

Д. В. Игумнов
Г. П. Костюнина

ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

2-е издание,
дополненное

*Допущено УМО по образованию
в области прикладной информатики
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности
«Прикладная информатика» и другим
междисциплинарным специальностям*

Москва
Горячая линия - Телеком
2011

УДК 621.396.6

ББК 32.852

И28

Рецензенты: чл.-корр. РАН, профессор *Л. Д. Бахрах*
доктор техн. наук, профессор *В. И. Соленов*

Игумнов Д. В., Костюнина Г. П.

И28 Основы полупроводниковой электроники. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., дополн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 394 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0180-3.

В книге изложены основы построения современных полупроводниковых аналоговых и цифровых устройств. Приведены сведения о физических явлениях в полупроводниковых элементах, рассмотрены различные диоды, биполярные и полевые транзисторы. Описаны особенности интегральных схем. Основное внимание уделяется рассмотрению разнообразных транзисторных и интегральных устройств непрерывного и импульсного действия. В настоящем издании (первое издание вышло в свет в 1995 г.) приведена информация об одноэлектронных транзисторах, дополнен раздел «Постоянные запоминающие устройства» и добавлен раздел «Микропроцессоры».

Для студентов вузов, будет полезна специалистам смежных с электроникой областей, которые занимаются вопросами, требующими от них дополнительных знаний по электронике.

ББК 32.852

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Учебное издание

Игумнов Дмитрий Васильевич, Костюнина Галина Петровна

ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

2-е издание, дополненное

Редактор Е. П. Стариков

Художник В. Г. Ситников

Подготовка оригинал-макета О. А. Москвина

Подписано к печати 02.03.11. Формат 60×90 1/16., Усл. печ. л. 24,5. Изд. № 110180. Тираж 1000 (1-й завод 500 экз.)

ISBN 978-5-9912-0180-3

© Д. В. Игумнов, Г. П. Костюнина, 2011

© Издательство «Горячая линия–Телеком», 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электроникой принято называть широкую область науки и техники, охватывающую изучение процессов переноса и взаимодействия электрических зарядов в материалах и приборах, изготовленных на их основе, разработку этих приборов и создание устройств обработки и хранения информации, а также общие вопросы применения электронных устройств. В электронике можно выделить ряд основных направлений: физическую электронику, прикладную информационную электронику, энергетическую промышленную электронику и др. Конечно, особо следует представить одну из лидирующих в современном развитии среди областей электроники – микроэлектронику, являющуюся основной частью полупроводниковой электроники. Именно благодаря микроэлектронике на сегодняшний день трудно найти область науки и техники, где электроника еще не нашла своего применения. Однако современный уровень развития требует все большего насыщения различными электронными устройствами научно-исследовательских, оборонных, промышленных и других объектов.

История электроники относительно коротка. Предтечей ее следует считать открытие радио нашим соотечественником А. С. Поповым в 1895 г. Один из первых значительных шагов на пути развития электроники сделал американский изобретатель Л. де Форест, предложивший в 1906 г. первый усилительный электронный элемент – ламповый триод. В 1920 г. О. В. Лосевым был впервые использован полупроводниковый элемент для получения усиления и генерации электрических сигналов. Примерно со времени этого события происходит постепенное нарастание интереса к полупроводниковой электронике, и хотя практически она остается «чисто ламповой», все больше и больше выполняется интересных исследований по физике полупроводников и полупроводниковых элементов, среди которых одно из ведущих мест занимали работы А. Ф. Иоффе и его учеников. Из работ этого периода развития электроники следует отметить статью немецкого физика В. Шотки, разработавшего теорию контакта металл-полупроводник, который широко используется в совре-

менной полупроводниковой электронике. Особо выделим основополагающее изобретение американского инженера Г. Блэка по использованию отрицательной обратной связи. Сейчас ясно любому электронщику, что без отрицательных обратных связей даже невозможно представить себе современную электронику. Однако тогда, в 1928 г., патентное ведомство США назвало это фундаментальное предложение «глупой затеей».

В 1948 г. американские физики Дж. Бардин и В. Браттейн обнаружили эффект усиления тока в полупроводниковой структуре с двумя *p-n* переходами. Это революционное событие в электронике привело к созданию В. Шокли биполярного транзистора – основного и на сегодняшний день активного (усилительного) элемента полупроводниковой электроники. В дальнейшем электроника стала развиваться очень быстрыми темпами: ежегодно появлялись новые типы полупроводниковых приборов, улучшалась технология их изготовления, создавались различные устройства информационной и энергетической электроники и т.д. Электроника становится незаменимой помощницей во многих областях производства и науки, обороны и космических исследований. В конце шестидесятых годов появляются первые изделия микроэлектроники – интегральные схемы (микросхемы), которые быстро совершенствовались и стали основными изделиями современной электроники.

