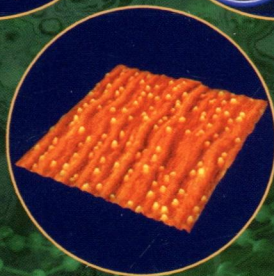
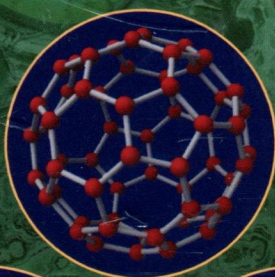
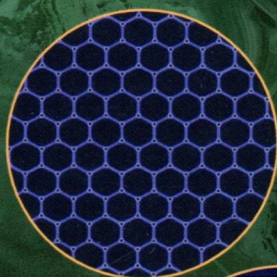


**В.А. Кульбачинский**

# **Физика НАНОСИСТЕМ**



В.А. Кульбачинский

# **ФИЗИКА НАНОСИСТЕМ**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2022

УДК 537.3, 537.6, 537.9  
ББК 22.334, 22.379  
К 90



*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 21-12-00001, не подлежит продаже*

Кульбачинский В. А. **Физика наносистем.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2022. — 768 с. — ISBN 978-5-9221-1913-9.

Представлены самые последние достижения в области физики наносистем, технологии получения и применения низкоразмерных структур. Излагаются теоретические и экспериментальные основы физики полупроводниковых наноструктур, сверхрешеток, низкоразмерных аллотропных модификаций углерода: графена, фуллерена, нанотрубок. Уделяется особое внимание топологическим эффектам в кристаллах, явлениям, связанным с поверхностными и краевыми состояниями в топологических изоляторах и вейловских металлах, квантовой нелокальности, квантовым и тепловым флуктуациям в сверхпроводящих системах мезоскопических размеров. Рассматриваются целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла, спинтроника, магноника, спиновая калоритроника. Предложены новые концептуальные подходы и экспериментальные методы, а также оригинальные объяснения, опирающиеся на исследования, выполненные автором.

Предназначается специалистам в области физики наносистем, физики конденсированного состояния, физики низких температур и сверхпроводимости. Детальное рассмотрение физических основ обсуждаемых явлений и свойств обходится без использования специальных методов теоретической физики, что делает изложение доступным для широкого круга профессиональных читателей. Будет полезна научным сотрудникам, аспирантам и студентам, а также всем, интересующимся последними открытиями и достижениями в этих областях.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	15
<b>Глава 1. Размерное квантование . . . . .</b>	<b>17</b>
§ 1.1. Размерное квантование энергии электронов . . . . .	17
1.1.1. Уравнение Шредингера, волновая функция частицы . . . . .	17
1.1.2. Одномерное движение частицы в интервале длиной $L$ . . . . .	18
1.1.3. Бесконечно глубокая потенциальная яма . . . . .	19
1.1.4. Прямоугольная потенциальная яма . . . . .	20
§ 1.2. Плотность электронных состояний . . . . .	23
1.2.1. Трехмерные электронные системы . . . . .	23
1.2.2. Двумерные электронные системы . . . . .	25
1.2.3. Одномерные электронные системы . . . . .	26
1.2.4. Нульмерные электронные системы . . . . .	27
1.2.5. Системы с произвольным законом дисперсии . . . . .	28
§ 1.3. Размерное квантование энергии электрона в тонкой пленке . . . . .	29
1.3.1. Лестница подзон . . . . .	29
1.3.2. Квантовые размерные осцилляции . . . . .	31
1.3.3. Переход металл–диэлектрик при уменьшении размеров кристалла . . . . .	32
1.3.4. Распределение электронов в $p$ -пространстве при размерном квантовании . . . . .	34
§ 1.4. Модель Кронига–Пенни . . . . .	35
Список литературы к главе 1 . . . . .	39
<b>Глава 2. Создание двумерных структур. Гетероструктуры . . . . .</b>	<b>41</b>
§ 2.1. Физическое осаждение из газовой фазы . . . . .	41
2.1.1. Термическое испарение . . . . .	41
2.1.2. Напыление . . . . .	42
§ 2.2. Молекулярно-лучевая эпитаксия . . . . .	43
2.2.1. Установка для молекулярно-лучевой эпитаксии . . . . .	44
2.2.2. Методы контроля и анализа в молекулярно-лучевой эпитаксии . . . . .	47
2.2.3. Режимы роста . . . . .	49
§ 2.3. Газофазная эпитаксия . . . . .	50
2.3.1. Условия роста . . . . .	50
2.3.2. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений . . . . .	52
2.3.3. Примеры процессов . . . . .	54
§ 2.4. Атомно-слоевое осаждение . . . . .	55
2.4.1. Основы метода атомно-слоевой эпитаксии . . . . .	56
2.4.2. Возможности метода атомно-слоевой эпитаксии . . . . .	58
2.4.3. Области применения . . . . .	59

