

КЛАССИЧЕСКИЙ УЧЕБНИК МГУ

Н. Б. Брандт
С. М. Чудинов



**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ
ЭЛЕКТРОНОВ
И ФОНОНОВ**

В МЕТАЛЛАХ



URSS

Н. Б. Брандт, С. М. Чудинов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ
ЭЛЕКТРОНОВ И ФОНОНОВ
В МЕТАЛЛАХ**

Физические основы

Издание второе,
стереотипное



URSS
МОСКВА

ББК 34.2

**Брандт Николай Борисович,
Чудинов Сергей Михайлович**

Экспериментальные методы исследования энергетических спектров электронов и фононов в металлах: Физические основы. Изд. 2-е, стереотип. — М.: ЛЕНАНД, 2023. — 408 с. (Классический учебник МГУ.)

В книге рассказывается о популярных методах исследования энергетических спектров фононов и электронов. Авторы рассматривают основные физические принципы и идеи, на которых базируются экспериментальные методы исследования металлов.

Книга будет полезна инженерам, научным сотрудникам, занимающимся проблемами, связанными с физикой металлов, а также студентам и аспирантам педагогических и технических вузов.

Рецензенты: проф. *А. Ф. Тулинов*, проф. *Р. Н. Кузьмин*

ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 11А, стр. 11.

Формат 60×90/16. Печ. л. 25,5. Зак. № 185643.

Отпечатано в АО «Т 8 Издательские Технологии».

109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.

ISBN 978–5–9710–5084–1

© ЛЕНАНД, 2023

31055 ID 296763



9 785971 050841



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Введение | 7 |
| Часть I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ФОНОНОВ | 14 |
| <i>Глава I. Неупругое рассеяние медленных (тепловых) нейтронов в кристаллической решетке</i> | <i>15</i> |
| § 1. Сравнительная характеристика рассеяния в кристалле тепловых нейтронов и рентгеновских лучей | 15 |
| § 2. Взаимодействие медленных нейтронов с веществом | 17 |
| § 3. Дифракция волны на колеблющейся решетке | 24 |
| § 4. Рассеяние тепловых нейтронов в кристалле. Фактор Дебая—Валлера | 28 |
| § 5. Однофононное когерентное рассеяние нейтронов в кристалле. Определение законов дисперсии фононов | 36 |
| § 6. Некогерентное рассеяние нейтронов. Восстановление функции спектральной плотности фононов | 45 |
| § 7. Методика проведения нейтронодинамического эксперимента | 51 |
| § 8. Построение закона дисперсии фононов | 54 |
| <i>Глава II. Рентгеновские и оптические измерения фононных спектров</i> | <i>60</i> |
| § 1. Взаимодействие электромагнитных волн с твердым телом | 61 |
| § 2. Прозрачность металлов для электромагнитного излучения | 66 |
| § 3. Прозрачность ионных кристаллов | 72 |
| § 4. Поглощение электромагнитных волн в полупроводниках | 74 |
| § 5. Фотон-фононные переходы в твердых телах | 76 |
| § 6. Оптические измерения фононных спектров | 79 |
| § 7. Рентгеновские измерения фононных спектров | 81 |
| <i>Глава III. Эффект Мессбауэра</i> | <i>84</i> |
| § 1. Физическая сущность эффекта Мессбауэра | 85 |
| § 2. Методика получения мессбауэровских спектров | 89 |
| § 3. Теория эффекта Мессбауэра | 93 |
| § 4. Эффективные сечения резонансного поглощения и рассеяния мессбауэровских квантов | 99 |
| § 5. Параметры мессбауэровского спектра, связанные с динамикой решетки | 104 |
| § 6. Температурная зависимость эффекта Мессбауэра | 108 |

