

В. Л. БОНЧ-БРУЕВИЧ, С. Г. КАЛАШНИКОВ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов физических специальностей вузов



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1977

531.9

Б81

УДК 537.311.33

Виктор Леопольдович Бонч-Бруевич

Сергей Григорьевич Калашиников

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

М., 1977 г., 672 стр. с илл.

Редактор *В. Я. Дубнова*

Техн. редактор *С. Я. Шкляр*

Корректор *Л. Н. Борозина*

Сдано в набор 2/VI 1977 г. Подписано к печати 2/XI 1977 г.

Бумага 60×90¹/₁₆ тип. № 2. Физ. печ. л. 42. Условн. печ. л. 42.

Уч.-изд. л. 42,51. Тираж 33 000 экз. Цена книги 1 р. 70 к.

Заказ № 1306.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы

117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Гатчинская ул., 26.

Б $\frac{20403-161}{053(02)-77}$ 81:77

© Главная редакция
физико-математической литературы
издательства «Наука», 1977

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	10
-----------------------	----

Глава I

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

§ 1. Кинетические явления в полупроводниках	13
а. Электропроводность (13). б. Эффект Холла (15). в. Изменение сопротивления в магнитном поле (17). г. Термоэдс (18). д. Эффект Томсона (19). е. Эффект Пельтье (20). ж. Эффект Нернста — Эттингсгаузена (21). з. Эффект Риги — Ледюка (22). и. Продольные термомагнитные эффекты (23).	
§ 2. Время релаксации	23
§ 3. Элементарная теория гальваномагнитных явлений	25
а. Тензор электропроводности в магнитном поле (25). б. Угол Холла и постоянная Холла (28). в. Магнетосопротивление (30).	
§ 4. Смешанная проводимость	32
а. Эффект Холла (32). б. Магнетосопротивление (35).	
§ 5. Некоторые экспериментальные результаты	35
а. Электронная и дырочная проводимость (35). б. Собственная и примесная проводимость (36). в. Запрещенная энергетическая зона (40). г. Удельная электропроводность (42). д. Подвижности (43). е. Собственная концентрация электронов (45). ж. Магнетосопротивление (47).	

Глава II

ХИМИЧЕСКИЕ СВЯЗИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

§ 1. Кристаллические решетки	50
§ 2. Электронная конфигурация атомов	53
§ 3. Типы химической связи	56
а. Ионная связь (57). б. Гомеоплярная связь (57). в. Ван-дер-ваальсовская связь (60).	
§ 4. Строение некоторых полупроводниковых кристаллов	60
а. Ионные кристаллы (60). б. Гомеоплярные кристаллы (61).	
в. Кристаллы со смешанными связями (62).	
§ 5. Некристаллические полупроводники	64
а. Аморфные полупроводники (64). б. Жидкие полупроводники (65).	
в. Стеклообразные полупроводники (68).	
§ 6. Запрещенная зона энергий	69
§ 7. Полупроводниковые свойства и химическая связь	70
§ 8. Полупроводники с малой подвижностью	71
§ 9. Примесные атомы	73
§ 10. Вакансии и междоузельные атомы	78
§ 11. Дислокации	81

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава III

ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА I. ИДЕАЛЬНАЯ РЕШЕТКА

§ 1. Основные предположения	87
§ 2. Волновая функция электрона в периодическом поле	89
§ 3. Зоны Бриллюэна	94
§ 4. Энергетические зоны	100
§ 5. Метод сильно связанных электронов	103
§ 6. Закон дисперсии. Изоэнергетические поверхности	112
§ 7. Металлы и полупроводники	114
§ 8. Эффективная масса	116
§ 9. Зонная структура некоторых полупроводников	122

Глава IV

ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

II. КРИСТАЛЛЫ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ. НЕИДЕАЛЬНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

