Ульрих Титце
Кристоф Шенк

Полупроводниковая схемотехника

Том II

ДМК ПРЕСС
издательство
Москва, 2007

U. Tietze
Ch. Schenk

Halbleiter-Schaltungstechnik

12. Auflage

У. Титце
К. Шенк

Полупроводниковая схемотехника

12-е издание

Том II

УДК 621.382
ББК 32.852
Т45

Титце У., Шенк К.
Т45 Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.: ил.

ISBN 978-5-94120-201-0

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 работе в области постоянного тока и низких/высоких частот. 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, техникам ремонтных предприятий, 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 978-5-94120-201-0 (рус.)

© Перевод на русский язык, оформление ДМК Пресс, 2007

Предисловие к 12-му изданию

Электроника средств связи занимает все более важное место; 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, куда 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 по высокой частоте описываются особым образом: вместо полных сопротивлений используются коэффициенты отражения, а четырехполюсники характеризуются S-параметром. Отдельные компоненты должны быть согласованы с волновым сопротивлением линий связи во избежание отражений на высоких частотах. Этим вопросам уделяется должное внимание в новом разделе о схемах, применяемых 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 собственном 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. Точно так же программируемые логические устройства (ПЛУ) входят в область цифровой техники, 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, установка рабочей точки по схеме токового зеркала, использование активных нагрузок вместо сопротивлений 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 об основах схемотехники, однако мы ограничимся феноменологическим описанием, отказываясь углубляться в фундаментальные вопросы физики полупроводников.

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

11. Линейные и нелинейные аналоговые вычислительные схемы 21
11.1 Схема суммирования ... 21
11.2 Схемы вычитания ... 22
11.2.1 Использование сложения ... 22
11.2. Схемы вычитания ... 23
11.2.2 Схема вычитания на операционном усилителе ... 23
11.3 Схема с изменяемыми модулем и знаком коэффициента ... 26
11.4 Схемы интегрирования ... 27
11.4.1 Инвертирующий интегратор ... 27
11.4.2 Начальные условия ... 30
11.4.3 Суммирующий интегратор ... 32
11.4.4 Неинвертирующий интегратор ... 32
11.5 Схемы дифференцирования ... 33
11.5.1 Принципиальная схема ... 33
11.5.2 Практическая реализация ... 34
11.5.3 Дифференцирующее устройство с высоким входным сопротивлением 34
11.6 Решение дифференциальных уравнений ... 35
11.7 Функциональные преобразователи ... 37
11.7.1 Логарифмирующее устройство ... 38
11.7.2 Реализация экспоненциальной функции ... 41
11.7.3 Вычисление степенных функций с помощью логарифма ... 43
11.7.4 Формирование функций sin x и cos x ... 44
Применение степенных рядов ... 47
Дифференциальный усилитель ... 48
Функция cos x ... 49
Одновременное формирование функций sin x и cos x для аргумента в диапазоне $-\pi \le x \le +\pi$ ... 50
11.7.5 Перестраиваемые функциональные схемы ... 51
11.8 Аналоговые схемы умножения ... 53
11.8.1 Умножение с помощью логарифмических функциональных генераторов ... 54
11.8.2 Умножитель, использующий изменение крутизны транзистора ... 55
Схема деления с улучшенными характеристиками ... 60
11.8.3 Схема умножения с электрически изолированными элементами ... 61
11.8.4 Коррекция схем умножения ... 63
11.8.5 Применение одно- и двухквадрантного умножителей для четырехквадрантного умножения ... 64
11.8.6 Использование схемы умножения для деления и извлечения квадратных корней ... 65
11.9 Преобразование координат ... 66
11.9.1 Преобразование полярных координат в декартовы ... 66
11.9.2 Преобразование декартовых координат в полярные ... 67
Литература ... 68

12. Управляемые источники и схемы преобразования полного

сопротивления **70**
12.1 Источники напряжения, управляемые напряжением ... 70
12.2 Источники напряжения, управляемые током ... 72
12.3 Источники тока, управляемые напряжением ... 73
12.3.1 Источники тока с незаземленной нагрузкой ... 74
12.3.2 Источники тока с заземленной нагрузкой ... 76
12.3.3 Эталонные источники тока на транзисторах ... 77
Транзисторные источники тока с биполярным выходным током ... 81
12.3.4 Плавающие источники тока ... 84
12.4 Источники тока, управляемые током ... 85
12.5 Преобразователь отрицательного сопротивления (NIC) ... 86
12.6 Гиратор ... 89
12.7 Циркуляторы ... 93
Литература ... 95

