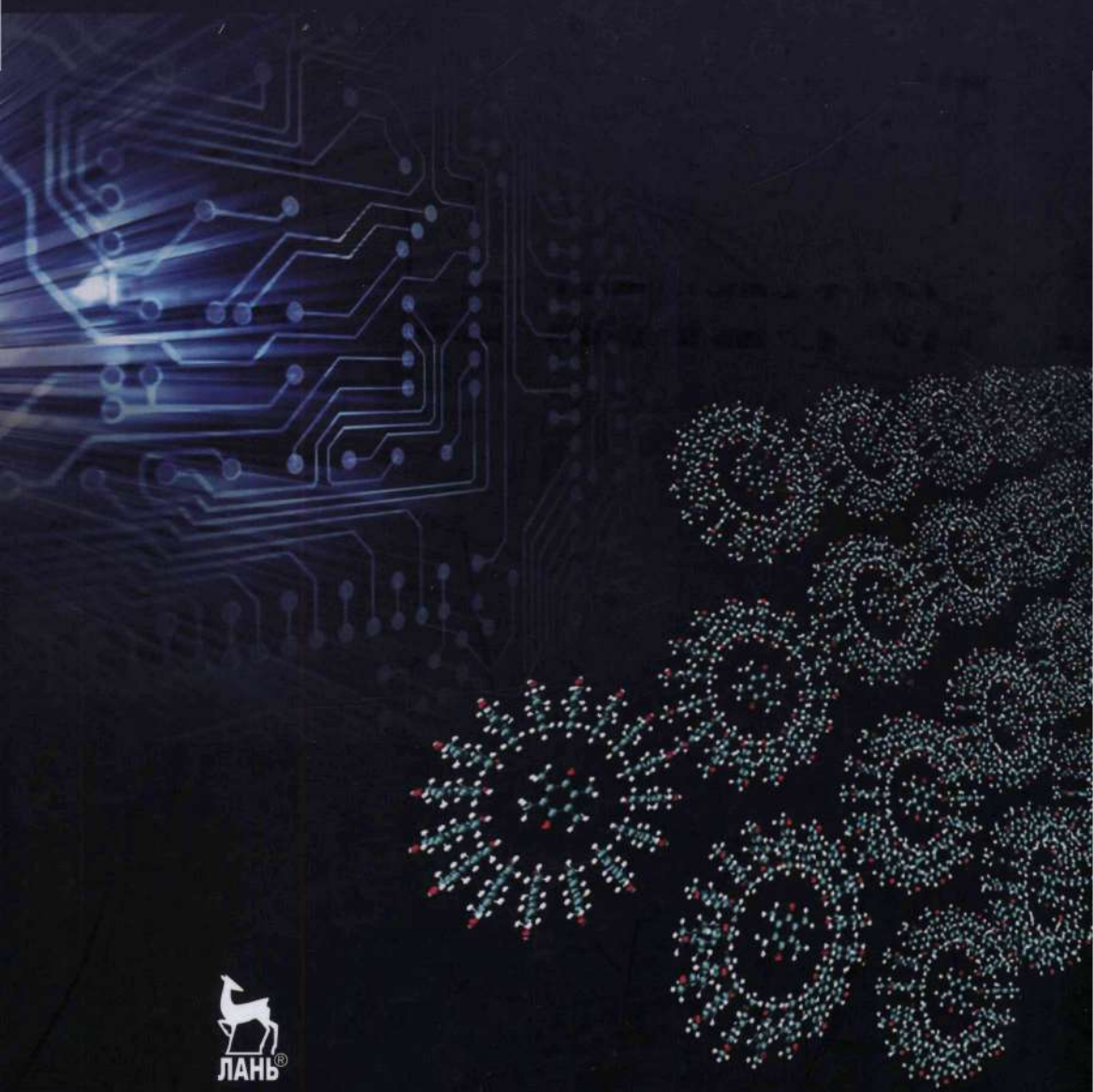


А. Н. Игнатов

Микросхемотехника и наноэлектроника



А. Н. ИГНАТОВ

МИКРОСХЕМОТЕХНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

РЕКОМЕНДОВАНО

*УМО по образованию в области телекоммуникаций
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки дипломированных специалистов
210400 — «Телекоммуникации»*



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР •
2011

ББК 32.844я73

И 26

Игнатов А. Н.

