

**В. Н. ЛОЗОВСКИЙ,
Г. С. КОНСТАНТИНОВА,
С. В. ЛОЗОВСКИЙ**

НАНОТЕХНОЛОГИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

РЕКОМЕНДОВАНО

*Учебно-методическим объединением
вузов Российской Федерации по образованию
в области радиотехники, электроники,
биомедицинской техники и автоматизации
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности
210601 — «Нанотехнология
в электронике»*



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ · МОСКВА · КРАСНОДАР
2008**

Лозовский В. Н., **Константинова Г. С.**, Лозовский С. В.
Л 72 Нанотехнология в электронике. Введение в специальность: Учебное пособие. 2-е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2008. — 336 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-0827-6

Учебное пособие составлено в соответствии с Государственным образовательным стандартом (ГОСом) по специальности высшего профессионального образования «Нанотехнология в электронике». В нем рассматривается система современного высшего технического образования, особенности обучения в вузе, фундаментальные основы инженерной деятельности.

Данное пособие знакомит читателя с историческими этапами зарождения наноэлектроники, определяет роль микроэлектроники на современном этапе. Также приведены теоретические основы и особенности наноэлектроники, отражены особенности инструментального и технологического обеспечения ее развития. Рассматриваются достижения нанотехнологий в электронике, перспективы и тенденции ее дальнейшего развития.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальности «Нанотехнология в электронике».

ББК 32.85

Рецензент: д. ф.-м. н., проф. Л. С. ЛУНИН, кафедра общей и прикладной физики Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасский политехнический институт)

Обложка
А. Ю. ЛАПШИН

*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», 2008

© В. Н. Лозовский,
Г. С. Константинова,
С. В. Лозовский, 2008

© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	3
-------------------------	---

Введение	4
----------------	---

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ

1. Особенности высшего технического образования	8
1.1. Современная система высшего образования и его цели	8
1.2. Особенности обучения в вузе	11
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	12
2. Фундаментальные основы инженерной деятельности	13
2.1. Направления инженерной деятельности	13
2.2. Практическая деятельность человека и современное естествознание	17
2.3. Естественнонаучные основы практической деятельности человека	19
2.4. Эволюция Вселенной и общность законов природы	26
2.5. Деятельность инженера и реальность	33
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	40
3. Фундаментальные основы дисциплин учебного плана	42
3.1. Особенности государственного образовательного стандарта по направлению «Нанотехнология в электронике»	42
3.2. Естественнонаучные дисциплины	43
3.3. Общепрофессиональные дисциплины	46
3.4. Специальные дисциплины	49
3.5. Гуманитарные и социально-экономические дисциплины	51
3.6. Основные требования к подготовке современного инженера	54
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	56

**ЧАСТЬ ВТОРАЯ
ЭТАПЫ И ОСНОВЫ
РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ**

4. Элементы квантовой физики	58
4.1. Связь электроники и квантовой физики	58
4.2. Этапы развития электроники	59
4.3. Основные представления квантовой механики	63
4.4. Квантовая модель атома	68
4.5. Понятие о потенциальных ямах и барьерах	71
4.6. Микрочастица в прямоугольной потенциальной яме	73
4.7. Туннельный эффект	77
4.8. Энергетический спектр кристалла	78
4.9. Собственная электропроводность полупроводников	83
4.10. Примесная электропроводность полупроводников	86
4.11. Эффект компенсации примесных уровней	88
4.12. Энергетические зоны на границе дырочного и электронного полупроводников	89
4.13. Понятие эффективной массы электрона	91
4.14. Неравновесная электропроводность собственного полупроводника	93
4.15. Зависимость электропроводности полупроводников от температуры	95
4.16. Полупроводниковые материалы в твердотельной электронике	96
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	97
5. Полупроводниковые структуры	100
5.1. Роль полупроводниковых структур в микро- и оптоэлектронике	100
5.2. Электронно-дырочный переход и его свойства	101
5.3. Транзисторы	107
5.4. Элементы оптоэлектроники, Гетеропереходы	110
5.5. <i>p-n</i> -переход как схемный элемент ИМС	113
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	116

**ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ
НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

6. Предпосылки перехода от микро- к нанoeлектронике	118
6.1. Вводные замечания	118
6.2. Основные этапы технологии ИМС	118
6.3. Получение полупроводникового материала	119
6.4. Получение полупроводниковых пластин	120
6.5. Получение эпитаксиальных структур	121
6.6. Методы формирования элементов ИМС	123
6.7. Литография	126
6.8. О преемственности этапов развития электроники	128
6.9. Краткий обзор новой научной базы нанoeлектроники	134
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	142