§ 2.5. Жидкофазная эпитаксия . . . . .	60
2.5.1. Пленки Ленгмюра–Блоджетт . . . . .	60
2.5.1. Золь-гель процесс получения пленок . . . . .	61
§ 2.6. Схема образования двумерных электронов . . . . .	63
2.6.1. Гетерограницы различного типа . . . . .	63
2.6.2. Гетероструктуры . . . . .	66
2.6.3. Гетероструктурные квантовые ямы, морфология . . . . .	67
2.6.4. Типы легирования квантовых ям и гетероструктур . . . . .	70
2.6.5. Легирование сверхрешеток . . . . .	73
§ 2.7. Ван-дер-ваальсовы гетероструктуры . . . . .	74
2.7.1. Двумерные материалы . . . . .	74
2.7.2. Полевой транзистор на основе дихалькогенида переходного металла . . . . .	77
2.7.3. Ван-дер-ваальсовы гетероструктуры . . . . .	78
2.7.4. Планарные гетероструктуры из графена и дихалькогенида переходного металла . . . . .	79
2.7.5. Вертикальные гетероструктуры из графена и дихалькогенида переходного металла . . . . .	82
2.7.6. Вертикальные диодные гетероструктуры из дихалькогенидов переходных металлов без графена . . . . .	88
Список литературы к главе 2 . . . . .	89
<b>Глава 3. Инверсионные слои, дельта-слои . . . . .</b>	<b>92</b>
§ 3.1. Инверсионные слои в кремниевых структурах . . . . .	92
3.1.1. История исследования инверсионных слоев . . . . .	92
§ 3.2. Структура подзон размерного квантования в инверсионном слое кремния и гетеропереходе в арсениде галлия . . . . .	94
3.2.1. Структура подзон размерного квантования в инверсионном слое кремния . . . . .	94
3.2.2. Структура подзон размерного квантования в гетеропереходе в арсениде галлия . . . . .	96
§ 3.3. Потенциальная энергия электронов в инверсионном слое, приближение треугольного потенциала . . . . .	98
3.3.1. Потенциальная энергия электрона в инверсионном слое . . . . .	98
3.3.2. Решение уравнения Шредингера для треугольной квантовой ямы . . . . .	100
§ 3.4. Размерное квантование в дельта-слоях . . . . .	102
3.4.1. Энергетический спектр электронов в $\delta$ -слое . . . . .	102
3.4.2. Распределение донорной примеси при $\delta$ -легировании . . . . .	106
3.4.3. $DX$ -центры . . . . .	112
3.4.4. Практическое применение дельта-слоев . . . . .	114
Список литературы к главе 3 . . . . .	115
<b>Глава 4. Свойства двумерных электронов. Экранирование, плазмоны . . . . .</b>	<b>117</b>
§ 4.1. Экранирование . . . . .	117
4.1.1. Трехмерный случай . . . . .	117
4.1.2. Идеальный двумерный случай . . . . .	119
4.1.3. Квазидвумерный случай . . . . .	120



