

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 11 |
| Структура книги | 15 |
| Глава 1. Мезоскопическая физика и нанотехнологии | 17 |
| 1.1. Содержание книги..... | 17 |
| 1.2. Основные тенденции развития нано- и оптоэлектроники..... | 18 |
| 1.3. Характеристические длины в мезоскопических системах..... | 26 |
| 1.4. Квантово-механическая когерентность..... | 31 |
| 1.5. Квантовые ямы, проволоки и точки..... | 32 |
| 1.6. Плотность состояний и размерность системы..... | 33 |
| 1.7. Полупроводниковые гетероструктуры..... | 36 |
| 1.8. Квантовые процессы переноса..... | 38 |
| Литература..... | 39 |
| Дополнительная литература..... | 39 |
| Задачи и упражнения..... | 40 |
| Глава 2. Введение в физику твердого тела | 43 |
| 2.1. Введение..... | 43 |
| 2.2. Краткие сведения из квантовой механики..... | 45 |
| 2.2.1. Корпускулярно-волновой дуализм и принцип Гейзенберга..... | 45 |
| 2.2.2. Уравнение Шрёдингера..... | 47 |
| 2.2.3. Распределения Ферми — Дирака и Бозе — Эйнштейна..... | 50 |
| 2.2.4. Методы теории возмущений..... | 52 |
| 2.3. Модель свободных электронов в твердых телах. Функция плотности состояний..... | 54 |
| 2.4. Теорема Блоха..... | 58 |
| 2.5. Электроны в кристаллических твердых телах..... | 60 |
| 2.5.1. Модель почти свободных электронов..... | 60 |
| 2.5.2. Приближение сильной связи..... | 62 |
| 2.6. Динамика электронов в энергетических зонах..... | 65 |
| 2.6.1. Уравнение движения..... | 65 |
| 2.6.2. Эффективная масса..... | 67 |
| 2.6.3. Дырки..... | 70 |

| | |
|---|------------|
| 2.7. Колебания решетки..... | 71 |
| 2.7.1. Одномерная решетка..... | 72 |
| 2.7.2. Трехмерная решетка..... | 77 |
| 2.8. Фононы..... | 78 |
| Литература..... | 79 |
| Дополнительная литература..... | 80 |
| Задачи и упражнения..... | 80 |
| Глава 3. Общие сведения из физики полупроводников..... | 83 |
| 3.1. Введение..... | 83 |
| 3.2. Энергетические зоны электронов в типичных полупроводниках..... | 84 |
| 3.3. Собственные и примесные полупроводники..... | 87 |
| 3.4. Концентрации электронов и дырок в полупроводниках..... | 92 |
| 3.5. Элементарные процессы переноса в полупроводниках..... | 98 |
| 3.5.1. Движение носителей заряда в электрическом поле. Подвижность зарядов..... | 99 |
| 3.5.2. Диффузионная проводимость..... | 101 |
| 3.5.3. Уравнения непрерывности. Время жизни носителей и длина диффузии..... | 102 |
| 3.6. Вырожденные полупроводники..... | 107 |
| 3.7. Оптические свойства полупроводников..... | 108 |
| 3.7.1. Оптические процессы в полупроводниках..... | 108 |
| 3.7.2. Межзонное поглощение..... | 110 |
| 3.7.3. Экситонные эффекты..... | 113 |
| 3.7.4. Спектр излучения..... | 117 |
| 3.7.5. Стимулированное излучение..... | 119 |
| Литература..... | 122 |
| Дополнительная литература..... | 122 |
| Задачи и упражнения..... | 123 |
| Глава 4. Физика полупроводников с пониженной размерностью..... | 126 |
| 4.1. Введение..... | 126 |
| 4.2. Основные характеристики двумерных полупроводниковых наноструктур..... | 127 |
| 4.3. Прямоугольная потенциальная яма конечной глубины..... | 134 |

| | |
|--|-----|
| 4.4. Параболическая и треугольная квантовые ямы..... | 136 |
| 4.4.1. Параболическая потенциальная яма..... | 136 |
| 4.4.2. Треугольная потенциальная яма..... | 137 |
| 4.5. Квантовые проволоки..... | 139 |
| 4.6. Квантовые точки..... | 142 |
| 4.7. Напряженные слои..... | 144 |
| 4.8. Влияние напряжений на валентную зону..... | 146 |
| 4.9. Зонная структура в квантовых ямах..... | 150 |
| 4.10. Экситонные эффекты в квантовых ямах..... | 152 |
| Литература..... | 156 |
| Дополнительная литература..... | 156 |
| Задачи и упражнения..... | 157 |

Глава 5. Полупроводниковые квантовые наноструктуры

| | |
|---|------------|
| и сверхрешетки..... | 160 |
| 5.1. Введение..... | 160 |
| 5.2. Структуры полевых МОП-транзисторов (MOSFET)..... | 161 |
| 5.3. Гетеропереходы..... | 166 |
| 5.3.1. Гетеропереходы с модулированным легированием..... | 166 |
| 5.3.2. Напряженные гетероструктуры на основе SiGe..... | 170 |
| 5.4. Квантовые ямы..... | 172 |
| 5.4.1. Модулированно-легированные квантовые ямы..... | 172 |
| 5.4.2. Множественные квантовые ямы (MQW)..... | 174 |
| 5.5. Сверхрешетки..... | 177 |
| 5.5.1. Концепция сверхрешеток..... | 177 |
| 5.5.2. Модель сверхрешетки Кронига — Пенни. Расщепление зон..... | 178 |
| 5.5.3. Приближение сильной связи в теории сверхрешеток..... | 184 |
| 5.5.4. Сверхрешетки типа <i>nipi</i> | 187 |
| Литература..... | 189 |
| Дополнительная литература..... | 190 |
| Задачи и упражнения..... | 190 |

