

Ашкрофт Н., Мермин Н.

Физика твердого тела (в двух томах), том 2

Учебное пособие по физике

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 53
ББК 22.3
А98

А98 **Ашкрофт Н.**
Физика твердого тела (в двух томах), том 2: Учебное пособие по физике /
Ашкрофт Н., Мермин Н. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 486 с.

ISBN 978-5-458-33039-8

Настоящая книга - подробный курс физики твердого тела, составленный авторами, в течение многих лет читающими курс лекций по этому предмету в Корнеллском университете (США). Книга написана с большим педагогическим мастерством, тщательно продуманы выбор и расположение материала, иллюстрации, задачи. Она представляет собой ценное пособие для читателей с различным кругом интересов и разной степенью подготовки; при этом путеводной нитью могут служить приводимые авторами рекомендации о последовательности чтения глав. Первый том содержит 1-18 главы и связанные с ними по смыслу приложения А-Л. В томе изложена классическая и квантовая теории свободных электронов; рассматриваются более точные приближения: почти свободных электронов и сильной связи. Много внимания уделяется периодическим структурам, описываются зонная структура металлов и методы определения поверхности Ферми. Во втором томе рассматриваются классическая и квантовая теории гармонического кристалла, ангармонические приближение, полупроводники, магнитные явления и теория сверхпроводимости. Книга адресована студентам, аспирантам, изучающим и ведущим физику твердого тела.

ISBN 978-5-458-33039-8

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Следствия дипольного взаимодействия. Размагничивающие факторы	337
Задачи	337
Литература	338
Глава 34. Сверхпроводимость	340
Критическая температура	342
Незатухающие токи	344
Термоэлектрические свойства	344
Магнитные свойства. Идеальный диамагнетизм	345
Магнитные свойства. Критическое поле	346
Теплоемкость	348
Другие проявления существования энергетической щели	349
Уравнение Лондонов	351
Микроскопическая теория. Качественные черты	353
Количественные результаты элементарной микроскопической теории	357
Микроскопическая теория и эффект Мейснера	361
Теория Гинзбурга — Ландау	362
Квантование потока	363
Микроскопическая теория и незатухающие токи	364
Сверхпроводящее туннелирование. Эффекты Джозефсона	365
Задачи	368
Литература	369
Приложения	371
М. Квантовая теория гармонического кристалла	371
Литература	374
Н. Сохранение квазиймпульса	375
Вывод закона сохранения	376
Применения	378
Литература	380
О. Теория рассеяния нейтронов в кристалле	381
Рассмотрение рассеяния рентгеновских лучей	385
Литература	386
П. Ангармонические члены и п-фононные процессы	387
Р. Вычисление g-фактора Ланде	388
Важнейшие таблицы	389
Предметный указатель	392

Том 1
ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора перевода	5
Список основных монографий и курсов по физике твердого тела	7
Предисловие авторов к русскому изданию	9
Предисловие	10
Как пользоваться книгой	14

Глава 1. Теория металлов Друде	17
Основные предположения модели Друде	18
Статическая электропроводность металла	22
Эффект Холла и магнетосопротивление	27
Высокочастотная электропроводность металла	31
Теплопроводность металла	35
Задачи	40
Литература	42
Глава 2. Теория металлов Зоммерфельда	43
Свойства электронного газа в основном состоянии	45
Термодинамические свойства газа свободных электронов. Распределение Ферми — Дирака	53
Термодинамические свойства свободного электронного газа. Применение распределения Ферми — Дирака	56
Зоммерфельдовская теория проводимости в металлах	63
Задачи	67
Литература	69
Глава 3. Недостатки модели свободных электронов	70
Трудности модели свободных электронов	70
Обзор основных предположений	72
Глава 4. Кристаллические решетки	76
Решетка Бравэ	77
Бесконечные решетки и конечные кристаллы	78
Дальнейшие иллюстрации и важные примеры	79
Замечание о терминологии	82
Координационное число	83
Примитивная ячейка	83
Условная элементарная ячейка	84
Примитивная ячейка Вигнера — Зейтца	85
Кристаллическая структура. Решетка с базисом	86
Некоторые важные примеры кристаллических структур и решеток с базисом	87
Другие свойства кристаллических решеток	93
Задачи	93
Литература	94
Глава 5. Обратная решетка	95
Определение обратной решетки	95
Обратная решетка как решетка Бравэ	96
Решетка, обратная к обратной	97
Важные примеры	97
Объем элементарной ячейки обратной решетки	98
Первая зона Бриллюэна	98
Атомные плоскости	99