§ 4.2. Плазмоны . . . . .	122
4.2.1. Трехмерный случай . . . . .	122
4.2.2. Плазмоны в двумерных структурах . . . . .	124
4.2.3. Магнетоплазмоны . . . . .	125
Список литературы к главе 4 . . . . .	128
<b>Глава 5. Квантовые осцилляционные эффекты. Квантовые поправки к проводимости.</b> . . . .	129
§ 5.1. Квантование, эффект Шубникова–де Гааза . . . . .	129
5.1.1. Квантование энергетического спектра электронов в магнитном поле . . . . .	129
5.1.2. Плотность электронных состояний в магнитном поле . . . . .	135
5.1.3. Эффект Шубникова–де Гааза в трехмерных системах . . . . .	136
5.1.4. Экспериментальное определение эффективной массы электронов . . . . .	138
5.1.5. Определение транспортной и квантовой подвижностей в подзонах размерного квантования . . . . .	142
5.1.2. Осцилляции магнетосопротивления в параллельном магнитном поле . . . . .	152
5.1.3. Особенности эффекта Шубникова–де Гааза в двумерных системах . . . . .	157
5.1.4. Особенности амплитуды осцилляций магнетосопротивления в двумерных системах . . . . .	160
§ 5.2. Расчет энергетического спектра электронов в квантовых ямах. Межподзонаное и внутривидное рассеяние . . . . .	163
5.2.1. Самосогласованный расчет системы уравнений Шредингера и Пуассона . . . . .	163
5.2.2. Учет непараболичности зоны проводимости GaAs . . . . .	169
5.2.3. Расчет подвижности носителей заряда. Межподзонаное и внутривидное рассеяние . . . . .	171
5.2.4. Особенности расчетов в дельта-слоях . . . . .	173
5.2.5. Определение концентраций и подвижностей носителей заряда методом спектра подвижности . . . . .	174
5.2.6. Ограничение подвижности электронов в узких квантовых ямах при рассеянии на латеральных шероховатостях . . . . .	177
§ 5.3. Квантовые поправки к проводимости . . . . .	180
5.3.1. Понятие о размерности проводника, характерные масштабы . . . . .	180
5.3.2. Слабая локализация . . . . .	182
5.3.3. Температурная зависимость проводимости . . . . .	183
5.3.4. Влияние магнитного поля на квантовые поправки к проводимости . . . . .	186
Список литературы к главе 5 . . . . .	188
<b>Глава 6. Квантовый эффект Холла.</b> . . . .	191
§ 6.1. Целочисленный квантовый эффект Холла . . . . .	191
6.1.1. Открытие квантового эффекта Холла . . . . .	191
6.1.2. Соотношение между тензорами проводимости и сопротивления при квантовом эффекте Холла . . . . .	192

§ 6.2. Распределение тока и потенциала в двумерной системе при квантовом эффекте Холла . . . . .	195
6.2.1. Распределение тока и потенциала . . . . .	195
6.2.2. Диск Корбино . . . . .	196
6.2.3. Роль краевых состояний в квантовом эффекте Холла . . . . .	197
§ 6.3. Метрологические применения квантового эффекта Холла . . . . .	199
6.3.1. Определение величины постоянной тонкой структуры . . . . .	199
6.3.2. Эталон сопротивления . . . . .	200
§ 6.4. Дробный квантовый эффект Холла . . . . .	201
6.4.1. Открытие дробного квантового эффекта Холла . . . . .	201
6.4.2. Причины возникновения дробного квантования . . . . .	207
6.4.3. Композитные квазичастицы . . . . .	209
§ 6.5. Динамический квантовый эффект Холла, дрейфовый резонанс	215
Список литературы к главе 6 . . . . .	219
<b>Глава 7. Квантовые ямы со вставками . . . . .</b>	<b>220</b>
§ 7.1. Квантовые ямы с туннельно-прозрачным барьером . . . . .	220
7.1.1. Влияние тонкого барьера в квантовой яме на зонную структуру и волновую функцию электрона . . . . .	220
7.1.2. Рассеяние электронов в квантовых ямах со вставкой на оптических фонах . . . . .	222
7.1.3. Квантовые ямы с многими барьерами . . . . .	231
§ 7.2. Квантовые ямы с узкими вставками более глубокой ямы . . . . .	233
7.2.1. Влияние вставки одиночной узкой более глубокой квантовой ямы на зонную структуру, волновые функции и подвижности электронов в квантовой яме . . . . .	233
7.2.2. Влияние вставки двух узких более глубоких квантовых ям на зонную структуру, волновые функции и подвижности электронов . . . . .	235
§ 7.3. Квантовые ямы с множественными вставками более глубоких ям (короткопериодные сверхрешетки) . . . . .	236
Список литературы к главе 7 . . . . .	240
<b>Глава 8. Полупроводниковые сверхрешетки . . . . .</b>	<b>242</b>
§ 8.1. Понятие о сверхрешетках. Энергетический спектр сверхрешеток, минизоны . . . . .	242
8.1.1. Композиционные сверхрешетки типа I и II . . . . .	242
8.1.2. Легированные сверхрешетки . . . . .	245
§ 8.2. Оптические свойства сверхрешеток . . . . .	248
8.2.1. Внутризонные переходы . . . . .	248
8.2.1. Межзонные переходы . . . . .	249
§ 8.3. Электропроводность сверхрешеток. Отрицательная дифференциальная проводимость . . . . .	250
8.3.1. Электропроводность композиционных сверхрешеток . . . . .	250
8.3.2. Электропроводность легированных сверхрешеток . . . . .	252
§ 8.4. Влияние деформаций на энергетический спектр сверхрешеток . . . . .	253
8.4.1. Теория упругости . . . . .	253
8.4.2. Деформации в кубической решетке . . . . .	255
8.4.3. Деформационные потенциалы . . . . .	257

