

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к английскому изданию	12
Благодарности	14
Предисловие к изданию на русском языке	15

Глава 1

Диффузия: история изучения и библиография	17
1.1. Диффузия: первопроходцы и все	18
Список литературы	31
1.2. Библиография по диффузии в твердом теле	33

Часть I. Основы диффузии

Глава 2

Континуальная теория диффузии	38
2.1. Законы Фика в изотропной среде	38
2.1.1. Первый закон Фика	39
2.1.2. Уравнение непрерывности	40
2.1.3. Второй закон Фика — «уравнение диффузии»	41
2.2. Уравнение диффузии в различных системах координат	42
2.3. Законы Фика в анизотропной среде	43
Список литературы	45

Глава 3

Решения диффузионного уравнения	46
3.1. Стационарная диффузия	46
3.2. Одномерная нестационарная диффузия	48
3.2.1. Решение для тонких пленок	48
3.2.2. Протяженное начальное распределение и постоянная концентрация на поверхности	49
3.2.3. Метод преобразования Лапласа	52
3.2.4. Диффузия в плоской пластине — разделение переменных	54
3.2.5. Радиальная диффузия в цилиндре	57
3.2.6. Радиальная диффузия в сфере	58
3.3. Точечный источник в одном, двух и трех измерениях	59
Список литературы	60

Глава 4

Теория случайных блужданий и процесс атомных скачков	61
4.1. Случайные блуждания и диффузия	62
4.1.1. Упрощенная модель	62

4.1.2. Соотношение Эйнштейна—Смолуховского	63
4.1.3. Случайные блуждания в решетке	65
4.1.4. Коэффициент корреляции	67
4.2. Процесс атомных скачков	68
Список литературы	71
Глава 5	
Точечные дефекты в кристаллах	72
5.1. Чистые металлы	73
5.1.1. Вакансии	73
5.1.2. Дивакансии	75
5.1.3. Измерение свойств вакансий	76
5.1.4. Собственные междоузлия	81
5.2. Бинарные сплавы замещения	82
5.2.1. Вакансии в разбавленных сплавах	82
5.2.2. Вакансии в концентрированных сплавах	84
5.3. Ионные соединения	84
5.3.1. Дефекты по Френкелю	85
5.3.2. Дефекты по Шоттки	86
5.4. Интерметаллиды	87
5.5. Полупроводники	89
Список литературы	92
Глава 6	
Механизмы диффузии	94
6.1. Междоузельный механизм	94
6.2. Коллективные механизмы	95
6.3. Вакансионный механизм	97
6.4. Дивакансионный механизм	98
6.5. Эстафетный механизм	99
6.6. Междоузельно-узельные обменные механизмы	100
Список литературы	101
Глава 7	
Корреляции в твердотельной диффузии	103
7.1. Междоузельный механизм	104
7.2. Эстафетный механизм	105
7.3. Вакансионный механизм самодиффузии	106
7.3.1. «Эмпирическое правило»	106
7.3.2. Столкновения вакансий с мечеными атомами	106
7.3.3. Пространственные и временные корреляции	108
7.3.4. Вычисление коэффициентов корреляции	109
7.4. Коэффициенты корреляции самодиффузии	112
7.5. Диффузия растворенных атомов с участием вакансий	113
7.5.1. Гранецентрированные кубические растворители	114
7.5.2. Объемноцентрированные кубические растворители	116
7.5.3. Растворители с алмазной структурой	117
7.6. Заключение	118
Список литературы	120
Глава 8	
Зависимость диффузии от температуры и давления	122
8.1. Температурная зависимость	123