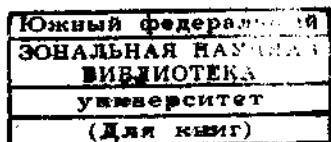
И 26 Микросхемотехника и наноэлектроника: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 528 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-1161-0

Изложены физические основы полупроводниковых электронных приборов. Рассмотрены основные типы радиокомпонентов, элементы и узлы аналоговых и цифровых микроэлектронных устройств и систем, интегральные схемы высоких степеней интеграции.

Показана целесообразность и возможности перехода от классической электроники к наноэлектронике. Проанализированы физические и технологические основы наноэлектроники, особенности наноэлектронных транзисторов, фотоприемников и лазеров, приборов на основе углеродных нанотрубок.

Издание предназначено для бакалавров по направлениям подготовки «Электроника и наноэлектроника» и «Радиотехника». Также может быть полезно инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием и эксплуатацией электронной аппаратуры с использованием микроэлектронной и наноэлектронной элементных баз.



ББК 32.844я73

И-13938

Рецензенты:

Х. К. АРИПОВ — проректор, зав. кафедрой «Электроника и схемотехника» Ташкентского университета информационных технологий;

В. А. МАРТЫНОВ — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теоретические основы электротехники и электротехнологии» Ивановского государственного энергетического университета;

А. В. МАКАРОВ — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и электротехнологии» Ивановского государственного энергетического университета.

Обложка

А. В. ПАНКЕВИЧ

*Охраняется Законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2011

© А. Н. Игнатов, 2011

© Издательство «Лань»,

художественное оформление, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
1. Введение в микросхемотехнику и нанозлектронику	7
1.1. Критерии качества электронной аппаратуры	7
1.2. Критерии оптимального проектирования	9
1.3. Методы анализа и синтеза электронных устройств	11
1.4. Классификация и система обозначений интегральных микросхем	14
1.5. Технологические основы микроэлектроники	15
1.5.1. Групповой метод изготовления электронных приборов	15
1.5.2. Планарная технология	16
1.5.3. Пленочная и гибридная технологии	16
1.5.4. Полупроводниковая технология	18
1.5.5. Процесс создания полупроводниковых слоев с заданным типом проводимости	21
1.6. Технологические основы нанозлектроники	24
1.6.1. Введение в литографию наноприборов	24
1.6.2. Литография экстремальным ультрафиолетом	26
1.6.3. Электронно-лучевая литография	27
1.6.4. Ионная литография	29
1.6.5. Рентгеновская литография	30
1.6.6. Нанопечатная литография	30
1.6.7. Литографически индуцированная самосборка наноструктур	31
1.6.8. Молекулярно-лучевая эпитаксия	32
1.7. Системы на кристалле, особенности реализации и перспективы применения	35
1.7.1. Введение	35
1.7.2. Особенности проектирования систем на кристалле	36
1.7.3. Возможности реализации систем на кристалле	37
1.7.4. Перспективы применения систем на кристалле	39
1.8. Выбор перспективных типов компонентов и технических решений с помощью ЭВМ	40
1.9. Проектирование систем на кристаллах на основе IP-библиотек	44
1.10. Элементная база для систем на кристаллах	47
1.11. Закон Мура и его применение в электронике	50
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	52
2. Элементы и узлы аналоговых устройств	53
2.1. Классификация аналоговых устройств	53
2.2. Биполярные транзисторы	53
2.2.1. Технологические типы биполярных транзисторов	55
2.3. Полевые транзисторы	64
2.3.1. Принцип действия полевых транзисторов	64
2.3.2. Статические характеристики полевых транзисторов	67
2.3.3. Параметры полевых транзисторов	70
2.3.4. Особенности реальных полевых транзисторов	72