8.4.4. Напряженные квантовые ямы . . . . .	259
8.4.5. Напряженные сверхрешетки при отсутствии внутреннего пьезоэффекта . . . . .	259
8.4.6. Напряженные сверхрешетки при учете внутреннего пьезоэффекта . . . . .	260
8.4.7. Влияние одноосных деформаций на энергетический спектр сверхрешеток . . . . .	261
Список литературы к главе 8 . . . . .	264
<b>Глава 9. Квантовые одномерные структуры . . . . .</b>	<b>265</b>
§9.1. Методы формирования квантовых одномерных структур . . . . .	265
9.1.1. Расщепленный затвор . . . . .	265
9.1.2. Использование вицинальных поверхностей . . . . .	266
9.1.3. Использование сегрегации олова на вицинальных гранях GaAs . . . . .	267
9.1.4. Рост на профилированной поверхности . . . . .	270
9.1.5. Спонтанный рост через испарение или диссоциацию с последующей конденсацией . . . . .	272
9.1.6. Рекристаллизация под давлением . . . . .	275
9.1.7. Рост нанокристалла из пара (или раствора) через жидкую фазу с катализатором . . . . .	275
9.1.8. Использование матриц для роста . . . . .	277
9.1.9. Электрохимическое осаждение . . . . .	277
9.1.10. Электрофорез . . . . .	277
9.1.11. Изменение состава наностержней с помощью химических реакций . . . . .	278
9.1.12. Рост в постоянном электрическом поле — электроспиннинг . . . . .	279
9.1.13. Нанолитография . . . . .	279
9.1.14. Молекулярно-лучевая эпитаксия . . . . .	281
§9.2. Квантование энергии в узких двумерных проводниках при отсутствии магнитного поля. Поперечные моды . . . . .	283
§9.3. Квантование энергии электронов в узких двумерных проводниках в магнитном поле . . . . .	285
9.3.1. Скорость и координата электрона в одномерном проводнике . . . . .	286
§9.4. Баллистический транспорт, сопротивление баллистического проводника . . . . .	287
§9.5. Новые физические свойства квантовых одномерных проводников . . . . .	290
Список литературы к главе 9 . . . . .	292
<b>Глава 10. Квантовые точки . . . . .</b>	<b>294</b>
§10.1. Методы получения нанокристаллов . . . . .	294
10.1.1. Квантовые точки . . . . .	294
10.1.2. Синтез изолированных наночастиц . . . . .	294
10.1.3. Коллоидные квантовые точки . . . . .	298
§10.2. Массивы квантовых точек на подложке . . . . .	299
10.2.1. Нанолитография . . . . .	299
10.2.2. Эпитаксиальный рост квантовых точек с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии . . . . .	300



10.2.3. Упорядоченная ориентация квантовых точек на подложке	303
10.2.4. Упругие напряжения в квантовых точках на подложках	308
§ 10.3. Квантовые точки — искусственные атомы. Особенности квантования энергетического спектра электронов в квантовых точках	309
10.3.1. Размерное квантование в квантовой точке	309
10.3.2. Туннелирование электронов через квантовую точку. Кулоновская блокада	314
§ 10.4. Оптические свойства квантовых точек	320
§ 10.5. Осцилляции Вейса в планарных слоях квантовых точек	322
§ 10.6. Практические применения квантовых точек	324
Список литературы к главе 10	330
<b>Глава 11. Экситоны</b>	332
§ 11.1. Экситоны Френкеля и Ванье–Мотта	332
11.1.1. Экситоны Френкеля	332
11.1.2. Экситоны Ванье–Мотта	334
11.1.3. Прямые экситоны	335
11.1.4. Непрямые экситоны	337
§ 11.2. Экситоны в двумерных и одномерных системах	338
11.2.1. Экситоны в 2D-структурах	339
11.2.2. Экситоны в 1D-структурах	342
Список литературы к главе 11	344
<b>Глава 12. Разбавленные магнитные полупроводники на основе квантоворазмерных гетероструктур и наноструктур. Спинтроника</b>	345
§ 12.1. Магнитные примеси в полупроводниках	345
12.1.1. Разбавленные магнитные полупроводники	345
12.1.2. Спиновое стекло	347
12.1.3. Ферромагнетизм	350
§ 12.2. Аномальный эффект Холла	355
12.2.1. Аномальный эффект Холла	355
12.2.2. Фаза Берри	357
12.2.3. Асимметричное рассеяние	360
12.2.4. Боковое смещение	362
12.2.5. Соотношение разных механизмов аномального эффекта Холла	363
12.2.6. Аномальный эффект Холла в условиях прыжковой проводимости	364
§ 12.3. Разбавленные магнитные полупроводники на основе квантоворазмерных гетероструктур и наноструктур	366
12.3.1. Ферромагнетизм в разбавленных магнитных полупроводниках $p$ -типа $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ , $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ . Управление электрическим полем	366
12.3.2. Термодинамика свободных носителей заряда в легированных марганцем структурах с квантовой ямой $\text{GaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$	369
12.3.3. Флуктуационный потенциал в квантовых ямах $\text{GaAs}/\text{In}_{0,17}\text{Ga}_{0,83}\text{As}/\text{GaAs}$ , легированных Mn	384

