

# Содержание

Предисловие.....	9
<b>Глава 1</b>	
<b>Принципы строения твердых тел.</b>	
<b>Элементы кристаллографии .....</b>	<b>11</b>
1.1. Классификация конденсированных сред .....	11
1.1.1. Кристаллическое состояние и его классификация .....	14
1.1.2. Аморфное состояние.....	15
1.1.3. Жидкое состояние .....	16
1.2. Кристаллическая решетка .....	17
1.2.1. Элементарная ячейка. Базис решетки .....	18
1.2.2. Кристаллографические направления, плоскости и зоны .....	21
1.2.3. Сингонии кристаллов.....	23
1.2.4. Решетки Бравэ. Ячейка Вигнера–Зейтца.....	23
1.3. Симметрия кристаллов .....	25
1.3.1. Точечные операции симметрии .....	25
1.3.2. Пространственные группы симметрии .....	28
1.4. Обратная решетка.....	30
1.5. Принцип плотной упаковки атомов.....	32
1.6. Примеры простых кристаллических структур.....	35
1.7. Полиморфизм .....	37
1.8. Жидкие кристаллы .....	42
1.9. Методы определения структуры твердых тел .....	43
1.9.1. Дифракционные методы.....	44
1.9.2. Дифракция рентгеновских лучей в кристаллах.....	45
1.9.3. Экспериментальные методы определения структуры кристаллов....	48
1.9.4. Методы определения структуры аморфных твердых тел .....	52
Задачи .....	55
<b>Глава 2</b>	
<b>Происхождение и типы межатомных связей .....</b>	<b>56</b>
2.1. Химическая связь и валентность .....	56
2.2. Энергия связи.....	59
2.3. Типы межатомных связей в твердых телах.....	65
2.3.1. Ионная связь .....	65
2.3.2. Ковалентная связь .....	68
2.3.3. Металлическая связь .....	71
2.3.4. Ван-дер-ваальсова связь. Молекулярные кристаллы .....	72
2.3.5. Водородная связь .....	73
2.4. Структура веществ с ненаправленным взаимодействием .....	74
2.5. Представление об атомных орбиталях.....	80
2.6. Случай направленного взаимодействия. Структура веществ с ковалентными связями .....	85



2.7. Роль обменного взаимодействия в образовании кристаллов.....	87
Задачи .....	89

### Глава 3

#### Дефекты и диффузия в твердых телах..... 91

3.1. Классификация дефектов .....	91
3.2. Точечные дефекты .....	92
3.2.1. Дефекты по Френкелю .....	93
3.2.2. Дефекты по Шоттки .....	94
3.2.3. Термодинамика точечных дефектов .....	95
3.2.4. Радиационные дефекты .....	97
3.2.5. Центры окраски.....	99
3.3. Дислокации .....	100
3.3.1. Образование дислокаций в кристалле.....	103
3.3.2. Движение дислокаций.....	105
3.3.3. Дефекты упаковки.....	109
3.3.4. Границы зерен.....	111
3.3.5. Влияние дислокаций на свойства твердых тел и методы наблюдения дислокаций .....	113
3.4. Механизмы диффузии в твердых телах.....	117
3.4.1. Диффузия в кристаллах .....	119
3.4.2. Законы Фика.....	125
3.5. Твердые электролиты .....	129
Задачи .....	130

### Глава 4

#### Механические свойства твердых тел..... 131

4.1. Тензоры напряжений и деформаций .....	133
4.2. Закон Гука для анизотропных твердых тел и энергия упругодеформированного тела .....	140
4.3. Распространение акустических волн в кристаллах.....	145
4.3.1. Поверхностные акустические волны.....	151
4.4. Пластические свойства кристаллов .....	154
4.4.1. Деформация скольжением и двойникованием .....	155
4.4.2. Хрупкое разрушение.....	157
4.5. Космический лифт .....	161
Задачи .....	166

### Глава 5

#### Динамика кристаллической решетки..... 167

5.1. Одномерные колебания однородной струны .....	167
5.2. Гармоническое приближение.....	169
5.3. Колебания одномерной монокристаллической цепочки атомов.....	170
5.3.1. Зоны Бриллюэна .....	173

5.4.	Колебательный спектр двухатомной одномерной цепочки. Акустическая и оптическая ветви колебаний.....	177
5.4.1.	Дисперсионные кривые для двухатомной одномерной цепочки ....	181
5.5.	Колебания атомов трехмерной решетки .....	183
5.6.	Упругие волны смещений атомов. Фононы.....	184
5.6.1.	Фононные спектры в кристаллах.....	186
5.7.	Локальные фононные моды .....	188
	Задачи .....	190