Индексы Миллера атомных плоскостей	101
Некоторые правила обозначения направлений	102
Задачи	103
Глава 6. Определение кристаллических структур с помощью дифракции рентгеновских лучей	104
Формулировка Брэгга условия дифракции рентгеновских лучей на кристалле	105
Формулировка Лауз условия дифракции рентгеновских лучей на кристалле	106
Эквивалентность формулировок Брэгга и Лауз	108
Экспериментальные методы, основанные на условии Лауз	109
Дифракция на моноатомной решетке с базисом. Геометрический структурный фактор	113
Дифракция на полиатомном кристалле. Атомный форм-фактор	116
Задачи	117
Литература	118
Глава 7. Классификация решеток Бравэ и кристаллических структур	119
Классификация решеток Бравэ	119
Кристаллографические точечные группы и пространственные группы	127
Примеры среди химических элементов	134
Задачи	136
Литература	137
Глава 8. Уровни электрона в периодическом потенциале. Общие свойства	138
Периодический потенциал	139
Теорема Блоха	140
Первое доказательство теоремы Блоха	140
Граничное условие Борна — Кармана	142
Второе доказательство теоремы Блоха	143
Общие замечания о теореме Блоха	145
Поверхность Ферми	148
Плотность уровней	149
Задачи	152
Литература	156
Глава 9. Электроны в слабом периодическом потенциале	157
Общий подход к уравнению Шредингера в случае слабого потенциала	158
Энергетические уровни вблизи одной из брэгговских плоскостей	162
Энергетические зоны в одномерном случае	166
Кривые зависимости энергии от волнового вектора в трехмерном случае	166
Энергетическая щель	167
Зона Бриллюэна	168
Геометрический структурный фактор в моноатомных решетках с базисом	173
Роль спин-орбитальной связи в точках с высокой симметрией	175
Задачи	175
Литература	179

Глава 10. Метод сильной связи	180
Общая формулировка	182
Применение к случаю s-зоны, порождаемой одним атомным s-уровнем	186
Общие замечания о методе сильной связи	188
Функции Ванье	192
Задачи	193
Литература	194
Глава 11. Другие методы расчета зонной структуры	195
Общие свойства волновых функций валентных зон	197
Метод ячеек	199
Метод присоединенных плоских волн (ППВ)	204
Метод гривовских функций Корринги, Кона и Ростокера (ККР)	207
Метод ортогонализованных плоских волн (ОПВ)	209
Псевдопотенциал	211
Комбинированные методы	213
Задачи	214
Литература	215
Глава 12. Полуклассическая модель динамики электронов	216
Описание полуклассической модели	220
Комментарии и ограничения	221
Следствия полуклассических уравнений движения	224
Задачи	242
Литература	244
Глава 13. Полуклассическая теория проводимости в металлах	245
Приближение времени релаксации	246
Вычисление неравновесной функции распределения	247
Упрощение неравновесной функции распределения в частных случаях	249
Статическая электропроводность	251
Высокочастотная электропроводность	252
Теплопроводность	254
Термо-э.д.с.	257
Другие термоэлектрические эффекты	259
Полуклассическая проводимость в постоянном магнитном поле	260
Задачи	260
Литература	263
Глава 14. Определение поверхности Ферми	264
Эффект де Гааза — ван Альфена	265
Свободные электроны в постоянном магнитном поле	270
Уровни блоховских электронов в постоянном магнитном поле	271
Происхождение осцилляций	273
Влияние спина электрона на осцилляции	275
Другие методы исследования поверхности Ферми	275
Задачи	281

Литература	282
Глава 15. Зонная структура отдельных металлов	283
Моновалентные металлы	283
Двухвалентные металлы	298
Трехвалентные металлы	300
Четырехвалентные металлы	304
Полуметаллы	304
Переходные металлы	306
Редкоземельные металлы	308
Сплавы	310
Задачи	311
Литература	312
Глава 16. За пределами τ -приближения	313
Механизмы рассеяния электронов	314
Вероятность рассеяния и время релаксации	315
Скорость изменения функции распределения за счет столкновений	316
Нахождение функции распределения. Уравнение Больцмана	318
Рассеяние на примесях	320
Закон Видемана — Франца	322
Правило Матиссена	323
Рассеяние в изотропных материалах	324
Задачи	326
Литература	328
Глава 17. За пределами приближения независимых электронов	329
Обмен. Приближение Хартри — Фока	331
Теория Хартри — Фока для свободных электронов	333
Экранировка (общая теория)	337
Теория экранировки Томаса — Ферми	340
Теория экранировки Линдхарда	342
Линдхардовское экранирование, зависящее от частоты	343
Приближение Хартри — Фока с учетом экранировки	343
Теория ферми-жидкости	344
Теория ферми-жидкости. Роль принципа Паули при электрон-электронном рассеянии вблизи энергии Ферми	345
Теория ферми-жидкости. Квазичастицы	348
Теория ферми-жидкости: f-функция	349
Теория ферми-жидкости: основное, что следует запомнить	350
Задачи	351
Литература	352
Глава 18. Поверхностные эффекты	353
Влияние поверхности на энергию связи электрона. Работа выхода	354
Контактная разность потенциалов	359

