

УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Научная библиотека

БНТУ



# НАНОЭЛЕКТРОНИКА ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

2-е издание,  
переработанное и дополненное

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



Москва  
БИНОМ. Лаборатория знаний

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ОБ АВТОРАХ</b> . . . . .	6
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> . . . . .	8
<b>ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.</b> . . . . .	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
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР</b> . . . . .	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
<b>ПРАКТИКУМ . . . . .</b>	<b>319</b>
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
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ . . . . .</b>	<b>328</b>
Нобелевские лауреаты: краткая история познания наномира . . . . .	328
Словарь терминов . . . . .	346
<b>РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА . . . . .</b>	<b>359</b>
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ . . . . .</b>	<b>361</b>