§ 1. Средние значения скорости и ускорения электрона в кристаллической решетке	129
§ 2. Электроны и дырки	133
§ 3. Движение носителей заряда в постоянном и однородном магнитном поле (классическая теория). Диамагнитный резонанс	137
§ 4. Метод эффективной массы	145
§ 5. Энергетический спектр носителя заряда в постоянном и однородном магнитном поле (квантовая теория)	149
§ 6. Движение и энергетический спектр носителей заряда в постоянном электрическом поле	154
§ 7. Мелкие примесные уровни в гомеоплярном кристалле	160

Глава V

СТАТИСТИКА ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

§ 1. Введение	167
§ 2. Распределение квантовых состояний в зонах	168
§ 3. Распределение Ферми — Дирака	169
§ 4. Концентрации электронов и дырок в зонах	170
§ 5. Невырожденные полупроводники	172
§ 6. Случай сильного вырождения	174
§ 7. Эффективная масса плотности состояний	175
§ 8. Плотность состояний в квантуемом магнитном поле	179
§ 9. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Простые центры	181
§ 10. Многозарядные центры	185
§ 11. Распределение Гиббса	186
§ 12. Частные случаи	189
§ 13. Определение положения уровня Ферми	191
§ 14. Уровень Ферми в собственном полупроводнике	193
§ 15. Полупроводник с примесью одного типа	194
§ 16. Взаимная компенсация доноров и акцепторов	195
§ 17. Компенсированные полупроводники	197
§ 18. Определение энергетических уровней примесных атомов	199
а. Многозарядные акцепторы в полупроводнике <i>n</i> -типа (199). б. Многозарядные акцепторы в полупроводнике <i>p</i> -типа (201). в. Многозарядные доноры в полупроводнике <i>n</i> -типа (202). г. Многозарядные доноры в полупроводнике <i>p</i> -типа (202).	

Глава VI

ЯВЛЕНИЯ В КОНТАКТАХ (МОНОПОЛЯРНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ)

§ 1.	Потенциальные барьеры	205
§ 2.	Плотность тока. Соотношение Эйнштейна	207
§ 3.	Условия равновесия контактирующих тел	209
§ 4.	Термоэлектронная работа выхода	210
§ 5.	Контактная разность потенциалов	213
§ 6.	Распределение концентрации электронов и потенциала в слое объемного заряда	216
§ 7.	Длина экранирования	218
§ 8.	Обогащенный контактный слой в отсутствие тока	220
§ 9.	Истощенный контактный слой	222
§ 10.	Токи, ограниченные пространственным зарядом	226
§ 11.	Выпрямление в контакте металл — полупроводник	232
§ 12.	Диффузионная теория	236
§ 13.	Сравнение с экспериментом	239

Глава VII

НЕРАВНОВЕСНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ

§ 1.	Неравновесные носители заряда	243
§ 2.	Время жизни неравновесных носителей заряда	244
§ 3.	Уравнения непрерывности	247
§ 4.	Фотопроводимость	250
§ 5.	Квазиуровни Ферми	255
§ 6.	Электронно-дырочные переходы	258
§ 7.	Обнаружение неравновесных носителей заряда	261
§ 8.	Амбиполярная диффузия и амбиполярный дрейф	264
§ 9.	Длины диффузии и дрейфа	268
§ 10.	n^+ — n - и p^+ — p - переходы	271

Глава VIII

**ВЫПРЯМЛЕНИЕ И УСИЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ
С ПОМОЩЬЮ p — n -ПЕРЕХОДОВ**

§ 1.	Статическая вольтамперная характеристика p — n -перехода	274
§ 2.	p — n -переход при переменном напряжении	277
§ 3.	Туннельный эффект в p — n -переходах. Туннельные диоды	282
§ 4.	Биполярный полупроводниковый триод	285
§ 5.	Гетеропереходы	289

Глава IX

СТАТИСТИКА РЕКОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК

§ 1.	Различные типы процессов рекомбинации	294
§ 2.	Темп рекомбинации зона — зона	295
§ 3.	Время жизни при излучательной рекомбинации	298
§ 4.	Рекомбинация через примеси и дефекты	303
§ 5.	Нестационарные процессы	307
а.	Монополярное возбуждение (307). б. Биполярное возбуждение (308)	
§ 6.	Стационарные состояния	310
§ 7.	Многочарядные ловушки	314