Измерение работы выхода путем измерения контактной разности потенциалов	361
Другие способы измерения работы выхода. Термоэлектронная эмиссия	362
Измеренные работы выхода для ряда металлов	364
Дифракция медленных электронов	364
Ионный микроскоп	366
Электронные поверхностные уровни	366
Задачи	369
Литература	370
Приложения	371
А. Важнейшие численные соотношения теории свободных электронов в металле	371
Идеальный ферми-газ	371
Время релаксации и длина свободного пробега	372
Циклотронная частота	372
Плазменная частота	372
Литература	372
Б. Химический потенциал	373
Литература	373
В. Зоммерфельдовские интегралы	374
Литература	375
Г. Разложение периодических функций по плоским волнам в случае нескольких измерений	376
Д. Скорость и эффективная масса блоховских электронов	379
Е. Некоторые тождества, связанные с фурье-анализом периодических систем	381
Ж. Вариационный принцип для уравнения Шредингера	383
З. Гамильтонова формулировка полуклассических уравнений движения и теорема Лиувилля	385
Литература	385
И. Теорема Грина для периодических функций	386
К. Условия отсутствия межзонных переходов в однородном электрическом или магнитном полях	387
Л. Оптические свойства твердых тел	390
Предположение о локальности	390
Предположение об изотропии	390
Условный характер различия между $\epsilon^0(\omega)$ и $\epsilon(\omega)$	380
Коэффициент отражения	392
Определение $\epsilon(\omega)$ по измерениям коэффициента отражения	392
Соотношение между ϵ и коэффициентом межзонного поглощения в металле	393
Литература	393

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Римскими цифрами обозначен номер тома, арабскими — номер страницы, буква (с) рядом с номером страницы означает, что соответствующий термин приведен в сноске.

- Адиабатическое приближение
 - аналитическое обоснование II 155 (с)
 - в металлах II 139
- Адиабатическое размагничивание II 275—277
- Акустические моды II 64—66
 - и оптические моды II 64, 65
 - и полиатомные базисы II 66, *См. также* Колебания решетки; Фононы
- Акцепторные примеси II 199. *См. также* р — n-переход; Полупроводники; Примеси в полупроводниках
- Аморфные твердые тела I 74
 - аномальные тепловые свойства II 133 (с)
 - дифракция рентгеновских лучей I 104 (с)
- Ангармонические члены II 50, 115—137
 - и второй звук II 133—135
 - и мягкие моды II 181
 - и параметр Грюнайзена II 136
 - и процессы переброса II 129—132
 - и рассеяние фононов II 124—126
 - и резонансная линия, соответствующая остаточным лучам II 176
 - и сохранение квазимпульса II 126
 - и тепловое расширение II 117—120, 122, 123
 - и теплоемкость при высоких температурах II, 57, 82, 83
 - и теплопроводность II 123—133
 - и термодинамические свойства II 117—120
 - и упругие постоянные II 116
 - и n-фононные процессы II 387
 - и ширина однофононных максимумов II 104—106
 - кубические члены и законы сохранения II 117, 136, 137
 - и нестабильность, обусловленная ими, II, 117, 136
 - и переходы, происходящие благодаря им, II 125, 126
- Анион II 12
- Аномальный скин-эффект I 278
- Антитпод центра окраски II 242
- Антисвязывающие состояния II 293 (с)
- Антистоксова компонента II 209
- Антиферромагнетизм II 286, 309—311
 - восприимчивость II, 315, 332 (с)

- в модели Гейзенберга II 317, 318
- в модели Хаббарда II 300
- одномерная цепочка (решение Бете) II 318
- свободных электронов II 299 (с)
- теория молекулярного поля II 332 (с), 338
- энергия основного состояния II 317, 337
- Аппроксиманты Паде II 326 (с)
- Атомные плоскости I 99—103
 - индексы Миллера I 101—103
 - семейства I 100
 - соглашение об обозначениях I 102, 103
 - соответствие с векторами обратной решетки I 99—101
- Атомный гамильтониан I 182, 185 (с)
- Атомный форм-фактор I 116
- Базис II 87
- Базоцентрированная ромбическая решетка Бравэ II 125
- Бесщелевая сверхпроводимость II 341 (с)
- Благородные металлы I 287—292
 - дырочные орбиты в них I 291
 - зонная структура и поверхность Ферми I 53
 - коэффициент Холла I 30
 - магнетосопротивление I 71, 292
 - модуль всестороннего сжатия
 - оптические свойства I 297, 298
 - постоянная решетки I 82
 - теплоемкость I 62
- Ближайший сосед I 83
- Блоховская стенка II 334—336
- Блоховские функции s- и p-типа в приближении почти свободных электронов I 165, 166
- Блоховские электроны
 - в одномерном случае I 152—156
 - волновой вектор I 143—147
 - в постоянном электрическом поле I 227
 - динамика I 216—244
 - дырки I 228—232
 - и свободные электроны I 216
 - на поверхностях I 366—370
 - орбиты в магнитном поле I 232—237
 - — — квантование I 271—273
 - — — период I 236
 - отсутствие столкновений со статической решеткой I 218, II 47
 - плотность уровней I 149—152

