

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Е. А. КРАСНОПЕВЦЕВ

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
В ПРИЛОЖЕНИЯХ К ФИЗИКЕ
ТВЕРДОГО ТЕЛА

НОВОСИБИРСК
2010

УДК 530.145.6(075.8)

К 782

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор *А.А. Величко*;
д-р физ.-мат. наук, доцент *В.А. Гайслер*;
д-р физ.-мат. наук, профессор *В.Г. Дубровский*

Работа подготовлена на кафедре
полупроводниковых приборов и микроэлектроники НГТУ
для студентов РЭФ

Краснопевцев Е. А.

К 782 Квантовая механика в приложениях к физике твердого тела : учебное пособие / Е.А. Краснопевцев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 355 с. (Серия «Учебники НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1464-4

Изложены физические и математические основы квантовой механики и их применение в физике твердого тела, в полупроводниковых структурах. Приводятся примеры, иллюстрирующие теоретические положения, и задачи для самостоятельной работы. Издание предназначено для студентов инженерно-технических специальностей, приступающих к изучению микро- и нанoeлектроники.

УДК 530.145.6(075.8)

ISBN 978-5-7782-1464-4

© Краснопевцев Е.А., 2010

© Новосибирский государственный
технический университет, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|------------|
| Введение | 7 |
| Глава 1. ПОЛУКЛАССИЧЕСКАЯ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА | 9 |
| 1.1. Волновые свойства света..... | 9 |
| 1.2. Корпускулярные свойства света | 12 |
| 1.3. Волна де Бройля | 14 |
| 1.4. Квантование Бора–Зоммерфельда | 16 |
| 1.5. Заряд в магнитном поле..... | 17 |
| Примеры 1..... | 24 |
| Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ..... | 31 |
| 2.1. Волновая функция..... | 31 |
| 2.2. Операторы..... | 32 |
| 2.3. Собственные функции и собственные значения оператора | 34 |
| 2.4. Эрмитовость оператора | 36 |
| 2.5. Условие ортонормированности. Среднее значение | 39 |
| 2.6. Соотношение неопределенностей | 42 |
| 2.7. Унитарный оператор. Операторы трансляции и эволюции | 46 |
| 2.8. Уравнение Шрёдингера | 49 |
| 2.9. Быстрота изменения величины | 53 |
| 2.10. Ток вероятности..... | 55 |
| 2.11. Матрица плотности..... | 59 |
| Примеры 2..... | 63 |
| Задачи 1 | 79 |
| Глава 3. ОДНОМЕРНЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ ЗАДАЧИ | 83 |
| 3.1. Одномерные стационарные состояния..... | 83 |
| 3.2. Граничные условия для прямоугольных потенциалов | 88 |
| 3.3. Потенциальная яма | 91 |
| Примеры 3..... | 94 |
| 3.4. Линейный гармонический осциллятор | 112 |
| 3.5. Квазиклассическое квантование ВКБ | 120 |
| 3.6. Одномерное рассеяние | 125 |
| 3.7. Туннельный эффект | 127 |
| Примеры 4..... | 130 |
| 3.8. Электрон в периодической структуре..... | 145 |
| 3.9. Локализация Андерсона | 158 |
| 3.10. Уровни Тамма..... | 161 |
| Задачи 2 | 163 |
| Глава 4. МОМЕНТ ИМПУЛЬСА | 167 |
| 4.1. Операторы момента импульса | 168 |
| 4.2. Сферическая функция..... | 170 |
| 4.3. Момент импульса и оператор Лапласа в f -мерном пространстве..... | 174 |
| Примеры 5..... | 178 |
| Задачи 3 | 181 |

| | |
|--|-----|
| Глава 5. ЦЕНТРАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫЕ И ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ СИСТЕМЫ | 183 |
| 5.1. Уравнение Шрёдингера в сферических координатах | 184 |
| 5.2. Уравнение Шрёдингера в цилиндрических координатах | 188 |
| 5.3. Водородоподобный атом | 190 |
| Примеры 6. | 197 |
| Глава 6. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ | 213 |
| 6.1. Стационарное возмущение невырожденных состояний | 213 |
| Примеры 7. | 218 |
| 6.2. Стационарное возмущение вырожденных состояний | 225 |
| 6.3. Зависящее от времени возмущение | 229 |
| Примеры 8. | 236 |
| 6.4. Вариационный метод | 240 |
| Примеры 9. | 243 |
| Глава 7. ЗАРЯЖЕННАЯ ЧАСТИЦА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ | 249 |
| 7.1. Градиентное преобразование | 249 |
| 7.2. Квантовая частица и электромагнитное поле | 252 |
| 7.3. Уровни Ландау | 256 |
| 7.4. Эффект Ааронова–Бома | 261 |
| 7.5. Квантование электромагнитного излучения | 266 |
| Примеры 10. | 271 |
| Глава 8. СПИН ЭЛЕКТРОНА | 287 |
| 8.1. Операторы спина и спиноры | 288 |
| Примеры 11. | 294 |
| 8.2. Уравнение Паули | 304 |
| 8.3. Тожественность микрочастиц и принцип Паули | 311 |
| 8.4. Обменное взаимодействие | 315 |
| Задачи 4. | 319 |
| Глава 9. УРАВНЕНИЕ ДИРАКА–ВЕЙЛЯ. ГРАФЕН | 323 |
| 9.1. Получение и свойства графена | 323 |
| 9.2. Уравнение Дирака–Вейля | 328 |
| 9.3. Графен в магнитном поле | 336 |
| 9.4. Эффект Клейна | 338 |
| 9.5. Графеновые наноленты | 341 |
| Приложения | 345 |
| 1. Физические постоянные | 345 |
| 2. Интегралы | 346 |
| 3. Дифференциальное уравнение обобщенного гипергеометрического типа | 348 |
| 4. Ортогональные полиномы | 349 |
| Библиографический список | 351 |
| Предметный указатель | 353 |