## Глава 6

### Тепловые свойства твердых тел .....

6.1.	Теплоемкость твердых тел .....	191
6.1.1.	Закон Дюлонга и Пти .....	192
6.2.	Энергия тепловых колебаний решетки .....	193
6.2.1.	Приближение Эйнштейна .....	197
6.2.2.	Приближение Дебая .....	200
6.3.	Электронная теплоемкость и ее зависимость от температуры .....	205
6.4.	Ангармонизм колебаний атомов и тепловое расширение .....	206
6.5.	Теплопроводность твердых тел .....	212
	Задачи .....	217

## Глава 7

### Магнитные свойства твердых тел.....

7.1.	Классификация магнетиков .....	218
7.2.	Влияние магнитного поля на орбитальное движение электрона. Диамагнетизм .....	221
7.2.1.	Диамагнетизм атомных остовов.....	222
7.3.	Природа парамагнетизма .....	224
7.3.1.	Парамагнетизм электронов проводимости .....	227
7.3.2.	Электронный парамагнитный резонанс.....	229
7.4.	Ферромагнетизм.....	231
7.4.1.	Молекулярное поле Вейсса.....	233
7.4.2.	Энергия обменного взаимодействия.....	235
7.4.3.	Доменная структура ферромагнетиков .....	237
7.4.4.	Антиферромагнетизм. Ферримагнетизм .....	242
7.4.5.	Постоянные магниты.....	245
	Задачи .....	249

## Глава 8

### Диэлектрические свойства твердых тел .....

8.1.	Основные характеристики диэлектриков .....	251
8.2.	Упругая поляризация .....	255
8.2.1.	Электронная упругая поляризация.....	255
8.2.2.	Ионная упругая поляризация .....	257
8.2.3.	Дипольная упругая поляризация .....	259



8.3.	Тепловая (релаксационная) поляризация .....	261
8.3.1.	Электронная тепловая поляризация.....	262
8.3.2.	Ионная тепловая поляризация .....	263
8.3.3.	Дипольная тепловая поляризация.....	265
8.4.	Связь между поляризуемостью и диэлектрической проницаемостью ..	268
8.5.	Электрострикция, пьезоэффект, пироэффект.....	270
8.6.	Сегнетоэлектрики .....	276
8.7.	Электреты .....	279
	Задачи .....	282

## Глава 9

### Основы зонной теории твердого тела .....

9.1.	Одноэлектронное приближение. Теорема Блоха .....	285
9.2.	Изменение состояния электронов при сближении атомов .....	289
9.2.1.	Энергетические зоны.....	289
9.3.	Приближение почти свободных электронов. Модель Кронига–Пенни..	294
9.4.	Структура энергетических зон .....	297
9.5.	Движение электрона в периодическом поле кристалла под действием внешнего поля. Эффективная масса электрона .....	302
9.6.	Примеси и примесные уровни .....	305
9.6.1.	Водородоподобная модель мелких уровней доноров и акцепторов	307
9.6.2.	Зонная структура неупорядоченных твердых тел .....	307
	Задачи .....	310

## Глава 10

### Электрические свойства твердых тел .....

10.1.	Плотность квантовых состояний в разрешенных зонах. Классиче- ский 3D-электронный газ .....	312
10.2.	Случай 2D-, 1D- и нульмерного электронного газа .....	314
10.2.1.	Плотность состояний в двумерной подзоне .....	315
10.2.2.	Плотность состояний в одномерном и нульмерном случаях .....	317
10.3.	Функции распределения электронов по энергиям .....	318
10.3.1.	Квантовая статистика Ферми–Дирака .....	318
10.3.2.	Классическая статистика Максвелла–Больцмана .....	319
10.4.	Концентрация носителей заряда для невырожденного и вырожден- ного электронного газа .....	319
10.4.1.	Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике...	320
10.4.2.	Концентрация электронов и дырок в примесном полупроводнике.....	321
10.4.3.	Концентрация электронов и дырок в разрешенных зонах для случая вырождения .....	322
10.5.	Энергия Ферми. Критерий вырождения электронного газа.....	323
10.6.	Проводимость металлов .....	326
10.6.1.	Типичные свойства металлов .....	327
10.6.2.	Свободные электроны и положительные атомные остатки (ионы) ....	328
10.6.3.	Хаотическое и упорядоченное движение электронов .....	328