| | | |
|-------------------|--|------------|
| § 7. | Эффект Мессбауэра в кристаллах с несколькими атомами в элементарной ячейке | 111 |
| § 8. | Эффект Мессбауэра и колебания примесных атомов | 112 |
| § 9. | Определение спектральной функции фононов с помощью эффекта Мессбауэра | 115 |
| § 10. | Восстановление закона дисперсии фононов с помощью эффекта Мессбауэра | 118 |
| Глава IV. | Теплоемкость | 119 |
| Часть II. | МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЭЛЕКТРОНОВ В МЕТАЛЛАХ | 125 |
| Глава I. | Гальваномагнитные эффекты | 127 |
| § 1. | Общие замечания | 127 |
| § 2. | Слабые магнитные поля (качественное рассмотрение) | 128 |
| § 3. | Слабые магнитные поля (теория) | 134 |
| § 4. | Сильные магнитные поля (качественное рассмотрение) | 139 |
| § 5. | Сильные магнитные поля (теория) | 151 |
| § 6. | Асимптотика компонент тензора проводимости в сильных эффективных полях и топология поверхности Ферми | 153 |
| § 7. | Статический скин-эффект | 159 |
| Глава II. | Скин-эффект | 163 |
| § 1. | Нормальный скин-эффект | 163 |
| § 2. | Аномальный скин-эффект | 165 |
| § 3. | Аномальный скин-эффект в магнитном поле | 167 |
| § 4. | Информация о спектре электронов в металлах | 170 |
| Глава III. | Циклотронный резонанс в металлах | 171 |
| § 1. | Условия наблюдения циклотронного резонанса | 172 |
| § 2. | Циклотронный резонанс. Квадратичный закон дисперсии электронов | 173 |
| § 3. | Циклотронный резонанс на экстремальных сечениях | 175 |
| § 4. | Циклотронный резонанс на опорных точках | 177 |
| § 5. | Циклотронный резонанс в наклонном поле | 179 |
| § 6. | Основные теоретические зависимости | 184 |
| § 7. | Информация об энергетическом спектре электронов | 186 |
| Глава IV. | Магнитоплазменные волны | 189 |
| § 1. | Общая постановка задачи о распространении электромагнитных волн в металле | 190 |
| § 2. | Дисперсионные уравнения для геликоидальной волны (геликона) в локальном приближении | 191 |
| § 3. | Учет нелокальных эффектов | 195 |
| § 4. | Возбуждение и экспериментальное наблюдение геликонов | 197 |
| § 5. | Альфеновские волны | 199 |
| § 6. | Циклотронные волны | 204 |
| Глава V. | Квантовые осцилляционные эффекты | 208 |
| § 1. | Условия наблюдения и физическая природа осцилляций | 208 |
| § 2. | Эффект де Гааза—ван Альфена | 213 |
| § 3. | Эффект Шубникова—де Гааза | 219 |
| Глава VI. | Поглощение звука в металлах | 223 |
| § 1. | Звуковая волна в металле | 224 |
| § 2. | Поглощение звука в отсутствие магнитного поля. Низкие частоты | 225 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| § 3. | Поглощение звука в отсутствие магнитного поля. Высокие частоты | 227 |
| § 4. | Поглощение звука в магнитном поле. Геометрический резонанс Пиппарда | 228 |
| § 5. | Магнетоакустический резонанс в наклонном поле | 231 |
| § 6. | Гигантские квантовые осцилляции поглощения ультразвука в металлах | 233 |
| Глава VII. | Размерные эффекты | 240 |
| § 1. | Радиочастотный размерный эффект | 241 |
| § 2. | Радиочастотный размерный эффект в наклонном магнитном поле | 247 |
| § 3. | Квантовые осцилляционные эффекты в образцах с малыми поперечными размерами | 248 |
| § 4. | Эффект Зондгеймера | 253 |
| § 5. | Фокусировка электронов | 258 |
| Глава VIII. | Аннигиляция позитронов в металлах | 261 |
| § 1. | Механизм аннигиляции позитронов с электронами в твердом теле | 262 |
| § 2. | Двухфотонная аннигиляция | 266 |
| § 3. | Зависимость вероятности двухфотонной аннигиляции от импульса электрона | 271 |
| § 4. | Приближение свободных электронов | 275 |
| § 5. | Уточнение модели | 278 |
| § 6. | Аннигиляция поляризованных позитронов в ферромагнитных металлах | 282 |
| Глава IX. | Комптоновское рассеяние рентгеновских лучей на электронах в металле | 285 |
| § 1. | Теория комптоновского рассеяния рентгеновских лучей в металлах | 287 |
| § 2. | Методика исследования | 291 |
| § 3. | Информация о распределении электронов в пространстве импульсов | 293 |
| Часть III. | ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ | 296 |
| Глава I. | Эффект экранирования в металлах | 300 |
| § 1. | Общая теория статического экранирования | 301 |
| § 2. | Экранирование в газе свободных электронов | 303 |
| § 3. | Статическое экранирование в металлах на больших расстояниях от заряда | 306 |
| § 4. | Линдхардовское статическое экранирование в металлах. Осцилляции плотности заряда | 308 |
| § 5. | Эффект Кона | 310 |
| § 6. | Вклад ионов в экранирование | 313 |
| § 7. | Эффективное электрон-электронное взаимодействие в металлах | 317 |
| Глава II. | Рассеяние в электрон-фононной системе | 318 |
| § 1. | Фонон-фононное рассеяние | 319 |
| § 2. | Электрон-электронное рассеяние | 327 |
| § 3. | Рассеяние электронов на фононах | 328 |
| § 4. | Рассеяние фононов на электронах | 332 |
| § 5. | Общие замечания о характере рассеяния фононов и электронов | 334 |
| § 6. | Электроны и фононы в электрическом поле | 335 |
| § 7. | Электроны и фононы при наличии градиента температуры | 339 |
| § 8. | Выводы | 342 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| <i>Глава III.</i> | Электропроводность металлов | 343 |
| § 1. | Феноменологическое описание электропроводности | 343 |
| § 2. | Простейшая модель | 344 |
| § 3. | Формула Лифшица | 346 |
| § 4. | Электропроводность и форма поверхности Ферми | 348 |
| § 5. | Температурная зависимость электропроводности | 351 |
| § 6. | Некоторые теоретические модели электропроводности металлов с идеальной решеткой | 357 |
| <i>Глава IV.</i> | Теплопроводность металлов | 361 |
| § 1. | Простая модель | 362 |
| § 2. | Закон Видемана—Франца | 369 |
| § 3. | Рассеяние фононов | 372 |
| § 4. | Рассеяние электронов | 375 |
| § 5. | Теплопроводность и энергетический спектр электронов и фононов | 376 |
| <i>Глава V.</i> | Магнетофононный резонанс | 377 |
| § 1. | Некоторые замечания | 377 |
| § 2. | Изотропный закон дисперсии | 379 |
| § 3. | Магнетофононный резонанс при произвольном законе дисперсии носителей тока | 386 |
| <i>Глава VI.</i> | Микроконтактная спектроскопия | 388 |
| § 1. | Модель микроконтакта. Режимы работы микроконтакта | 389 |
| § 2. | Вольт-амперная характеристика микроконтакта в баллистическом режиме | 391 |
| § 3. | Вольт-амперная характеристика микроконтакта в диффузионном и тепловом режимах | 398 |
| § 4. | Создание и отбор микроконтактов | 399 |
| § 5. | Микроконтактные спектры металлов | 400 |
| | Литература | 404 |