скорость I 147, 379, 380
теорема об эффективной массе I 379, 380
s-типа и p-типа I 165
эффективная масса (динамическая) I 231, 232
См. также Запрещенная зона; Зонная структура; Метод сильной связи;
Плотность уровней; Поверхность Ферми;
Полуклассическая модель; Приближение почти свободных электронов;
Эффективная масса Бозе-газ, идеальный II 81
Бозе — Эйнштейн конденсация I 51 (c)
Борна — Кармана граничное условие. *См.* Граничные условия
Боровский радиус I 79
для примесного уровня в полупроводнике II 201
точное численное значение I 371
Бриллюэновское рассеяние II 49, 108—111
классическая картина II 108—111
стоксовые и антистоксовые компоненты II 109
Брэгговские максимумы (пики) I 105
и магнитные пики II 312, 313
и фактор Дебая — Валлера II 385, 386
при бесфононном рассеянии II 100
Брэгговские плоскости I 107, 108
и почти свободные электроны I 162—166
Брэгговское отражение I 108, 109
— — порядок I 106
Ваканции II 233, 234. *См. также* Дефекты в кристаллах
Валентные зоны I 155
в металлах I 197
волновые функции I 197—199
— — сравнение с волновыми функциями
ионного остова I 198
в полупроводниках II 185
Валентные электроны I 18
и фундаментальные трудности в модели свободных электронов I 72
разрешение трудностей I 226
Вандерваальсовские силы *см.* Флуктуационно-дипольные силы
Вариационный принцип для уравнения Больцмана I 327, 328
— — для уравнения Шредингера с периодическим потенциалом I 383, 384
Взаимодействие *см.* Дальнодействующее взаимодействие; Дипольное магнитное
взаимодействие; Ион-ионное взаимодействие; Магнитное взаимодействие
Электрон-ионное взаимодействие; Электрон-фононное взаимодействие;
Электрон-электронное взаимодействие
Вектор Бюргерса II 250—252
Векторный потенциал в полуклассических уравнениях движения I 385

- — и магнетизм электронов II 261
- Верхнее критическое поле II 346
- Вигнеровский кристалл II 299
- Винтовая дислокация II 249, 250. См. также Дислокации Винтовая ось I 121 (с), 134
- Вихревые линии в сверхпроводниках II 347, 348
 - и квант магнитного потока II 348 (с)
 - и теория Гинзбурга — Ландау II 363 (с)
- Волновой вектор Ферми I 49, 51
 - выраженный через r_s I 49
 - и электронная плотность в приближении свободных электронов I 49
 - соотношение с дебаевским волновым вектором II 86 (с)
- Волновые векторы, их плотность I 48, 143
- Волновые пакеты фононные II 124
 - электронные I 219, 220
- Волновые функции электронов в атоме и межатомное расстояние I 181, II 6
- Волны спиновой плотности II 299
- Восприимчивость магнитная II 260
 - антиферромагнетиков II 315
 - атомная II 261—265, 268—270
 - атомов инертных газов II 264
 - в приближении молекулярного поля (закон Кюри — Вейсса) II 332
 - высокотемпературная (в модели Гейзенберга) II 323—326
 - и вычисление критической температуры II 326
 - диамагнитная Ландау II 280, 282
 - диамагнитная Лармора II 263—265
 - Ланжевена II 264 (с)
 - ионов в цепочко-галоидных соединениях II 264
 - ионов с частично заполненными оболочками II 268—270
 - моллярная II 264
 - особенность при T_c II 315
 - парамагнитная Паули см. Парамагнетизм
- Время между столкновениями см. Время релаксации
- Время рекомбинации II 223
- Время релаксации I 21
 - выраженное через удельное сопротивление I 23
 - для изотропного упругого рассеяния электронов на примесях I 326
 - для фононов II 126—131
 - в процессах переброса и нормальных процессах II 135
 - для электрон-фононного рассеяния II 151
 - для электрон-электронного рассеяния I 346—348
 - зависящее от координат I 250 (с)
 - — в полупроводниках II 221, 223