

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 Нерста — 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

## 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). Диаманитный 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 квантующем 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.	Многозарядные 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 изоэнергетических 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 гомеоплярном кристалле; метод потенциала деформации (457). г. Взаимодействие носителей заряда с оптическими фононами в гетероплярном 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 пьезодиэлектриках . . . . .	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 непрямые 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 квантующем 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