2.3.5. Эквивалентные схемы полевых транзисторов	72
2.4. Свойства и применение транзисторов	73
2.4.1. Эксплуатационные параметры транзисторов	73
2.4.2. Работа транзисторов с нагрузкой	75
2.4.3. Усилительные свойства транзисторов	77
2.4.4. Частотные свойства транзисторов	79
2.4.5. Шумовые свойства усилительных приборов	81
2.5. Усилители	85
2.6. Интегральные операционные усилители	98
2.7. Микромощные операционные усилители	108
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	110
3. Элементы и узлы цифровых систем	111
3.1. Общие сведения	111
3.2. Основы алгебры логики	112
3.3. Характеристики и параметры цифровых устройств	113
3.4. Цифровые ключи на транзисторах	115
3.5. Электронные ключи на полевых транзисторах	123
3.6. Основные логические операции и элементы	127
3.7. Семейства цифровых интегральных схем	129
3.8. Сравнение параметров логических элементов основных семейств	137
3.9. Триггеры	138
3.9.1. RS-триггер	139
3.9.2. Интегральные триггеры	141
3.9.3. Квазистатические и динамические триггеры	142
3.10. Классификация цифровых устройств на интегральных схемах	143
3.11. Комбинационные устройства	145
3.11.1. Шифраторы и дешифраторы	146
3.11.2. Преобразователи кодов	147
3.11.3. Комбинационные сумматоры	147
3.12. Последовательностные устройства	148
3.12.1. Регистры	149
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	153
4. Микроэлектронные регуляторы уровней	156
4.1. Классификация электронных регуляторов	156
4.2. Способы электронной регулировки коэффициента передачи	158
4.3. Электронные регуляторы на полевых транзисторах	160
4.4. Усилители с автоматической регулировкой усиления	167
4.5. Авторегуляторы уровня	171
4.6. Программируемые цифровые устройства с автоматической регулировкой усиления	175
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	177
5. Микроэлектронные ключи и коммутаторы	178
5.1. Микроэлектронные ключи и коммутаторы для аппаратуры связи	178
5.1.1. Классификация ключей и коммутаторов	178
5.2. Электронные ключи аналоговых сигналов	184
5.2.1. Основные модели и типы ключей	184
5.2.2. Особенности работы транзисторов в ключевых схемах аналоговых сигналов	188
5.3. Нелинейные свойства электронных ключей на полевых транзисторах	189
5.4. Синтез блоков коммутации, коммутаторов и электронных коммутационных полей	192
5.4.1. Синтез электронных коммутационных полей методом наращивания функций	192
5.4.2. Синтез электронных коммутаторов	193
5.4.3. Синтез блоков коммутационных полей на основе мультиплексоров	195

