

К. В. ШАЛИМОВА

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

УЧЕБНИК

*Издание четвертое,
стереотипное*



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Список основных обозначений	4
Глава первая. Полупроводники. Элементарная теория электропроводности	7
1.1. Классификация веществ по удельной электрической проводимости Полупроводники	7
1.2. Модельные представления о механизме электропроводности собственных полупроводников	12
1.3. Модельные представления о механизме электропроводности примесных полупроводников	18
1.4. Элементарная теория электропроводности полупроводников	20
Глава вторая. Основы зонной теории полупроводников	22
2.1. Уравнение Шредингера для кристалла	22
2.2. Адиабатическое приближение и валентная аппроксимация	24
2.3. Одноэлектронное приближение	25
2.4. Приближение сильно связанных электронов	29
2.5. Число состояний электронов в энергетической зоне	35
2.6. Квазиимпульс	37
2.7. Зоны Бриллюэна	38
2.8. Возможное заполнение электронных состояний валентной зоны	40
2.9. Зависимость энергии электрона от волнового вектора у дна и потолка энергетической зоны	42
2.10. Движение электронов в кристалле под действием внешнего электрического поля	45
2.11. Эффективная масса носителей заряда	51
2.12. Циклотронный резонанс	57
2.13. Зонная структура некоторых полупроводников	59
2.14. Метод эффективной массы	64
2.15. Элементарная теория примесных состояний	66
Глава третья. Колебания атомов кристаллической решетки	69
3.1. Одномерные колебания однородной струны	69
3.2. Колебания одноатомной линейной цепочки	70
3.3. Энергия колебаний атомов одномерной решетки. Нормальные координаты	74
3.4. Колебания двухатомной линейной цепочки	76
3.5. Колебания атомов трехмерной решетки	79
3.6. Статистика фононов	82
3.7. Теплоемкость кристаллической решетки	84
3.8. Термическое расширение и тепловое сопротивление твердого тела	90

Глава четвертая. Статистика электронов и дырок в полупроводниках	92
4.1. Плотность квантовых состояний	92
4.2. Функция распределения Ферми—Дирака	96
4.3. Степень заполнения примесных уровней	98
4.4. Концентрации электронов и дырок в зонах	100
4.5. Примесный полупроводник	103
4.6. Собственный полупроводник	109
4.7. Зависимость уровня Ферми от концентрации примеси и температуры для невырожденного полупроводника	113
4.8. Зависимость уровня Ферми от температуры для невырожденного полупроводника с частично компенсированной примесью	120
4.9. Примесные полупроводники при очень низких температурах	124
4.10. Некристаллические полупроводники	127
Глава пятая. Рассеяние электронов и дырок в полупроводниках	131
5.1. Механизмы рассеяния электронов и дырок	131
5.2. Кинетическое уравнение Больцмана	133
5.3. Равновесное состояние	139
5.4. Время релаксации	140
5.5. Рассеяние на ионах примеси	143
5.6. Рассеяние на атомах примеси и дислокациях	147
5.7. Рассеяние на тепловых колебаниях решетки	148
Глава шестая. Кинетические явления в полупроводниках	154
6.1. Неравновесная функция распределения	154
6.2. Удельная электрическая проводимость полупроводников	157
6.3. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры	160
6.4. Эффект Холла	
6.5. Эффект Холла в полупроводниках с двумя типами носителей заряда	167
6.6. Магниторезистивный эффект	172
6.7. Термоэлектрические явления	177
6.8. Теплопроводность полупроводников	183
6.9. Электропроводность полупроводников в сильном электрическом поле	185
6.10. Эффект Ганна	190
6.11. Ударная ионизация	194
6.12. Туннельный эффект и электростатическая ионизация	197
Глава седьмая. Генерация и рекомбинация электронов и дырок	199
7.1. Равновесные и неравновесные носители заряда	199
7.2. Биполярная оптическая генерация носителей заряда	202
7.3. Монополярная оптическая генерация носителей заряда. Максвелловское время релаксации	204
7.4. Механизмы рекомбинации	205
7.5. Межзонная излучательная рекомбинация	206
7.6. Межзонная ударная рекомбинация	211
7.7. Рекомбинация носителей заряда через ловушки	213
7.8. Температурная зависимость времени жизни носителей заряда при рекомбинации через ловушки	219
7.9. Центры захвата и рекомбинационные ловушки	222
Глава восьмая. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда	224
8.1. Уравнение непрерывности	224
8.2. Диффузионный и дрейфовый токи	226
8.3. Соотношение Эйнштейна	228

