

НАНОЭЛЕКТРОНИКА ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

УЧЕБНИК

5-е издание, электронное

Утверждено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений
по специальностям
«Микро- и нанoeлектронные технологии и системы»,
«Квантовые информационные системы»,
«Нанотехнологии и наноматериалы
в электронике»



Москва
Лаборатория знаний
2020

УДК 621.382(075.8)

ББК 32.844.1

Б82

Серия основана в 2009 г.

Борисенко В. Е.

Б82 Нанoeлектроника: теория и практика : учебник / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, А. Л. Данилюк, Е. А. Уткина. — 5-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 369 с. — (Учебник для высшей школы). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-732-5

Подробно рассмотрены фундаментальные физические эффекты и электронные процессы, характерные для наноразмерных структур. Описаны принципы функционирования и типы нанoeлектронных приборов для обработки информации. Приведены нанотехнологические подходы, позволяющие формировать приборные структуры нанoeлектроники и спинтроники. Наряду с обновленным и расширенным теоретическим материалом предыдущего издания в данное издание включены практические задачи и контрольные вопросы для самопроверки, призванные закрепить изучаемый теоретический материал.

Для студентов, магистрантов и аспирантов, профессионально ориентированных на карьеру в области современной электроники и нанотехнологий.

УДК 621.382(075.8)

ББК 32.844.1

Деривативное издание на основе печатного аналога: Нанoeлектроника: теория и практика : учебник / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, А. Л. Данилюк, Е. А. Уткина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 366 с. : ил. — (Учебник для высшей школы). — ISBN 978-5-9963-1015-9.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации

ISBN 978-5-00101-732-5

© Лаборатория знаний, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБ АВТОРАХ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.	11
1.1. Фундаментальные явления в низкоразмерных структурах.	11
1.1.1. Квантовое ограничение	12
1.1.2. Баллистический транспорт носителей заряда	21
1.1.3. Туннелирование носителей заряда	27
1.1.4. Спиновые эффекты.	33
1.2. Элементы низкоразмерных структур	38
1.2.1. Свободная поверхность и межфазные границы.	38
1.2.2. Сверхрешетки	41
1.2.3. Моделирование атомных конфигураций.	45
1.3. Структуры с квантовым ограничением, создаваемым внутренним электрическим полем	51
1.3.1. Квантовые колодцы.	51
1.3.2. Модуляционно-легированные структуры	55
1.3.3. Дельта-легированные структуры.	57
1.4. Структуры с квантовым ограничением, создаваемым внешним электрическим полем	60
1.4.1. Структуры металл/диэлектрик/полупроводник	60
1.4.2. Структуры с расщепленным затвором	61
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР	64
2.1. Традиционные методы формирования пленок	67
2.1.1. Химическое осаждение из газовой фазы	67
2.1.2. Молекулярно-лучевая эпитаксия	81

2.1.3. Электрохимическое осаждение металлов и полупроводников	84
2.1.4. Электрохимическое оксидирование металлов и полупроводников	95
2.2. Методы, основанные на использовании сканирующих зондов	102
2.2.1. Физические основы	103
2.2.2. Атомная инженерия	106
2.2.3. Зондовые методы формирования наноструктур	112
2.3. Нанолитография	115
2.3.1. Электронно-лучевая литография	115
2.3.2. Зондовая нанолитография	120
2.3.3. Нанопечать	124
2.3.4. Сравнение нанолитографических методов	128
2.4. Саморегулирующиеся процессы	132
2.4.1. Самосборка	132
2.4.2. Самоорганизация в объемных материалах	136
2.4.3. Самоорганизация при эпитаксии.	141
2.4.4. Формирование пленок Ленгмюра—Блоджетт	151
2.5. Формирование и свойства наноструктурированных материалов	159
2.5.1. Пористый кремний	159
2.5.2. Пористый оксид алюминия	164
2.5.3. Пористые оксиды тугоплавких металлов	171
2.5.4. Углеродные наноструктуры	179
ГЛАВА 3. ПЕРЕНОС НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ	198
3.1. Транспорт носителей заряда вдоль потенциальных барьеров	198
3.1.1. Интерференция электронных волн	199
3.1.2. Вольтамперные характеристики низкоразмерных структур	203
3.1.3. Квантовый эффект Холла	210
3.1.4. Электронные приборы на основе интерференционных эффектов и баллистического транспорта носителей заряда	216
3.2. Туннелирование носителей заряда через потенциальные барьеры	226
3.2.1. Одноэлектронное туннелирование.	226

3.2.2. Приборы на основе одноэлектронного туннелирования	236
3.2.3. Резонансное туннелирование	255
3.2.4. Приборы на основе резонансного туннелирования	259
3.3. Спин-зависимый транспорт носителей заряда	267
3.3.1. Гигантское магнитосопротивление	269
3.3.2. Спин-контролируемое туннелирование	278
3.3.3. Управление спинами носителей заряда в полупроводниках.	284
3.3.4. Эффект Кондо	296
3.3.5. Спинтронные приборы	301
ПРАКТИКУМ	319
1. Низкоразмерные структуры	320
2. Квантовые колодцы	321
3. Самоорганизация	322
4. Проводимость низкоразмерных структур	323
5. Одноэлектронное туннелирование	324
6. Резонансное туннелирование	324
7. Гигантское магнитосопротивление	325
8. Спин-контролируемое туннелирование	326
ПРИЛОЖЕНИЯ	328
Нобелевские лауреаты: краткая история познания наномира	328
Словарь терминов	346
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	359
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	361