Глава 6. Процессы переноса в наноструктурах

| | |
|-----------------------------------|------------|
| в электрических полях..... | 192 |
| 6.1. Введение..... | 192 |

| | |
|--|-----|
| 6.2. Продольный перенос..... | 193 |
| 6.2.1. Механизмы рассеяния электронов..... | 193 |
| 6.2.2. Экспериментальные данные по продольному переносу..... | 197 |
| 6.2.3. Продольный перенос горячих электронов..... | 200 |
| 6.3. Поперечный перенос..... | 203 |
| 6.3.1. Резонансное туннелирование..... | 204 |
| 6.3.2. Влияние поперечных электрических полей на свойства сверхрешеток..... | 206 |
| 6.4. Квантовый перенос в наноструктурах..... | 212 |
| 6.4.1. Квантовая проводимость. Формула Ландауэра..... | 213 |
| 6.4.2. Формула Ландауэра — Бюттикера для квантового переноса в многозондовых структурах..... | 218 |
| 6.4.3. Кулоновская блокада..... | 220 |
| Литература..... | 224 |
| Дополнительная литература..... | 225 |
| Задачи и упражнения..... | 225 |

Глава 7. Перенос в магнитных полях

| | |
|---|------------|
| и квантовый эффект Холла..... | 229 |
| 7.1. Введение..... | 229 |
| 7.2. Воздействие магнитного поля на кристаллы..... | 231 |
| 7.3. Поведение систем пониженной размерности в магнитных полях..... | 233 |
| 7.4. Плотность состояний двумерных систем в магнитных полях..... | 234 |
| 7.5. Эффект Аронова — Бома..... | 236 |
| 7.6. Эффект Шубникова — де Гааза..... | 239 |
| 7.7. Квантовый эффект Холла..... | 242 |
| 7.7.1. Экспериментальные данные и элементарная теория целочисленного квантового эффекта Холла (IQHE)..... | 242 |
| 7.7.2. Краевые состояния и IQHE..... | 244 |
| 7.7.3. Протяженные и локализованные состояния..... | 247 |
| 7.7.4. Использование квантового эффекта Холла (IQHE) в метрологии..... | 249 |
| 7.7.5. Дробный квантовый эффект Холла (FQHE)..... | 251 |
| Литература..... | 254 |

| | |
|---|------------|
| Дополнительная литература..... | 255 |
| Задачи и упражнения..... | 255 |
| Глава 8. Оптические и электрооптические процессы в квантовых гетероструктурах..... | 258 |
| 8.1. Введение..... | 258 |
| 8.2. Оптические свойства квантовых ям и сверхрешеток..... | 259 |
| 8.3. Оптические характеристики квантовых точек и нанокристаллов..... | 265 |
| 8.3.1. Методы выращивания кристаллов. Самоорганизация квантовых точек..... | 265 |
| 8.3.2. Оптические свойства..... | 268 |
| 8.4. Электрооптические эффекты в квантовых точках. Эффект квантово-размерный Штарка..... | 277 |
| 8.5. Электрооптические эффекты в сверхрешетках. Лестницы Штарка и осцилляции Блоха..... | 282 |
| Литература..... | 288 |
| Дополнительная литература..... | 289 |
| Задачи и упражнения..... | 289 |
| Глава 9. Электронные приборы на наноструктурах..... | 292 |
| 9.1. Введение..... | 292 |
| 9.2. Модуляционно-легированные полевые транзисторы (MODFET)..... | 295 |
| 9.3. Биполярные транзисторы на гетеропереходах..... | 298 |
| 9.4. Резонансный туннельный эффект..... | 302 |
| 9.5. Транзисторы на горячих электронах..... | 307 |
| 9.6. Транзисторы с резонансным туннелированием..... | 311 |
| 9.7. Одноэлектронные транзисторы..... | 314 |
| Литература..... | 319 |
| Дополнительная литература..... | 319 |
| Задачи и упражнения..... | 319 |
| Глава 10. Оптоэлектронные устройства на основе наноструктур..... | 322 |
| 10.1. Введение..... | 322 |
| 10.2. Лазеры на полупроводниковых гетероструктурах..... | 323 |
| 10.3. Лазеры на полупроводниковых квантовых ямах..... | 327 |
| 10.4. Поверхностные лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL)..... | 332 |

| | |
|--|------------|
| 10.5. Лазеры на напряженных структурах с квантовыми ямами | 335 |
| 10.6. Лазеры на квантовых точках | 338 |
| 10.7. Фотодетекторы на квантовых ямах и сверхрешетках | 343 |
| 10.7.1. Фотодетекторы на подзонах квантовых ям | 343 |
| 10.7.2. Лавинные фотодетекторы на сверхрешетках | 345 |
| 10.8. Модуляторы на квантовых ямах | 346 |
| Литература | 349 |
| Дополнительная литература | 350 |
| Задачи и упражнения | 350 |
| Глава 11. Дополнение | 353 |