12.3.4. Особенности явлений переноса в слое квантовых точек InAs с магнитной примесью в структуре GaAs . . . . .	386
12.3.5. Экспериментальное наблюдение фазы Берри . . . . .	388
§ 12.4. Применение разбавленных магнитных полупроводников. Спинтроника . . . . .	393
12.4.1. Гигантское магнетосопротивление . . . . .	393
12.4.2. Полуметаллические ферромагнетики . . . . .	398
Список литературы к главе 12 . . . . .	400
<b>Глава 13. Спиновый эффект Холла. Двумерные топологические изоляторы . . . . .</b>	<b>402</b>
§ 13.1. Спиновый эффект Холла . . . . .	402
13.1.1. Механизмы возникновения спинового эффекта Холла . . . . .	402
13.1.2. Механизмы возникновения спинового эффекта Холла . . . . .	404
13.1.3. Экспериментальное наблюдение спинового эффекта Холла . . . . .	409
§ 13.2. Квантовый спиновый эффект Холла . . . . .	415
13.2.1. 2D топологические изоляторы . . . . .	415
13.2.2. Число Черна . . . . .	417
13.2.3. Квантовый спиновый эффект Холла . . . . .	418
13.2.4. $Z_2$ -топологический инвариант в 2D-системах . . . . .	419
§ 13.3. Двумерные топологические изоляторы . . . . .	421
13.3.1. Краевые состояния в двумерных системах . . . . .	421
13.3.2. Основные свойства квантовых ям (Hg, Cd)Te . . . . .	424
13.3.3. Квантовый спиновый эффект Холла в (Hg, Cd)Te . . . . .	427
Список литературы к главе 13 . . . . .	429
<b>Глава 14. Кристаллические решетки. Симметрия. Квазикристаллы . . . . .</b>	<b>431</b>
§ 14.1. Кристаллические решетки Браве . . . . .	431
14.1.1. Основные понятия, элементы симметрии . . . . .	431
14.1.2. 2D кристаллические решетки и их симметрия . . . . .	434
14.1.3. Двумерные точечные группы и пространственные группы . . . . .	436
§ 14.2. Трехмерные решетки Браве . . . . .	438
14.2.1. Элементарные ячейки трехмерных решеток Браве . . . . .	438
14.2.2. Ячейка Вигнера–Зейтца . . . . .	439
§ 14.3. Квазикристаллы . . . . .	440
14.3.1. Открытие квазикристаллов . . . . .	440
14.3.2. Структура решетки квазикристаллов . . . . .	442
§ 14.4. Электрофизические свойства квазикристаллов . . . . .	447
14.4.1. Структура решетки квазикристаллов . . . . .	447
14.4.2. Электронный транспорт . . . . .	449
14.4.3. Сверхпроводимость . . . . .	450
14.4.4. Магнетизм . . . . .	451
14.4.5. Теплопроводность . . . . .	452
14.4.6. Механические свойства . . . . .	453
Список литературы к главе 14 . . . . .	454