Современная электроника – это полупроводниковая электроника. Сегодняшний этап ее развития характеризуется быстро растущей степенью интеграции; уже созданы интегральные схемы, содержащие на одном полупроводниковом кристалле более 10^6 элементов. В перспективе развития полупроводниковой электроники намечается функциональное укрупнение конструктивных единиц за счет использования новых физических явлений, позволяющих с помощью простых нерасчленяемых структур осуществить функции, обычно реализуемые с помощью многоэлементной сложной цепи или устройства. Реализация такого принципа соответствует появлению новых типов изделий полупроводниковой электроники. Они и представляют собой новый этап развития электроники – функциональную электронику.

Каждый технически грамотный человек должен знать электронику. Посильный вклад в решение этой задачи стремятся внести и авторы настоящей книги. Ее материал изложен в достаточно краткой форме. Книга предназначена для широкого круга ин-

женерно-технических специалистов смежных с электроникой областей, которые занимаются вопросами, требующими от них дополнительных знаний по электронике. В настоящей книге авторы стремились изложить материал таким образом, чтобы, сохранив известную строгость, дать возможность сравнительно легко разобраться в нем лицам, которые не получили фундаментальной подготовки по физике и электротехнике. Она может быть использована и как дополнительное учебное пособие для студентов соответствующих факультетов вузов и техникумов.

Предлагаемая вниманию читателей книга содержит 17 глав. В первых пяти главах сообщаются необходимые сведения о полупроводниковых элементах, на основе которых выполняются современные электронные устройства. Последующие пять глав посвящены рассмотрению разнообразных, прежде всего микроэлектронных усилителей. В гл. 11 описаны частотно-избирательные устройства, а в гл. 12 – вторичные источники электропитания. Последние пять глав посвящены устройствам дискретного действия: транзисторным ключам, логическим элементам, устройствам памяти, генераторам импульсных сигналов и некоторым цифровым устройствам. В книге использованы фрагменты лекций, читаемых авторами в течение многих лет в Московском институте радиотехники, электроники и автоматики.

Авторы благодарны Бабенко В. П., Дрожжеву В. В., Изъюровой Г. И., Королеву Г. В., Левинсону Г. Р. и Матсону Э. А. за критические замечания и советы, сделанные при обсуждении отдельных разделов книги.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Свойства электронно-дырочных переходов	6
1.1. Структура и энергетические зоны полупроводников	6
1.2. Примесные полупроводники	9
1.3. Основные параметры полупроводников	13
1.4. Проводимость полупроводников	15
1.5. Структура и основные свойства р-п перехода	17
1.6. Вольтамперная характеристика р-п перехода	22
1.7. Емкости р-п перехода	26
1.8. Обратный ток р-п перехода	27
1.9. Пробой р-п перехода	29
Глава 2. Полупроводниковые диоды	32
2.1. Силовые диоды	32
2.2. Опорные диоды	33
2.3. Диоды ВЧ и СВЧ	36
2.4. Варикапы	38
2.5. Туннельные диоды	39
2.6. Генераторные диоды	41
2.7. Фотодиоды	43
2.8. Светодиоды	45
Глава 3. Биполярные транзисторы	47
3.1. Принцип действия	47
3.2. Вольтамперные характеристики	50
3.3. Усилительные параметры и эквивалентные схемы	54
3.4. Частотные параметры	60
3.5. Транзисторы ВЧ и СВЧ	64
3.6. Режимы работы	67
3.7. Максимальные предельные режимы	69
3.8. Лавинные транзисторы и тиристоры	73
Глава 4. Полевые транзисторы	76
4.1. Полевой транзистор с р-п переходом	76
4.2. Транзистор со статической индукцией	83
4.3. МДП-транзистор	85
4.4. Разновидности полевых транзисторов	92
4.5. Прибор с зарядовой связью	94
Глава 5. Элементы интегральных схем	97
5.1. Классификация интегральных схем	97
5.2. Резисторы	99
5.3. Конденсаторы	102
5.4. Катушки индуктивности	104
5.5. Биполярные транзисторы	106
5.6. Диоды	111
5.7. Полевые транзисторы	114
5.8. Особенности функциональной электроники	116
5.9. Элементы акустоэлектроники	117
Глава 6. Усилительные каскады на транзисторах	121
6.1. Общие сведения	121
6.2. Основные параметры и характеристики	123
6.3. Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общим эмиттером (ОЭ)	126
6.4. Стабилизация режима покоя каскада на биполярном транзисторе	134
6.5. Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общей базой (ОБ)	137