5.4.4. Анализ вариантов коммутаторов	198
5.4.5. Анализ вариантов буферных усилителей	200
5.4.6. Управление ЭКП с энергонезависимой памятью	202
5.5. Базовые технические решения	
высококачественных узлов для систем коммутации	205
5.5.1. Т-образный ключ на полевых и биполярных транзисторах	205
5.5.2. Т-образный ключ на полевых транзисторах со стабилизатором в параллельном плече	206
5.5.3. Т-образный ключ на полевых транзисторах с тиристором в параллельном плече	206
5.5.4. Т-образный ключ на полевых транзисторах с операционным усилителем в поперечном плече	207
5.5.5. Т-образный ключ на полевых транзисторах со структурами МОП и с р-п-переходом	208
5.5.6. Высококачественные электронные ключи на основе ИМС	209
5.5.7. Высококачественный электронный ключ на полевых транзисторах с инверторами в цепи управления	211
5.5.8. Комбинированные высококачественные ключи	212
5.5.9. Высококачественный ключ на основе мостовой схемы	214
5.6. Технические решения высококачественных устройств коммутации ...	215
5.6.1. Высококачественные устройства коммутации для трактов звукового вещания	215
5.6.2. Широкополосные устройства коммутации на основе ИМС	216
5.6.3. Коммутатор на ПТ для системы передачи телеметрической информации	223
5.6.4. Высококачественные широкополосные мультиплексоры	224
5.6.5. Электронный ключ с термостабильным коэффициентом передачи	232
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>233</i>
6. Микроэлектронные фильтры и корректоры частотных характеристик	235
6.1. Классификация микроэлектронных фильтров	235
6.2. Активные RC-фильтры нижних и верхних частот	239
6.3. Активные полосовые и режекторные фильтры	241
6.3.1. Активные полосовые фильтры	241
6.3.2. Режекторные фильтры	243
6.4. Акустоэлектронные фильтры	244
6.4.1. Основные понятия	244
6.4.2. Принцип действия фильтров на ПАВ	245
6.4.3. Распространение волн в пьезоэлектрических подложках	247
6.5. Гираторные фильтры	249
6.6. Фильтры и интеграторы на переключаемых конденсаторах	251
6.7. Цифровые фильтры	254
6.8. Дискретно-аналоговые фильтры на основе ПЗС	255
6.9. Корректоры частотных характеристик	259
6.10. Фильтры для измерителей шумов трактов вещания	263
6.11. Устройство для всенаправленного приема радиосигналов магнитными антеннами	266
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>268</i>
7. Микроэлектронные генераторы для аппаратуры связи	269
7.1. Классификация генераторов и особенности интегральных микросхем для синтеза генераторов	269
7.2. Генераторы на основе интегральных операционных усилителей	273
7.3. Импульсные генераторы	275
7.4. Диапазонный генератор с АМ, широкополосной ЧМ и электронной перестройкой частоты	280
7.5. RC-генераторы на интегральных микросхемах	283
7.6. Расчет автогенератора с широкополосной частотной модуляцией	286
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>289</i>

8. Микроэлектронные преобразователи сигналов	290
8.1. Классификация преобразователей	290
8.2. Аналоговые перемножители сигналов	291
8.3. Микроэлектронные компараторы	296
8.4. Микроэлектронные выпрямители и стабилизаторы напряжения	297
8.5. Цифро-аналоговые преобразователи	299
8.6. Аналого-цифровые преобразователи	300
8.6.1. Общие сведения	300
8.6.2. Классификация АЦП	301
8.6.3. АЦП последовательного приближения в системах сбора данных	303
8.6.4. Сигма-дельта АЦП для высокоточных промышленных измерений и приборостроения	305
8.6.5. Сигма-дельта АЦП для оцифровки звука	308
8.6.6. Конвейерные АЦП для высокоскоростных устройств	308
8.7. АЦП с матрицей на МОП-транзисторах	312
8.8. Преобразователи на основе интегральных микросхем ФАПЧ	314
8.9. Нелинейные устройства	317
8.9.1. Диодные ограничители	317
8.9.2. Управляемые пороговые устройства и ограничители	319
8.9.3. Логарифматор и антилогарифматор	322
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	322
9. Интегральные микросхемы высоких степеней интеграции	324
9.1. Состояние и перспективы развития элементной базы электроники	324
9.2. Микропроцессоры	326
9.3. Упрощенные структуры микропроцессоров	328
9.4. Структура микроЭВМ	331
9.5. Особенности современных микропроцессоров	332
9.6. Виды запоминающих устройств	337
9.7. Оперативные запоминающие устройства	339
9.8. Постоянные запоминающие устройства	341
9.9. Репрограммируемые постоянные запоминающие устройства	342
9.10. Флэш-память	344
9.10.1. Виды флэш-памяти	344
9.10.2. Флэш-память с многоуровневым хранением заряда	346
9.10.3. Флэш-память с зеркальным битом	347
9.11. Кэш-память	347
9.12. Базовые матричные кристаллы	348
9.13. Программируемые логические интегральные схемы	353
9.14. Сверхвысокоскоростные АЦП для замены радиочастотных блоков радио- и ТВ-приемников	355
9.14.1. Применение сверхскоростных АЦП	355
9.14.2. Обзор стандартов DVB	357
9.14.3. DVB-приемник	358
9.15. Однокристалльные схемы управления микродисплеями	360
9.16. Перспективы развития микропроцессорной техники	363
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	365
10. Физические основы наноэлектроники	366
10.1. Общие сведения	366
10.2. Классификация низкоразмерных объектов	368
10.3. Изготовление и свойства квантовых ям, нитей, точек	370
10.4. Элементы зонной теории	374
10.5. Гетероструктуры и барьеры Шоттки	377
10.6. Электрофизические свойства наночастиц	381
10.7. Электрофизические свойства нанотрубок	383
10.8. Явление сверхпроводимости в наноматериалах	386
10.9. Оптические свойства наночастиц	387
10.10. Эффект резонансного туннелирования зарядов	389