Глава X

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ

§ 1. Происхождение поверхностных состояний	317
§ 2. Влияние поверхностного потенциала на электропроводность	322
§ 3. Эффект поля	325
§ 4. Некоторые эффекты, связанные с поверхностными состояниями	332
§ 5. Скорость поверхностной рекомбинации	335
§ 6. Влияние поверхностной рекомбинации на фотопроводимость	338
а. Стационарная фотопроводимость при объемной однородной генерации (338). б. Стационарная фотопроводимость при поверхностной генерации (340).	
§ 7. Затухание фотопроводимости в тонких пластинках и нитевидных образцах	341
§ 8. Зависимость поверхностной рекомбинации от поверхностного потенциала	343
§ 9. Ток насыщения диодов	345

Глава XI

ФОТОЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ

§ 1. Роль неосновных носителей	347
§ 2. Фотоэдс в однородных полупроводниках	350
§ 3. Объемная фотоэдс	351
§ 4. Вентильная фотоэдс	355
§ 5. Вентильные фотоэлементы	359
§ 6. Поверхностная фотоэдс	365
§ 7. Фотоэлектромагнитный эффект	366

Глава XII

КОЛЕБАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

§ 1. Малые колебания	374
§ 2. Нормальные координаты	376
§ 3. Частоты нормальных колебаний. Акустические и оптические ветви	384
§ 4. Вектор смещения	389
§ 5. Квантовомеханическое рассмотрение колебаний решетки	391
§ 6. Фононы	394

Глава XIII

ЭЛЕМЕНТЫ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ЯВЛЕНИЙ ПЕРЕНОСА

§ 1. Феноменологические соотношения	399
а. Носители заряда в постоянном и однородном слабом электрическом поле (399). б. Носители заряда в постоянном и однородном слабом температурном поле (400). в. Носители заряда в постоянных и однородных электрическом и магнитном полях (403).	
§ 2. Кинетические коэффициенты и функция распределения	406
§ 3. Кинетическое уравнение	408
§ 4. Термодинамическое равновесие. Принцип детального равновесия	413
§ 5. Малые отклонения от равновесия	416
§ 6. Интеграл столкновений в случае упругого рассеяния и изотропных изоненергетических поверхностей. Время релаксации импульса	418

§ 7. Элементарные стационарные решения кинетического уравнения в случае малых отклонений от равновесия	424
а. Статическая электропроводность (424). б. Термоэдс и коэффициент Пельтье (429). в. Постоянная Холла и магнетосопротивление (434).	
§ 8. Носители заряда в слабом переменном электрическом поле	439
§ 9. Плазменные волны	444

Глава XIV

РАССЕЯНИЕ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НЕИДЕАЛЬНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ

§ 1. Постановка задачи. Теория возмущений	447
§ 2. Вероятность перехода. Условие применимости кинетического уравнения	448
§ 3. Энергия взаимодействия носителей заряда с фононами	453
а. Общие соображения (453). б. Взаимодействие носителей заряда с акустическими фононами; метод потенциала деформации (454). в. Взаимодействие носителей заряда с оптическими фононами в гомеополярном кристалле; метод потенциала деформации (457). г. Взаимодействие носителей заряда с оптическими фононами в гетерополярном кристалле (459). д. Взаимодействие носителей заряда с пьезоэлектрическими колебаниями решетки (461). е. Сводка формул (464).	
§ 4. Рассеяние носителей заряда фононами	465
§ 5. Рассеяние носителей заряда примесными атомами	474
§ 6. Подвижность, холл-фактор и термоэдс при различных механизмах рассеяния	481
§ 7. Одновременное действие нескольких механизмов рассеяния	484

Глава XV

АКУСТО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 1. Предварительные замечания	488
§ 2. Взаимодействие упругих волн с электронами проводимости	490
§ 3. Упругие волны в пьезоэлектриках	493
§ 4. Упругие волны в пьезоэлектрических полупроводниках	494
§ 5. Электронное поглощение и усиление ультразвуковых волн	500
§ 6. Акусто-электрический эффект	502
§ 7. Случай $ql \gg 1$	505
§ 8. Усиление тепловых флуктуаций	508
§ 9. Заключительные замечания	511

