

**Ашкрофт Н., Мермин Н.**

**Физика твердого тела (в двух  
томах), том 1**

**Учебное пособие по физике**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
А98

- Ашкрофт Н.**  
А98 Физика твердого тела (в двух томах), том 1: Учебное пособие по физике / Ашкрофт Н., Мермин Н. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 459 с.

**ISBN 978-5-458-33036-7**

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 978-5-458-33036-7**

© 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, клякс, 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.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| рассеянии вблизи энергии Ферми                                                           |     |
| 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 $\sigma(\omega)$              | 380 |
| Коэффициент отражения                                                                 | 392 |
| Определение $\epsilon(\omega)$ по измерениям коэффициента отражения                   | 392 |
| Соотношение между $\epsilon$ и коэффициентом межзонного поглощения в металле          | 393 |
| Литература                                                                            | 393 |
| Том 2                                                                                 |     |
| Глава 19. Классификация твердых тел                                                   | 5   |
| Классификация диэлектриков                                                            | 7   |
| Ионные кристаллы                                                                      | 11  |
| Щелочно-галогидные соединения (ионные кристаллы химических соединений типа $AlBVII$ ) | 12  |
| Кристаллы соединений типа $AlIBV$ (промежуточные между ионными и ковалентными)        | 19  |
| Ковалентные кристаллы                                                                 | 21  |
| Молекулярные кристаллы                                                                | 21  |
| Металлы                                                                               | 22  |
| Кристаллы с водородной связью                                                         | 23  |
| Задачи                                                                                | 24  |
| Литература                                                                            | 25  |
| Глава 20. Когезионная энергия                                                         | 26  |
| Молекулярные кристаллы. Инертные газы                                                 | 28  |
| Ионные кристаллы                                                                      | 33  |
| Когезия в ковалентных кристаллах и металлах                                           | 39  |
| Задачи                                                                                | 42  |
| Литература                                                                            | 44  |
| Глава 21. Недостатки модели статической решетки                                       | 45  |
| Равновесные свойства                                                                  | 46  |
| Кинетические свойства                                                                 | 47  |
| Взаимодействие с излучением                                                           | 48  |
| Глава 22. Классическая теория гармонического кристалла                                | 50  |
| Гармоническое приближение                                                             | 52  |
| Адиабатическое приближение                                                            | 53  |
| Удельная теплоемкость классического кристалла. Закон Дюлонга и Пти                    | 54  |
| Нормальные моды одномерной монокристаллической решетки Брэгга                         | 58  |
| Нормальные моды одномерной решетки с базисом                                          | 62  |
| Нормальные моды монокристаллической трехмерной решетки Брэгга                         | 66  |
| Нормальные моды трехмерной решетки с базисом                                          | 70  |
| Связь с теорией упругости                                                             | 71  |
| Задачи                                                                                | 76  |
| Литература                                                                            | 78  |

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 23. Квантовая теория гармонического кристалла                   | 79  |
| Нормальные моды и фононы                                              | 80  |
| Общее выражение для теплоемкости решетки                              | 81  |
| Теплоемкость при высоких температурах                                 | 82  |
| Теплоемкость при низких температурах                                  | 83  |
| Теплоемкость при промежуточных температурах. Модели Дебая и Эйнштейна | 85  |
| Сравнение решеточной и электронной удельных теплоемкостей             | 91  |
| Плотность нормальных мод (плотность фононных уровней)                 | 92  |
| Аналогия с теорией излучения черного тела                             | 94  |
| Задачи                                                                | 95  |
| Литература                                                            | 96  |
| Глава 24. Экспериментальные методы определения фононного спектра      | 97  |
| Рассеяние нейтронов кристаллом                                        | 98  |
| Рассеяние электромагнитного излучения кристаллом                      | 107 |
| Волновая картина взаимодействия излучения с колебаниями решетки       | 111 |
| Задачи                                                                | 113 |
| Литература                                                            | 114 |
| Глава 25. Ангармонические эффекты в кристаллах                        | 115 |
| Общие черты ангармонических теорий                                    | 116 |
| Уравнение состояния и тепловое расширение кристалла                   | 117 |
| Тепловое расширение. Параметр Грюнайзена                              | 120 |
| Тепловое расширение металлов                                          | 122 |
| Теплопроводность решетки. Общий подход                                | 123 |
| Теплопроводность решетки. Элементарная кинетическая теория            | 127 |
| Второй звук                                                           | 133 |
| Задачи                                                                | 136 |
| Литература                                                            | 137 |
| Глава 26. Фононы в металлах                                           | 138 |
| Элементарная теория закона дисперсии фононов                          | 138 |
| Особенности Кона                                                      | 141 |
| Диэлектрическая проницаемость металла                                 | 141 |
| Эффективное электрон-электронное взаимодействие                       | 144 |
| Фононный вклад в закон дисперсии электронов                           | 145 |
| Электрон-фононное взаимодействие                                      | 147 |
| Зависящее от температуры электросопротивление металлов                | 149 |
| Модификация закона $T^5$ при учете процессов переброса                | 152 |
| Увлечение фононов                                                     | 153 |
| Задачи                                                                | 154 |
| Литература                                                            | 156 |
| Глава 27. Диэлектрические свойства изоляторов                         | 157 |
| Электростатика диэлектриков                                           | 157 |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| Теория локального поля                                               | 163 |
| Теория поляризуемости                                                | 166 |
| Ковалентные диэлектрики                                              | 177 |
| Пирозлектричество                                                    | 177 |
| Сегнетоэлектрики                                                     | 179 |
| Задачи                                                               | 182 |
| Литература                                                           | 183 |
| Глава 28. Однородные полупроводники                                  | 184 |
| Примеры полупроводников                                              | 188 |
| Типичные примеры зонной структуры полупроводников                    | 190 |
| Циклотронный резонанс                                                | 193 |
| Число носителей тока при термодинамическом равновесии                | 194 |
| Примесные уровни                                                     | 199 |
| Населенность примесных уровней при термодинамическом равновесии      | 203 |
| Равновесная концентрация носителей в примесном полупроводнике        | 205 |
| Проводимость за счет примесной зоны                                  | 207 |
| Теория явлений переноса в невырожденных полупроводниках              | 207 |
| Задачи                                                               | 208 |
| Литература                                                           | 209 |
| Глава 29. Неоднородные полупроводники                                | 210 |
| Полуклассическая модель                                              | 212 |
| Равновесный $p$ — $n$ -переход                                       | 212 |
| Элементарное рассмотрение выпрямляющего действия $p$ — $n$ -перехода | 217 |
| Основные физические черты неравновесного случая                      | 220 |
| Более детальная теория неравновесного $p$ — $n$ -перехода            | 225 |
| Задачи                                                               | 230 |
| Литература                                                           | 232 |
| Глава 30. Дефекты в кристаллах                                       | 233 |
| Точечные дефекты. Основные термодинамические характеристики          | 234 |
| Дефекты и термодинамическое равновесие                               | 237 |
| Точечные дефекты и электропроводность ионных кристаллов              | 238 |
| Центры окраски                                                       | 239 |
| Поляроны                                                             | 243 |
| Экситоны                                                             | 244 |
| Линейные дефекты (дислокации)                                        | 247 |
| Прочность кристаллов                                                 | 252 |
| Деформационное упрочнение                                            | 253 |
| Дислокации и рост кристаллов                                         | 253 |
| Усы                                                                  | 254 |
| Наблюдение дислокаций и других дефектов                              | 254 |
| Дефекты упаковки как пример двумерных дефектов                       | 254 |
| Малоугловые границы зерен                                            | 255 |
| Задачи                                                               | 256 |