10.11. Методы обеспечения высокой подвижности носителей заряда	391
10.12. Использование эффекта баллистического транспортирования носителей заряда	394
10.13. Основы одноэлектроники	395
10.13.1. Введение в одноэлектронику	395
10.13.2. Теоретические основы одноэлектроники	396
10.13.3. Кулоновская лестница	399
10.14. Введение в спинтронику	400
10.15. Закон масштабирования	403
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	404
11. Состояние и перспективы развития микро- и наноэлектромеханических систем ..	406
11.1. Общие сведения	406
11.2. Области применения МЭМС и НЭМС	407
11.3. Состояние и перспективы разработок МЭМС и НЭМС	413
11.4. Ключевые сегменты рынков МЭМС-компонентов	419
11.5. MEMS-ключи вместо транзисторов в дисплеях	421
11.6. Микроэлектромеханические коммутаторы	424
11.7. Мультиплексоры для волоконно-оптических систем передач с нанофотонными отражателями	427
11.8. Микроэлектромеханические устройства для систем связи	432
11.8.1. Схема системы связи	432
11.8.2. Компоненты монолитных СВЧ-микросхем	434
11.8.3. Микроантенны	435
11.9 МЭМС-микрофоны	437
11.10. Организация квантовых каналов связи	440
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	442
12. Нанoeлектронные приборы и системы	443
12.1. Общие сведения	443
12.2. Нанoeлектронные конденсаторы	444
12.3. Нанoeлектронные аккумуляторы энергии и топливные элементы	448
12.4. Нанoeлектронные диоды и транзисторы	451
12.4.1. Введение	451
12.4.2. Нанотранзисторы на основе структур кремния на сапфире	453
12.4.3. Нанотранзисторы с гетеропереходами	458
12.4.4. Спин-вентильные транзисторы	464
12.4.5. Нанодиоды и нанотранзисторы с резонансным туннелированием	467
12.4.6. Нанодиоды и нанотранзисторы на основе нанотрубок	469
12.5. Нанoeлектронные лазеры на основе квантовых ям	472
12.6. Нанoeлектронные фотоприемники	479
12.7. Квантовые компьютеры	484
12.7.1. Введение	484
12.7.2. Квантовые вычисления	486
12.7.3. Кубит	487
12.7.4. Структура квантового компьютера	488
12.7.5. Квантовый регистр	489
12.7.6. Квантовый процессор	490
12.7.7. Основные требования для реализации квантового компьютера ..	491
12.7.8. Практическая реализация квантового компьютера	491
12.7.9. Перспективы развития квантовых компьютеров	496
12.8. Молекулярные переключатели	497
12.9. Нанoeлектронные системы для беспроводной связи	498
12.10. Перспективы разработок нанoeлектронных систем	501
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	507
<i>Приложение 1. Перечень принятых обозначений</i>	508
<i>Приложение 2. Перечень принятых сокращений</i>	512
Список литературы	515