Глава 15. <b>Графен</b> . . . . .	456
§ 15.1. Структура графена . . . . .	456
§ 15.2. Энергетический спектр графена . . . . .	459
15.2.1. Энергетический спектр графена . . . . .	459
15.2.2. Экспериментальное подтверждение линейности энергетического спектра . . . . .	463
15.2.3. Эффективная масса . . . . .	464
15.2.4. Плотность состояний . . . . .	465
§ 15.3. Хиральность и парадокс Клейна, проводимость графена . . . . .	466
15.3.1. Области с различным типом проводимости в графене . . . . .	466
15.3.2. Проводимость, локализация носителей заряда . . . . .	468
§ 15.4. Квантовый эффект Холла в графене . . . . .	471
§ 15.5. Двойной графеновый слой . . . . .	473
15.5.1. Квантовый эффект Холла в двойном графеновом слое . . . . .	473
15.5.2. Два графеновых слоя, разделенные диэлектриком . . . . .	476
§ 15.6. Графан . . . . .	481
Список литературы к главе 15 . . . . .	482
Глава 16. <b>Интеркалированные соединения графита</b> . . . . .	484
§ 16.1. Графит . . . . .	484
16.1.1. История графита . . . . .	484
16.1.2. Структура и энергетический спектр графита . . . . .	485
§ 16.2. Интеркалированные соединения графита . . . . .	489
16.2.1. Синтез интеркалированных соединений графита . . . . .	489
16.2.2. Энергетический спектр ИСГ первой и второй ступеней . . . . .	492
16.2.3. Энергетический спектр ИСГ третьей ступени . . . . .	493
§ 16.3. Одномерные сверхрешетки интеркалированного графита низких ступеней . . . . .	495
§ 16.4. Двумерные сверхрешетки в интеркалированных соединениях графита . . . . .	499
§ 16.5. Суперметаллическая проводимость интеркалированных соединений графита акцепторного типа . . . . .	501
§ 16.6. Фазовые переходы типа двумерного плавления и «порядок–беспорядок» . . . . .	502
§ 16.7. Магнетосопротивление двумерных и квазидвумерных систем в слабых магнитных полях . . . . .	504
16.7.1. Зависимость магнетосопротивления в слабых магнитных полях от направления магнитного поля <b>B</b> относительно слоев . . . . .	504
16.7.2. Двумерный случай . . . . .	505
16.7.3. Квазидвумерный случай . . . . .	506
§ 16.8. Сверхпроводимость соединений внедрения в графит . . . . .	508
Список литературы к главе 16 . . . . .	512
Глава 17. <b>Фуллерены, фуллериты и фуллериды</b> . . . . .	514
§ 17.1. Фуллерены . . . . .	514
17.1.1. Молекула фуллерена . . . . .	514
17.1.2. Синтез фуллеренов . . . . .	516
17.1.3. Фуллерит . . . . .	518

§ 17.2. Фуллерид. Структура фуллеридов. Гетерофуллериды . . . . .	519
17.2.1. Газофазный метод синтеза . . . . .	520
17.2.2. Синтез из амальгам . . . . .	520
17.2.3. Синтез из галлам . . . . .	521
17.2.4. Синтез в среде органического растворителя . . . . .	521
17.2.5. Синтез с аммонийными основаниями в среде органиче- ского растворителя . . . . .	522
17.2.6. Структура фуллеридов. . . . .	523
§ 17.3. Электронные свойства и сверхпроводимость фуллеридов . . . . .	526
17.3.1. Электронная структура фуллерена . . . . .	526
17.3.2. Электронные свойства фуллеридов . . . . .	528
17.3.3. Сверхпроводимость гетерофуллеридов . . . . .	532
17.3.4. Проявление металлических свойств аммония в сверхпро- водимости фуллеридов. . . . .	535
17.3.5. Сверхпроводящие свойства фуллеридов с тетраалкилам- мониевыми основаниями . . . . .	537
17.3.6. Изотопический эффект в фуллеридах с аммонийными основаниями . . . . .	538
17.3.7. Параметры сверхпроводящих фуллеридов, критические магнитные поля . . . . .	539
17.3.8. Сверхпроводимость фуллеридов с ОЦК и ромбоэдриче- ской решетками . . . . .	542
§ 17.4. Комбинационное рассеяние света, электронный парамагнитный резонанс и магнитные свойства фуллеридов . . . . .	544
17.4.1. Комбинационное рассеяние света . . . . .	544
17.4.2. Электронный парамагнитный резонанс . . . . .	549
17.4.3. Особенности ЭПР-спектров гетерофуллеридов на осно- ве Cs . . . . .	552
17.4.4. Ферромагнитный резонанс и магнитные свойства фулле- ридов с железом. . . . .	553
§ 17.5. Эндоэдральные фуллерены . . . . .	555
§ 17.6. Функционализация фуллеренов . . . . .	558
17.6.1. Реакционная способность $C_{60}$ . . . . .	558
17.6.2. Фуллеренолы. . . . .	561
17.6.2. Фуллерены и фуллеренолы в водных системах . . . . .	563
Список литературы к главе 17 . . . . .	565
<b>Глава 18. Углеродные и полупроводниковые нанотрубки . . . . .</b>	<b>567</b>
§ 18.1. Углеродные нанотрубки. . . . .	567
18.1.1. Классификация нанотрубок, хиральность . . . . .	567
§ 18.2. Зона Бриллюэна, зонная структура. . . . .	571
18.2.1. Зона Бриллюэна . . . . .	571
18.2.2. Зонная структура одностенных углеродных нанотрубок . . . . .	573
18.2.3. Зонная структура одностенной углеродной трубки типа кресло . . . . .	574
18.2.4. Зонная структура одностенной углеродной трубки типа зигзаг . . . . .	576