10.7.	Классическая теория свободных электронов Друде–Лоренца.....	329
10.8.	Кинетическое уравнение Больцмана .....	332
10.9.	Дифференциальный закон Ома для невырожденного электронного газа.....	334
10.10.	Подвижность свободных носителей заряда при различных механиз- мах рассеяния.....	335
10.11.	Проводимость в полупроводниках .....	338
	Задачи .....	339

## Глава 11

	<b>Оптические свойства твердых тел .....</b>	<b>340</b>
11.1.	Взаимодействие электромагнитного излучения с твердым телом .....	340
11.2.	Оптические характеристики металлов, диэлектриков и полупровод- ников.....	341
11.3.	Генерация и рекомбинация в полупроводниках и диэлектриках .....	344
11.3.1.	Излучательная рекомбинация в прямозонных и непрямозонных полупроводниках.....	347
11.3.2.	Безызлучательная рекомбинация с участием глубоких примесей .....	350
11.3.3.	Экситоны Френкеля и Ванье–Мотта .....	351
11.4.	Уравнение непрерывности .....	356
11.5.	Электрон-фононные взаимодействия. Полярон Фрелиха .....	357
	Задачи .....	358

## Глава 12

	<b>Сверхпроводимость .....</b>	<b>359</b>
12.1.	Эффект Мейснера. Сверхпроводники первого и второго рода.....	360
12.2.	Изотопический эффект .....	363
12.3.	Элементы зонной теории сверхпроводимости Бардина–Купера– Шриффера. Куперовские пары.....	365
12.4.	Эффекты Джозефсона .....	369
12.5.	Высокотемпературная сверхпроводимость.....	372
12.6.	Применение сверхпроводников .....	377
	Задачи .....	379

## Глава 13

	<b>Равновесие фаз и фазовые переходы .....</b>	<b>380</b>
13.1.	Термодинамические потенциалы .....	383
13.1.1.	Условия фазового равновесия.....	385
13.2.	Классификация фазовых переходов.....	389
13.3.	Фазовые переходы в твердом состоянии.....	392
13.3.1.	Кристаллизация. Теория образования зародышей.....	401
13.3.2.	Роль межфазной границы при фазовых превращениях .....	405
13.4.	Стабильность фаз .....	407
13.5.	Фазовые переходы металл–диэлектрик.....	409

**Глава 14**

<b>Поверхностные и контактные явления в твердых телах</b> .....	414
14.1. Термоэлектронная эмиссия с поверхности твердых тел .....	414
14.1.1. Ток термоэлектронной эмиссии в равновесных условиях .....	414
14.1.2. Термодинамическая работа выхода в полупроводниках <i>p</i> - и <i>n</i> -ти- пов .....	416
14.1.3. Твердотельные приборы с электронно-дырочными переходами ....	417
14.1.4. Ток термоэлектронной эмиссии при наличии внешнего поля. Твердотельные катоды .....	426
14.2. Автоэлектронная эмиссия. Туннельные микроскопы .....	430
14.2.1. Туннельная инжекция через треугольный барьер .....	430
14.2.2. Коэффициент прозрачности для туннелирования через треугольный барьер .....	431
14.2.3. Учет закона дисперсии $E(k)$ при туннелировании через потен- циальный барьер .....	433
14.2.4. Ток туннельной инжекции через треугольный барьер .....	434
14.2.5. Ток туннельной инжекции через трапециидальный барьер .....	435
14.2.6. Туннельный микроскоп .....	436
14.3. Область пространственного заряда на поверхности. Твердотельные полевые приборы .....	438
14.3.1. Эффект поля .....	438
14.3.2. Область пространственного заряда (ОПЗ) в равновесных условиях ....	440
14.3.3. Заряд в области пространственного заряда .....	443
14.3.4. Типы и устройство полевых транзисторов .....	446
14.3.5. Принцип работы МДП-транзистора .....	447
14.3.6. Дискретные МДП-фотоприемники .....	448
14.3.7. Матрицы фотоприемников с зарядовой связью (ФПЗС) .....	450
Задачи .....	453
<b>Приложение А</b> .....	454
Работа выхода из металлов ( $\phi$ ) .....	454
Свойства диэлектриков .....	454
Универсальные физические постоянные .....	454
Полезные соотношения .....	454
Физические параметры важнейших полупроводников .....	455
<b>Приложение Б</b> .....	456
<b>Приложение В</b> .....	458
Нобелевские премии за работы по физике и химии твердого тела .....	458
<b>Решение задач</b> .....	472
<b>Список рекомендованной литературы</b> .....	505
<b>Основные обозначения</b> .....	511
<b>Предметный указатель</b> .....	514