6.6. Эмиттерный повторитель	139
6.7. Разновидности эмиттерных повторителей	142
6.8. Усилительный каскад на полевом транзисторе с общим истоком (ОИ)	144
6.9. Истоковый повторитель	149
6.10. Фазоинверсный и каскодный усилители	153
6.11. Усилители на биполярных и полевых транзисторах	155
Глава 7. Усилители с обратной связью	157
7.1. Общие сведения	157
7.2. Последовательная обратная связь по напряжению	159
7.3. Последовательная обратная связь по току	162
7.4. Усилители с последовательной ООС	163
7.5. Параллельная обратная связь по току	169
7.6. Параллельная обратная связь по напряжению	170
7.7. Усилители с параллельной ООС	171
7.8. Дополнительные сведения по обратным связям	175
Глава 8. Усилители мощности	177
8.1. Общие сведения	177
8.2. Классы усиления	178
8.3. Однотактные усилители мощности	180
8.4. Двухтактные усилители с трансформаторной связью	184
8.5. Бестрансформаторные усилители мощности	187
Глава 9. Усилители постоянного тока	192
9.1. Общие сведения	192
9.2. Дрейф нуля усилителя	192
9.3. Однотактные усилители прямого усиления	194
9.4. Усилители с преобразованием	197
9.5. Дифференциальные усилители	201
9.6. Схемы включения дифференциального усилителя	205
9.7. Коэффициент ослабления синфазного сигнала	208
9.8. Разновидности дифференциальных усилителей	210
9.9. Точностные параметры	212
Глава 10. Операционные усилители	215
10.1. Общие сведения	215
10.2. Основные параметры и характеристики	217
10.3. Инвертирующий усилитель	224
10.4. Неинвертирующий усилитель	229
10.5. Разновидности усилительных устройств на ОУ	232
10.6. Коррекция частотных характеристик	235
10.7. Управляемые источники на ОУ	238
Глава 11. Частотно-избирательные устройства	241
11.1. Общие сведения	241
11.2. Пассивные фильтры и их характеристики	241
11.3. Резонансные усилители	246
11.4. Активные фильтры	249
11.5. Гираторы	258
11.6. Генераторы синусоидальных колебаний	259
11.7. LC-генераторы	261
11.8. Кварцевые генераторы	263
11.9. RC-генераторы	266
Глава 12. Вторичные источники питания	269
12.1. Общие сведения	269
12.2. Структурные схемы	269
12.3. Выпрямители на диодах	271

12.4. Синхронные выпрямители	275
12.5. Сглаживающие фильтры	276
12.6. Стабилизаторы напряжения	279
12.7. Стабилизаторы тока	284
12.8. Устройства умножения напряжения	285
12.9. Преобразователи постоянного напряжения в переменное	287
12.10. Преобразователи постоянного напряжения	290
12.11. Особенности низковольтных выпрямителей	292
Глава 13. Транзисторные ключи	297
13.1. Общие сведения	297
13.2. Статический режим ключа на биполярном транзисторе	298
13.3. Динамический режим ключа на биполярном транзисторе	301
13.4. Способы повышения быстродействия	304
13.5. Помехоустойчивость ключей	308
13.6. Ключи на однотипных МДП-транзисторах	310
13.7. Ключи на комплементарных МДП-транзисторах	314
13.8. Ключи на МЕР-транзисторах	315
Глава 14. Логические элементы	316
14.1. Общие сведения	316
14.2. Основные логические функции	317
14.3. Транзисторная логика с непосредственными связями	318
14.4. Транзисторная логика с резистивно-емкостными связями	320
14.5. Диодно-транзисторная логика	321
14.6. Транзисторно-транзисторная логика	322
14.7. Транзисторная логика с эмиттерными связями	326
14.8. Интегральная инжекционная логика	329
14.9. МДП-транзисторная логика	332
14.10. Комплементарная МДП-транзисторная логика	334
14.11. Преобразователи уровней логических элементов	335
Глава 15. Элементы и устройства памяти	338
15.1. Общие сведения	338
15.2. Постоянные запоминающие устройства	338
15.3. Бистабильные ячейки	340
15.4. Триггеры	341
15.5. Динамические запоминающие элементы	346
15.6. Триггер Шмитта	348
Глава 16. Формирователи и генераторы импульсных сигналов	351
16.1. Прохождение импульса в RC-цепи	351
16.2. Ограничители амплитуды импульсов	354
16.3. Мультивибраторы	357
16.4. Одновибраторы	363
16.5. Блокинг-генераторы	366
16.6. Специализированные импульсные ИС	367
16.7. Генераторы линейно изменяющегося напряжения	369
Глава 17. Цифровые устройства	374
17.1. Общие сведения	374
17.2. Комбинационные цифровые устройства	375
17.3. Последовательные цифровые устройства	379
17.4. Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи	383
17.5. Микропроцессоры	386
Заключение	389
Библиографический список	390
Оглавление	391