

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
<b>Часть I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ФОНОНОВ . . . . .</b>	<b>14</b>
<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
<b>Глава IV.</b>	<b>Теплоемкость</b>	<b>119</b>
<b>Часть II.</b>	<b>МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЭЛЕКТРОНОВ В МЕТАЛЛАХ</b>	<b>125</b>
<b>Глава I.</b>	<b>Гальваномагнитные эффекты</b>	<b>127</b>
§ 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
<b>Глава II.</b>	<b>Скин-эффект</b>	<b>163</b>
§ 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
<b>Глава III.</b>	<b>Циклотронный резонанс в металлах</b>	<b>171</b>
§ 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
<b>Глава IV.</b>	<b>Магнитоплазменные волны</b>	<b>189</b>
§ 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
<b>Глава V.</b>	<b>Квантовые осцилляционные эффекты</b>	<b>208</b>
§ 1.	Условия наблюдения и физическая природа осцилляций	208
§ 2.	Эффект де Гааза—ван Альфена	213
§ 3.	Эффект Шубникова—де Гааза	219
<b>Глава VI.</b>	<b>Поглощение звука в металлах</b>	<b>223</b>
§ 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
<b>Глава VII.</b>	<b>Размерные эффекты</b>	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
<b>Глава VIII.</b>	<b>Аннигиляция позитронов в металлах</b>	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
<b>Глава IX.</b>	<b>Комптоновское рассеяние рентгеновских лучей на электронах в металле</b>	285
§ 1.	Теория комптоновского рассеяния рентгеновских лучей в металлах	287
§ 2.	Методика исследования	291
§ 3.	Информация о распределении электронов в пространстве импульсов	293
<b>Часть III.</b>	<b>ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ</b>	296
<b>Глава I.</b>	<b>Эффект экранирования в металлах</b>	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
<b>Глава II.</b>	<b>Рассеяние в электрон-фононной системе</b>	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>	<b>Электропроводность металлов . . . . .</b>	<b>343</b>
§	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>	<b>Теплопроводность металлов . . . . .</b>	<b>361</b>
§	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>	<b>Магнетофононный резонанс . . . . .</b>	<b>377</b>
§	1. Некоторые замечания . . . . .	377
§	2. Изотропный закон дисперсии . . . . .	379
§	3. Магнетофононный резонанс при произвольном законе дисперсии носителей тока . . . . .	386
<i>Глава VI.</i>	<b>Микроконтактная спектроскопия . . . . .</b>	<b>388</b>
§	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
	<b>Литература . . . . .</b>	<b>404</b>