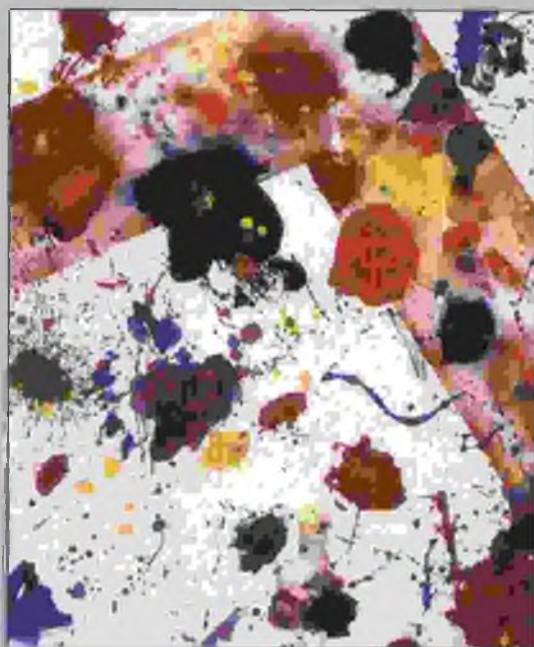


Новая  
Университетская  
Библиотека

В.П. Драгунов  
И.Г. Неизвестный  
В.А. Гридчин

# ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

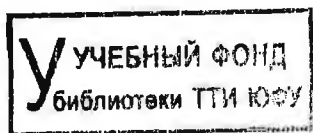
Каменистые тропы науки – это горы литературы,  
уступы книг, которые нужно прочесть, усвоить.  
Но книги – это путеводитель, по которому можно  
ориентироваться на дорогах науки.

*А.Я. Яншин, академик*

В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин

# ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Электроника и микроэлектроника», специальностям «Микроэлектроника и твердотельная электроника» и «Микросистемная техника»*



Москва • Логос • 2006

УДК 621.382.017.7(075.8)

ББК 32.85

Д72

*Издано при финансовой поддержке Федерального агентства  
по печати и массовым коммуникациям в рамках  
Федеральной целевой программы «Культура России»*

#### Рецензенты

*А.А. Орликовский*, доктор технических наук,  
профессор, член-корреспондент РАН

*А.А. Горбацевич*, доктор физико-математических наук, профессор

**Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А.**

Д72 Основы нанoeлектроники: Учебное пособие. – М.: Логос.

2006. – 496 с.

ISBN 5-98704-054-X

Излагаются основные вопросы физики систем пониженной размерности, рассматриваются особенности энергетического спектра и переноса частиц в многослойных структурах с резкими потенциальными границами. В отличие от первого издания (2004 г., НТГУ) дополнительно освещаются вопросы энергетического спектра низкоразмерных систем с цилиндрической и сферической симметрией, вопросы влияния электрического поля на энергетический спектр квантовых точек и транспорт частиц в двухбарьерных структурах, дробного квантового эффекта Холла и особенностей поведения электронов в квазидвумерных системах.

Для студентов высших учебных заведений, получающих образование по направлению «Электроника и микроэлектроника» и специальностям «Микроэлектроника и твердотельная электроника» и «Микросистемная техника». Представляет интерес для ученых и специалистов в области физики полупроводников и полупроводниковых приборов, физических основ нанoeлектроники.

ББК 32.85

ISBN 5-98704-054-X

© Драгунов В.П., Неизвестный И.Г.,  
Гридчин В.А., 2004, 2005

© «Новосибирский государственный  
технический университет», 2004, 2005

© «Логос», 2006

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения .....	9
Предисловие к первому изданию .....	10
Предисловие ко второму изданию .....	15
<b>Глава 1. Особенности энергетического спектра частиц в системах пониженной размерности .....</b>	<b>17</b>
1.1. Рассеяние частиц на потенциальной ступеньке .....	18
1.2. Потенциальный барьер конечной ширины .....	23
1.3. Интерференционные эффекты при надбарьерном пролете частиц .....	25
1.4. Частица в прямоугольной потенциальной яме .....	28
1.5. Особенности движения частиц над потенциальной ямой .....	37
1.6. Движение частицы в сферически симметричной прямоугольной потенциальной яме .....	39
1.7. Энергетический спектр и волновые функции линейного, плоского и сферического осциллятора .....	44
1.8. Энергетические состояния в прямоугольной квантовой яме сложной формы .....	49
1.9. Структура со сдвоенной квантовой ямой .....	56
1.10. Прохождение частиц через многобарьерные квантовые структуры .....	60
1.11. Энергетический спектр сверхрешеток .....	69
1.12. Классификация полупроводниковых сверхрешеток .....	74
1.13. Низкоразмерные системы с цилиндрической и сферической симметрией .....	88
Список литературы .....	95
<b>Глава 2. Влияние однородного электрического поля на энергетический спектр систем пониженной размерности .....</b>	<b>98</b>
2.1. Энергетический спектр бесконечной прямоугольной потенциальной ямы в однородном электрическом поле .....	98
2.2. Оценка смещения энергетических уровней под действием электрического поля в прямоугольной КЯ конечной глубины .....	103
2.3. Влияние однородного электрического поля на энергетический спектр параболической потенциальной ямы .....	106