13. Активные фильтры **97**
13.1 Теоретические основы фильтров нижних частот ... 97
13.1.1 Фильтр нижних частот Баттерворта ... 101
13.1.2 Фильтры нижних частот Чебышева ... 104
13.1.3 Фильтры Бесселя ... 108
13.1.4 Обобщенная теория фильтров ... 111
13.2 Преобразование фильтров нижних частот в фильтры верхних частот ... 120
13.3 Реализация фильтров верхних и нижних частот первого порядка ... 121
13.4 Реализация фильтров верхних и нижних частот второго порядка ... 123
13.4.1 LRC-фильтр ... 123
13.4.2 Фильтр с многопетлевой отрицательной обратной связью ... 124
13.4.3 Фильтр с одной петлей положительной обратной связи ... 125
13.5 Реализация фильтров верхних и нижних частот более высокого порядка ... 128
13.6 Преобразование фильтра нижних частот в полосовой фильтр ... 130
13.6.1 Полосовой фильтр второго порядка ... 131
13.6.2 Полосовой фильтр четвертого порядка ... 133
13.7 Реализация полосовых фильтров второго порядка ... 135
13.7.1 LRC-фильтр ... 136
13.7.2 Полосовой фильтр с многопетлевой отрицательной обратной связью ... 136
13.7.3 Полосовой фильтр с одной петлей положительной обратной связи ... 138
13.8 Преобразование фильтра нижних частот в режекторный фильтр ... 139
13.9 Реализация режекторных фильтров второго порядка ... 141
13.9.1 Режекторный LRC-фильтр ... 141
13.9.2 Активный режекторный фильтр с двойным Т-образным мостом ... 141
13.9.3 Активный режекторный фильтр с мостом Вина-Робинсона ... 142
13.10 Фазовые фильтры ... 144
13.10.1 Принцип действия ... 144
13.10.2 Реализация фазового фильтра первого порядка ... 146
13.10.3 Реализация фазового фильтра второго порядка ... 147
13.11 Перестраиваемый универсальный фильтр ... 149
13.11.1 Фильтр с перестраиваемыми коэффициентами ... 149
13.11.2 Фильтр с перестраиваемыми параметрами ... 150
13.11.3 Электронное управление параметрами фильтров ... 153
13.12 Фильтры с переключаемыми конденсаторами ... 155
13.12.1 Основные принципы ... 155
13.12.2 SC-интегратор ... 156

13.12.3 SC-фильтр первого порядка ... 157
13.12.4 Проектирование SC-фильтров второго порядка ... 158
13.12.5 Интегральная реализация SC-фильтров ... 160
13.12.6 Общая точка зрения на применение SC-фильтров ... 160
13.12.7 Обзор выпускаемых SC-фильтров ... 161
Литература ... 163

14. Генераторы сигналов 164
14.1 LC-генераторы ... 164
14.1.1 Основные условия генерации ... 164
14.1.2 Схемы генераторов Мейснера ... 166
14.1.3 Генератор Хартлея (схема индуктивной трехточки) ... 168
14.1.5 LC-генератор с эмиттерной обратной связью ... 169
14.1.4 Генератор Колпитца (схема емкостной трехточки) ... 169
14.1.6 Двухтактные генераторы ... 170
14.2 Кварцевые генераторы ... 171
14.2.1 Электрические свойства кварцевого резонатора ... 172
14.2.2 Генераторы первой гармоники ... 173
14.2.3 Генераторы гармоник ... 175
14.3 Генераторы с мостом Вина ... 177
14.4 Генераторы с аналоговым вычислителем ... 181
14.5 Функциональные генераторы ... 184
14.5.1 Принцип действия генератора ... 185
14.5.2 Практическая реализация ... 185
14.5.3 Функциональные генераторы с управляемой частотой ... 187
Переменный коэффициент заполнения ... 188
14.5.4 Функциональные генераторы, формирующие одновременно синусоидальные и косинусоидальные колебания ... 190
Литература ... 191

15. Усилители мощности 193
15.1 Эмиттерный повторитель как усилитель мощности ... 193
15.2 Комплементарный эмиттерный повторитель ... 195
15.2.1 Комплементарные эмиттерные повторители в режиме класса B ... 195
15.2.2 Комплементарные эмиттерные повторители класса AB ... 198
15.2.3 Формирование напряжения смещения ... 199
15.3 Комплементарные схемы Дарлингтона ... 201
15.4 Комплементарные истоковые повторители ... 203
15.5 Электронное ограничение тока ... 204
Ограничение тока, зависимое от амплитуды ... 206
15.6 Четырехквадрантный режим ... 207
15.7 Определение параметров выходного каскада мощности ... 209
15.8 Схемы управления с усилением напряжения ... 211
Широкополосная схема управления ... 212
15.9 Повышение выходного тока интегральных операционных усилителей ... 214
Литература ... 215

16. Источники питания 216
16.1 Свойства сетевых трансформаторов ... 216
16.2 Сетевые выпрямители ... 218
16.2.1 Однополупериодные выпрямители ... 218
16.2.2 Мостовые выпрямители ... 219