§ 18.3. Плотность состояний . . . . .	578
18.3.1. Плотность состояний зигзагообразной нанотрубки . . . . .	579
18.3.2. Плотность состояний креслообразной нанотрубки . . . . .	581
18.3.3. Плотность состояний хиральной нанотрубки . . . . .	582
18.3.4. Эффективная масса носителей заряда . . . . .	583
§ 18.4. Получение углеродных нанотрубок . . . . .	584
18.4.1. Электродуговой метод . . . . .	584
18.4.2. Метод лазерного испарения . . . . .	585
18.4.3. Метод химического осаждения из газовой фазы . . . . .	585
§ 18.5. Неуглеродные нанотрубки . . . . .	588
18.5.1. Полупроводниковые нанотрубки . . . . .	588
18.5.2. Нанотрубки из нитрида бора . . . . .	590
§ 18.6. Упругие свойства нанотрубок . . . . .	591
§ 18.7. Электрические свойства . . . . .	593
18.7.1. Эмиссионные свойства . . . . .	593
18.7.2. Механические колебания углеродной нанотрубки в переменном электрическом поле и их влияние на эмиссионные характеристики. Демодуляция высокочастотного сигнала . . . . .	597
18.7.3. Катоды для дисплеев и рентгеновских трубок . . . . .	600
18.7.4. Сверхпроводимость . . . . .	601
18.7.5. Электронные приборы . . . . .	605
18.7.6. Квантовые флуктуации проводимости, эффект Ааронова–Бома . . . . .	608
§ 18.8. Химическая модификация . . . . .	609
18.8.1. Способы модификации нанотрубок . . . . .	609
18.8.2. Возможные применения нанотрубок . . . . .	612
Список литературы к главе 18 . . . . .	613
<b>Глава 19. Сканирующая зондовая микроскопия . . . . .</b>	<b>615</b>
§ 19.1. Сканирующая зондовая микроскопия . . . . .	615
19.1.1. Сканирующая туннельная микроскопия . . . . .	615
19.1.2. Контактная атомно-силовая микроскопия . . . . .	618
19.1.3. Принцип работы контактной силовой микроскопии пьезоотклика . . . . .	620
19.1.4. Прыжковая атомно-силовая микроскопия . . . . .	621
§ 19.2. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия . . . . .	626
Список литературы к главе 19 . . . . .	631
<b>Глава 20. Мезоскопическая физика. Флуктуации в сверхпроводящих наноструктурах . . . . .</b>	<b>633</b>
§ 20.1. Мезоскопическая физика . . . . .	633
20.1.1. Мезоскопическая флуктуация . . . . .	633
20.1.2. Самоусреднение . . . . .	634
20.1.3. Отрицательное магнетосопротивление . . . . .	635
§ 20.2. Эффект Ааронова–Бома . . . . .	636
20.2.1. Осцилляции кондактанса в кольце . . . . .	636
20.2.2. Осцилляции кондактанса в цилиндре . . . . .	638
§ 20.3. Флуктуации магнетосопротивления и тока . . . . .	639