2.4. Интерференционная передислокация электронной плотности в туннельно-связанных квантовых ямах .....	109
2.5. Потенциальная ступенька в однородном электрическом поле .....	114
2.6. Прохождение частиц через двухбарьерную структуру в электрическом поле.....	117
2.7. Влияние однородного электрического поля на двухэлектронные состояния в двойной квантовой точке .....	123
2.8. Энергетический спектр сверхрешетки из квантовых точек в постоянном электрическом поле .....	128
Список литературы .....	132
<b>Глава 3. Распределение квантовых состояний в системах пониженной размерности .....</b>	<b>134</b>
3.1. Особенности распределения плотности состояний в 2D-системах .....	134
3.2. Зависимость положения уровня Ферми от концентрации электронов и толщины пленки для 2D-систем .....	142
3.3. Распределение плотности состояний в квантовых проволоках и квантовых точках .....	146
3.4. Влияние дополнительного пространственного ограничения на энергетический спектр связанных состояний в одномерной $\delta$ -образной потенциальной яме .....	150
3.5. Энергетический спектр мелких примесных состояний в системах пониженной размерности .....	154
3.6. Влияние размерного квантования на состояния мелкого экситона .....	161
3.7. Энергетический спектр полупроводниковых пленок типа $n$ -GaAs .....	167
3.8. Энергетический спектр электронов в размерно-квантовых пленках Ge и Si .....	176
3.9. Энергетический спектр в полупроводниковых пленках с вырожденными зонами .....	181
3.10. Энергетический спектр в квантовой точке с параболическим удерживающим потенциалом .....	194
Список литературы .....	197
<b>Глава 4. Экранирование электрического поля в структурах пониженной размерности .....</b>	<b>200</b>
4.1. Приповерхностная область пространственного заряда .....	200
4.2. Уравнение Пуассона .....	206
4.3. Разновидности областей пространственного заряда .....	209
4.4. Решение уравнения Пуассона .....	213
4.5. Определение зависимости потенциала в области пространственного заряда от координаты .....	216
4.6. Поверхностное квантование .....	219
4.7. Экранирование электрического поля в 2D-системах .....	227

4.8. Особенности экранирования электрического поля в квантовых проволоках .....	232
Список литературы .....	235
<b>Глава 5. Квантовый эффект Холла в двумерном электронном газе</b> .....	237
5.1. Эксперименты с двумерным электронным газом .....	239
5.2. Энергетический спектр электронов в постоянном однородном магнитном поле .....	242
5.3. Проводимость двумерного электронного газа .....	251
5.4. Дробный квантовый эффект Холла .....	261
Список литературы .....	277
<b>Глава 6. Особенности фононного спектра в системах пониженной размерности</b> .....	278
6.1. Дисперсионные зависимости фононов в полупроводниковых сверхрешетках .....	278
6.2. Свертка ветвей акустических фононов .....	284
6.3. Локализация фононов .....	288
6.4. Интерфейсные фононы .....	291
Список литературы .....	296
<b>Глава 7. Транспортные явления</b> .....	297
7.1. Стационарная дрейфовая скорость .....	297
7.2. Всплеск во времени дрейфовой скорости при воздействии электрического поля .....	307
7.3. Баллистический транспорт в полупроводниках и субмикронных приборах .....	313
7.4. Подвижность электронов в системах с селективным легированием .....	321
7.5. Особенности электрон-фононного взаимодействия в системах пониженной размерности .....	329
7.6. Рассеяние электронов в 2D-системах .....	335
7.7. Особенности рассеяния квазидвумерных электронов в сверхрешетках .....	343
7.8. ТермоЭДС в квазидвумерных системах .....	348
7.9. Асимметричные наноструктуры в магнитном поле .....	351
7.10. Эффект Ааронова – Бома.....	363
Список литературы .....	367
<b>Глава 8. Туннелирование через квантово-размерные структуры</b> ...	371
8.1. Туннелирование через двухбарьерную структуру с квантовой ямой .....	371
8.2. Вольт-амперная характеристика многослойных структур .....	382
8.3. Экспериментальное исследование вольт-амперных характеристик двухбарьерных квантовых структур .....	385
8.4. Диапазон рабочих частот двухбарьерной квантовой структуры .....	394
Список литературы .....	410

Глава 9. Проблемы одноэлектроники .....	413
9.1. Теоретические основы одноэлектроники .....	414
9.2. Реализация одноэлектронных приборов .....	422
9.3. Применение одноэлектронных приборов .....	442
Список литературы .....	449
Глава 10. Тенденции создания нанотранзистора .....	453
Список литературы .....	471
Глава 11. Проблемы полупроводниковой элементной базы квантового компьютера .....	473
11.1. Общие сведения .....	473
11.2. Квантовый компьютер на ядерных спинах в кремнии .....	479
11.3. Квантовый компьютер на электронном спиновом резонансе в структурах Ge – Si .....	484
Список литературы .....	493