Глава XVI

ГОРЯЧИЕ ЭЛЕКТРОНЫ

§ 1. Нагрев электронного газа	513
§ 2. Симметричная и антисимметричная части функции распределения	518
§ 3. Уравнения баланса	520
§ 4. Электронная температура	521
§ 5. Роль неупругости рассеяния	527
§ 6. Зависимость подвижности и концентрации носителей заряда от напряженности поля	529
§ 7. Дифференциальная проводимость	537
§ 8. Флуктуационная неустойчивость	540
§ 9. Электрические домены и токовые шнуры	542
§ 10. Движущиеся и статические домены	545

Глава XVII

ПРОБЛЕМЫ ОБОСНОВАНИЯ ЗОННОЙ ТЕОРИИ
И ЗАДАЧИ, ВЫХОДЯЩИЕ ЗА ЕЕ РАМКИ

§ 1. Три вопроса к зонной теории	547
§ 2. Адиабатическое приближение	548
§ 3. Приближение малых колебаний	552
§ 4. Роль колебаний решетки. Полярон	553
§ 5. Метод самосогласованного поля	556
§ 6. Электроны и дырки как элементарные возбуждения многоэлектронной системы в полупроводнике	560
§ 7. Экситон	563
а. Решения, принадлежащие непрерывному спектру (565). б. Решения, принадлежащие дискретному спектру (565).	
§ 8. Мелкие локальные уровни при учете экранирования примесных центров	567
§ 9. Механизмы рекомбинации	569

Глава XVIII

ОПТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

§ 1. Поглощение и испускание света полупроводниками. Феноменологические соотношения	576
а. Непоглощающая среда (579). б. Слабое поглощение волны достаточно большой частоты (580).	
§ 2. Механизмы поглощения	581
§ 3. Поглощение и отражение электромагнитных волн газом свободных носителей заряда	583
§ 4. Коэффициенты поглощения и излучения при оптических переходах зона — зона	587
§ 5. Прямые и не прямые переходы	591
§ 6. Полупроводниковые лазеры	594
§ 7. Коэффициенты поглощения при прямых переходах. Комбинированная плотность состояний	599
§ 8. Критические точки	604
§ 9. Непрямые переходы	610
§ 10. Электрооптика	613
§ 11. Модуляционная спектроскопия	614
§ 12. Магнетооптика	615
а. Магнетоплазменные эффекты (615). б. Междузонные переходы в квантуемом магнитном поле (616).	

Глава XIX

СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

§ 1. Примесные уровни и примесные зоны	617
§ 2. Особенности сильно легированных полупроводников	620
§ 3. Иерархия энергий	626
§ 4. Плотность состояний	628
§ 5. Хвост плотности состояний	632
§ 6. Междузонные оптические переходы в сильно легированных полупроводниках	635
§ 7. Некристаллические полупроводники	639

ПРИЛОЖЕНИЯ

I.	К доказательству теоремы Блоха	643
II.	Интегралы с функциями Блоха	644
III.	Таблица значений интеграла $\Phi_{1/2}$	646
IV.	Дельта-функция	647
V.	Рекомбинация через многозарядные ловушки	648
VI.	Интеграл поверхностной проводимости	650
VII.	Диффузия неравновесных носителей заряда в магнитном поле	652
VIII.	Вычисление суммы (XII. 2.6)	655
IX.	Вывод условия ортогональности (XII.2.11)	655
X.	Переход от суммирования по дискретным компонентам квазиимпульса к интегрированию	656
XI.	Гамильтониан взаимодействия электронов с акустическими фононами	657
XII.	Потенциал заряженного центра при учете экранирования свободными носителями заряда	659
XIII.	Усреднение по координатам примесных атомов	661
XIV.	Теорема об интеграле от периодической функции	664
XV.	Интегралы с функцией Ферми в условиях сильного вырождения	664
	Литература	666
	Основные обозначения	670