§20.4. Квантовый эффект Холла . . . . .	641
§20.5. Мезоскопическая физика сверхпроводников . . . . .	641
20.5.1. Квантовая нелокальность в сверхпроводящих наноструктурах . . . . .	642
20.5.2. Тепловые и квантовые флуктуации в квазиодномерных сверхпроводящих каналах . . . . .	650
20.5.3. Кулоновская блокада в сверхтонких сверхпроводящих наноструктурах. Квантовый эталон тока . . . . .	661
Список литературы к главе 20 . . . . .	673
<b>Глава 21. Топологические изоляторы . . . . .</b>	<b>675</b>
§21.1. Топологические изоляторы. . . . .	675
21.1.1. Что такое топологический изолятор. . . . .	675
21.1.2. Поляризация . . . . .	678
21.1.3. Топологические изоляторы $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . . . . .	680
21.1.4. Легирование магнитной примесью . . . . .	682
§21.2. Топологические кристаллические изоляторы . . . . .	685
§21.3. Вейлевские полуметаллы. . . . .	688
21.3.1. Объемные свойства вейлевских полуметаллов. . . . .	688
21.3.2. Поверхностные состояния . . . . .	690
21.3.3. Вейлевский полуметалл арсенид тантала . . . . .	692
§21.4. 3D топологические изоляторы, сплавы $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ . . . . .	694
21.4.1. Энергетический спектр поверхностных состояний в полупроводниках типа $\text{Bi}$ , $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ . . . . .	694
21.4.2. Граничное условие для анизотропного уравнения Дирака в ограниченном пространстве . . . . .	697
21.4.3. Материалы $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ . . . . .	699
Список литературы к главе 21 . . . . .	702
<b>Глава 22. Термоэлектрические явления в наноструктурах . . . . .</b>	<b>704</b>
§22.1. Термоэлектрические явления, термоэлектрическая эффективность . . . . .	704
22.1.1. Эффект Зеебека, эффект Пельтье и эффект Томсона . . . . .	704
22.1.2. Термоэлементы . . . . .	707
22.1.3. Примесные зоны в полупроводниках $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ и $\text{PbTe}$ и их влияние на термоэлектрические свойства . . . . .	708
§22.2. Термоэлектрические свойства наноструктур . . . . .	710
22.2.1. Сверхрешетки . . . . .	710
22.2.2. Сегментация термоэлемента . . . . .	711
22.2.3. Особенности наноструктур . . . . .	711
22.2.4. 3D-структуры . . . . .	713
22.2.5. 2D-структуры . . . . .	714
22.2.6. 1D-структуры . . . . .	716
22.2.7. 1D-термоэлектрик $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . . . . .	717
22.2.8. Наноструктурированные поликристаллические материалы . . . . .	719
§22.3. Нанокompозиты . . . . .	720
22.3.1. Нанокompозиты с $ZT > 1$ . . . . .	720
22.3.2. Решеточная теплопроводность . . . . .	721



22.3.3. Наноконпозиты с проводящими частицами . . . . .	724
22.3.4. Наноконпозиты с диэлектриками . . . . .	724
22.3.5. Наноконпозиты из двух термоэлектриков . . . . .	725
22.3.6. Термоэлектрические свойства наноконпозитов $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ с графитом . . . . .	726
§ 22.4. Спиновые эффекты Зеебека и Пельтье. Калоритроника . . . . .	727
22.4.1. Введение . . . . .	727
22.4.2. Природа спинового эффекта Зеебека . . . . .	728
22.4.3. Прямой и инверсный спиновые эффекты Холла, спиновый угол Холла . . . . .	730
22.4.4. Взаимосвязь спинового эффекта Зеебека и инверсионно- го спинового эффекта Холла . . . . .	732
22.4.5. Тепловой спиновый транспорт, длина спиновой диф- фузии . . . . .	735
22.4.6. Термоэлектрические модули на основе спинового эффекта Зеебека . . . . .	740
22.4.7. Магنونная термоЭДС . . . . .	741
22.4.8. Спиновый эффект Пельтье. Калоритроника . . . . .	744
Список литературы к главе 22 . . . . .	746
<b>Глава 23. Квазидвумерные и квазиодномерные электронные си- стемы . . . . .</b>	<b>748</b>
§ 23.1. Волны зарядовой плотности. Переход Пайерлса . . . . .	748
23.1.1. Переход Пайерлса . . . . .	748
23.1.2. Соизмеримые и несоизмеримые сверхрешетки . . . . .	749
§ 23.2. Квазидвумерные диэлектриды переходных металлов . . . . .	750
§ 23.3. Двумерные свойства слоистых полупроводников $\text{A}^3\text{B}^6$ . . . . .	752
§ 23.4. Слоистые полупроводники $\text{A}_2^5\text{B}_3^6$ . Аналог квантового эффекта Холла . . . . .	753
§ 23.5. Квазиодномерные электронные системы. . . . .	758
Список литературы к главе 23 . . . . .	762
Список сокращений . . . . .	763
Предметный указатель . . . . .	765