|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Литература                                                                                           | 258 |
| Глава 31. Диамагнетизм и парамагнетизм                                                               | 259 |
| Намагниченность и восприимчивость                                                                    | 259 |
| Расчет атомных восприимчивостей, Общая формулировка                                                  | 261 |
| Восприимчивость диэлектриков с полностью заполненными атомными оболочками. Ларморовский диамагнетизм | 263 |
| Основное состояние ионов с частично заполненными оболочками.                                         | 265 |
| Правила Хунда                                                                                        |     |
| Восприимчивость диэлектриков, содержащих ионы с частично заполненной оболочкой. Парамагнетизм        | 268 |
| Термодинамические свойства парамагнитных диэлектриков.                                               | 275 |
| Адиабатическое размагничивание                                                                       |     |
| Восприимчивость металлов. Парамагнетизм Паули                                                        | 277 |
| Диамагнетизм электронов проводимости                                                                 | 280 |
| Измерение парамагнитной восприимчивости Паули методом ядерного магнитного резонанса                  | 281 |
| Диамагнетизм электронов в легированных полупроводниках                                               | 282 |
| Задачи                                                                                               | 283 |
| Литература                                                                                           | 285 |
| Глава 32. Взаимодействие электронов в магнитная структура                                            | 286 |
| Оценка энергии магнитного дипольного взаимодействия                                                  | 288 |
| Магнитные свойства двухэлектронной системы. Синглетные и триплетные состояния                        | 289 |
| Вычисление расщепления между синглетным и триплетным состояниями.                                    | 290 |
| Несостоятельность приближения независимых электронов                                                 |     |
| Спиновый гамильтониан и модель Гейзенберга                                                           | 294 |
| Прямой обмен, сверхобмен, косвенный обмен и обмен между делокализованными электронами                | 296 |
| Магнитное взаимодействие в газе свободных электронов                                                 | 297 |
| Модель Хаббарда                                                                                      | 300 |
| Локализованные моменты в сплавах                                                                     | 300 |
| Минимум электросопротивления и теория Кондо                                                          | 302 |
| Задачи                                                                                               | 304 |
| Литература                                                                                           | 306 |
| Глава 33. Магнитное упорядочение                                                                     | 308 |
| Типы магнитных структур                                                                              | 309 |
| Наблюдение магнитных структур                                                                        | 312 |
| Термодинамические свойства вблизи точки возникновения магнитного порядка                             | 314 |
| Свойства при нулевой температуре. Основное состояние гейзенберговского ферромагнетика                | 316 |
| Свойства при нулевой температуре. Основное состояние гейзенберговского антиферромагнетика            | 317 |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| Поведение гейзенберговского ферромагнетика при низких температурах. | 318 |
| Спиновые волны                                                      |     |
| Высокотемпературная восприимчивость                                 | 323 |
| Рассмотрение поведения системы вблизи критической точки             | 326 |
| Теория молекулярного поля                                           | 329 |
| Следствия дипольного взаимодействия в ферромагнетиках. Домены       | 333 |
| 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 квазиимпульса                                         | 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 n-фононные процессы                      | 387 |
| Р. Вычисление g-фактора Ланде                                       | 388 |
| Важнейшие таблицы                                                   | 389 |
| Предметный указатель                                                | 392 |

## 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* p — 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 квазиимпульса 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-фоонные процессы II 387

и ширина однофоонных 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

Антипод 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 — Эйнштейна конденсация I 51 (с)  
 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  
     стоксовы и антистоксовы 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  
 Вакансии 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  $\tau_s$  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 щелочно-галогидных соединениях II 264  
 ионов с частично заполненными оболочками II 268—270  
 молярная 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)