8.4. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда в случае монополярной проводимости	229
8.5. Диффузия и дрейф неосновных избыточных носителей заряда в примесном полупроводнике	232
8.6. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда в полупроводнике с проводимостью, близкой к собственной	236
Глава девятая. Контактные явления в полупроводниках	240
9.1. Полупроводник во внешнем электрическом поле	240
9.2. Термоэлектронная работа выхода	244
9.3. Контакт металл—металл. Контактная разность потенциалов	246
9.4. Контакт металл—полупроводник	248
9.5. Выпрямление тока в контакте металл—полупроводник	253
9.6. Диодная теория выпрямления тока	256
9.7. Диффузионная теория выпрямления тока	258
9.8. Контакт электронного и дырочного полупроводников	260
9.9. Выпрямление тока в <i>p-n</i> переходе	264
9.10. Теория тонкого <i>p-n</i> перехода	266
9.11. <i>p⁺-n</i> и <i>p⁺-p</i> переходы	271
9.12. Гетеропереходы	275
9.13. Контакт вырожденных электронного и дырочного полупроводников. Туннельный диод	277
9.14. Омический переход	281
Глава десятая. Поверхностные явления в полупроводниках	282
10.1. Природа поверхностных уровней	282
10.2. Теория слоя пространственного заряда	285
10.3. Эффект поля	290
10.4. Скорость поверхностной рекомбинации	297
10.5. Влияние поверхностной рекомбинации на время жизни носителей заряда в образцах конечных размеров	300
Глава одиннадцатая. Поглощение света полупроводниками	302
11.1. Спектр отражения и спектр поглощения	302
11.2. Собственное поглощение при прямых переходах	304
11.3. Собственное поглощение при непрямых переходах	309
11.4. Поглощение сильно легированного и аморфного полупроводников	313
11.5. Влияние внешних воздействий на собственное поглощение полупроводников	316
11.6. Экситонное поглощение	323
11.7. Поглощение свободными носителями заряда	327
11.8. Примесное поглощение	333
11.9. Решеточное поглощение	334
Глава двенадцатая. Люминесценция полупроводников	336
12.1. Типы люминесценции	336
12.2. Мономолекулярное свечение твердых тел	337
12.3. Рекомбинационное излучение полупроводников при фундаментальных переходах	337
12.4. Рекомбинационное излучение при переходах между зоной и примесными уровнями	341
12.5. Релаксация люминесценции полупроводников	345
12.6. Температурное тушение люминесценции полупроводников	346
12.7. Спонтанное и вынужденное излучение атома	347
12.8. Стимулированное излучение твердых тел	352

Глава тринадцатая. Фотоэлектрические явления в полупроводниках	357
13.1. Внутренний фотоэффект	357
13.2. Фотопроводимость	360
13.3. Релаксация фотопроводимости	362
13.4. Фотопроводимость при наличии поверхностной рекомбинации и диффузии носителей заряда	364
13.5. Эффект Дембера	366
13.6. Фотоэлектромагнитный эффект	368
13.7. Фотоэффект в $p-n$ переходе	371
13.8. Фотоэффект на барьере Шоттки	374
13.9. Внешний фотоэффект	375
Приложения:	
I. Свойства Ge, Si и GaAs (при 300 К)	378
II. Свойства полупроводников	379
III. Физические константы	382
Предметный указатель	383