямители ... 48
1.4.5 Смесители ... 49
Литература ... 51

2. Биполярные транзисторы 52
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 p-n переходом ... 220
3.2 Устройство полевого транзистора ... 221
3.2.1 Интегральные МОП транзисторы ... 221
3.2.2 Дискретные МОП транзисторы ... 223