7. Физические основы нанoeлектроники	143
7.1. Квантоворазмерные эффекты	143
7.2. Простейшие виды низкоразмерных объектов	145
7.2.1. Квантовая яма	145
7.2.2. Квантовая нить	146
7.2.3. Квантовая точка	146
7.3. Энергетический спектр электронов и плотность электронных состояний в низкоразмерных областях ..	147
7.3.1. Важнейшие квантовомеханические характеристики тел	147
7.3.2. Энергетический спектр 3D-электронного газа .	148
7.3.3. Энергетический спектр 2D-электронного газа .	149
7.3.4. Электронный газ в квантовой нити (1D-газ) ...	151
7.3.5. Электронный газ в квантовой точке (0D-газ) ..	152
7.3.6. 2D-электронный газ в магнитном поле	152
7.3.7. Примеры влияния кванторазмерных эффектов на свойства вещества	154
7.4. Резонансный туннельный эффект	159
7.4.1. Резонансное туннелирование	159
7.4.2. Резонансно-туннельный диод	161
7.5. Полупроводниковые сверхрешетки	163
7.5.1. Сверхрешетки	163
7.5.2. Энергетические диаграммы сверхрешеток ...	164
7.5.3. Энергетический спектр электронов в сверхрешетках	166
7.5.4. Свойства электронного газа в сверхрешетках ..	167
7.5.5. Устройства на основе сверхрешеток	167
7.6. Одноэлектронные устройства	174
7.6.1. Одноэлектронные приборы	174
7.6.2. Кулоновская блокада туннелирования	175
7.6.3. Кулоновская блокада в структурах с двумя туннельными переходами	177
7.6.4. Металлический одноэлектронный транзистор .	179
7.7. Некоторые явления и устройства спинтроники	181
7.7.1. Спинтроника	181
7.7.2. Гигантское магнитосопротивление	182
7.7.3. Туннельное магнитосопротивление	185
7.7.4. Полупроводниковая спинтроника	186
7.7.5. Спиновый полевой транзистор	187
7.7.6. Элементы памяти на магнитных моментах ядер	188
7.8. Некоторые устройства молекулярной электроники ...	188
7.8.1. Макромолекулярная электроника	188
7.8.2. Молекулярная электроника (молетроника) ...	190
7.8.3. Молекулы-проводники и молекулы-изоляторы	191
7.8.4. Молекулы-диоды	192
7.8.5. Молекулы-транзисторы	193
7.8.6. Молекулярные элементы памяти	194
7.8.7. Молекулярные интегральные микросхемы ...	195
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	197

8. Технические средства нанотехнологий	199
8.1. Два подхода к изготовлению структур в нанотехнологиях	199
8.2. Эпитаксиальные методы получения наноструктур	200
8.2.1. Молекулярно-лучевая эпитаксия	200
8.2.2. Формирование квантовых точек посредством самоорганизации при эпитаксии	210
8.2.3. Перспективы использования массивов квантовых точек в приборных структурах	215
8.3. Нанолитография	216
8.3.1. Общие замечания	216
8.3.2. Оптическая литография (фотолитография)	217
8.3.3. Электронно-лучевая литография	224
8.3.4. Рентгенолитография	232
8.3.5. Ионолитография	234
8.3.6. Импринт-литография	235
8.4. Зондовые нанотехнологии	240
8.4.1. Общие принципы сканирующей зондовой микроскопии	240
8.4.2. Сканирующий туннельный микроскоп	242
8.4.3. Применение СТМ для исследований	248
8.4.4. Нанотехнологии на основе СТМ	252
8.4.5. Сканирующий атомно-силовой микроскоп	257
8.4.6. Примеры применения АСМ для диагностики полупроводниковых структур	265
8.4.7. Нанолитография на основе АСМ	267
8.5. Углеродные нанотрубки	278
8.5.1. Форма и структура нанотрубок	279
8.5.2. Методы получения нанотрубок	282
8.5.3. Свойства нанотрубок	285
8.5.4. Неуглеродные нанотрубки	294
8.5.5. Перспективы применения нанотрубок в электронике	295
8.6. Формирование квантовых точек и проволок	303
8.7. Контакты к отдельным молекулам	305
8.8. Линейная мера для измерений с помощью электронных и атомно-силовых микроскопов	310
8.8.1. Назначение линейных мер	310
8.8.2. Линейная мера МШПС-2.0 К	311
8.8.3. Аттестация меры МШПС-2.0 К	313
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	314
Заключение	316
Литература	319
Предметный указатель	320