8.1.1. Соотношение Аррениуса	123
8.1.2. Активационные параметры — примеры	124
8.2. Зависимость от давления	127
8.2.1. Активационные объемы самодиффузии	129
8.2.2. Активационные объемы диффузии атомов растворенного вещества	132
8.2.3. Активационные объемы в ионных кристаллах	133
8.3. Корреляции между диффузией и объемными свойствами	134
8.3.1. Параметры плавления и диффузия	134
8.3.2. Активационные параметры и постоянные упругости	138
8.3.3. Использование корреляций	139
Список литературы	140
 Глава 9	
Влияние изотопного состава на диффузию	142
9.1. Механизмы с одиночным скачком	142
9.2. Коллективные механизмы	145
9.3. Эксперименты по измерению изотопного эффекта	146
Список литературы	149
 Глава 10	
Взаимная диффузия и эффект Киркендалла	151
10.1. Взаимная диффузия	151
10.1.1. Преобразование Больцмана	152
10.1.2. Метод Больцмана—Матано	153
10.1.3. Метод Зауэра—Фрейзе	155
10.2. Собственная диффузия и эффект Киркендалла	156
10.3. Уравнения Даркена	159
10.4. Уравнения Даркена—Машинга	160
10.5. Микроструктурная стабильность плоскости Киркендалла	162
Список литературы	164
 Глава 11	
Диффузия и внешние движущие силы	166
11.1. Краткий обзор	166
11.2. Уравнения Фика с учетом дрейфа	168
11.3. Соотношение Нернста—Эйнштейна	169
11.4. Соотношение Нернста—Эйнштейна для ионных проводников и отношение Хавена	170
11.5. Уравнение Нернста—Планка — взаимная диффузия в ионных кристаллах	173
11.6. Сравнение уравнения Нернста—Планка с уравнением Даркена	174
Список литературы	175
 Глава 12	
Термодинамика необратимых процессов и диффузия	177
12.1. Общие замечания	177
12.2. Феноменологические уравнения изотермической диффузии	179
12.2.1. Самодиффузия меченых атомов в элементарных кристаллах	179
12.2.2. Диффузия в бинарных сплавах	181
12.3. Феноменологические коэффициенты	184
12.3.1. Феноменологические коэффициенты, коэффициенты диффузии меченых атомов и модели скачков	187
12.3.2. Правила сумм — соотношения между феноменологическими коэффициентами	189
Список литературы	190

Часть II. Экспериментальные методы

Глава 13

Прямые методы изучения диффузии	192
13.1. Сравнение прямых и косвенных методов	192
13.2. Различные коэффициенты диффузии	195
13.2.1. Коэффициенты диффузии меченых атомов	195
13.2.2. Коэффициенты взаимной диффузии и собственные коэффициенты диффузии	197
13.3. Эксперименты по диффузии меченых атомов	198
13.3.1. Анализ профиля путем последовательного разделения на секции	200
13.3.2. Метод остаточной активности	204
13.4. Гетероструктуры с контролем изотопного состава	205
13.5. Вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС)	206
13.6. Электронно-зондовый рентгено-спектральный микроанализ (РСМА)	209
13.7. Оже-электронная спектроскопия (ОЭС)	211
13.8. Ионно-лучевые методы анализа: ОРР и МЯР	212
Список литературы	215

Глава 14

Механическая спектроскопия	218
14.1. Общие замечания	218
14.2. Неупругость и внутреннее трение	219
14.3. Методы механической спектроскопии	223
14.4. Примеры неупругих явлений, связанных с диффузией	224
14.4.1. Эффект Снука (релаксация Снука)	224
14.4.2. Эффект Зинера (релаксация Зинера)	227
14.4.3. Эффект Горского (релаксация Горского)	228
14.4.4. Механические потери в ион-проводящих стеклах	229
14.5. Магнитная релаксация	229
Список литературы	230

Глава 15

Ядерные методы	232
15.1. Общие замечания	232
15.2. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР)	232
15.2.1. Основные принципы ЯМР	233
15.2.2. Прямые измерения параметров диффузии методом ЯМР с градиентом поля	235
15.2.3. Релаксационные методы ЯМР	236
15.3. Мессбауэровская спектроскопия (МС)	242
15.4. Квазиупругое рассеяние нейтронов (КУРН)	246
15.4.1. Примеры исследований методом КУРН	253
15.4.2. Достоинства и ограничения методов МС и КУРН	255
Список литературы	256

Глава 16

Электрические методы	259
16.1. Импедансная спектроскопия	259
16.2. Профилирование методом измерения сопротивления растекания	263
Список литературы	265

Часть III. Диффузия в металлических материалах

Глава 17

Самодиффузия в металлах	267
17.1. Общие замечания	267



17.2. Кубические металлы	269
17.2.1. ГЦК-металлы — эмпирические факты	269
17.2.2. ОЦК-металлы — эмпирические факты	270
17.2.3. Интерпретация с учетом моновакансий	271
17.2.4. Интерпретация с учетом моно- и дивакансий	272
17.3. Гексагональные плотноупакованные и тетрагональные металлы	275
17.4. Металлы с фазовыми переходами	277
Список литературы	279

Глава 18

Диффузия междоузельных атомов растворенных веществ в металлах	281
18.1. «Тяжелые» междоузельные растворенные атомы С, N и О	281
18.1.1. Общие замечания	281
18.1.2. Экспериментальные методы	282
18.1.3. Междоузельная диффузия в разбавленных сплавах внедрения	283
18.2. Диффузия водорода в металлах	284
18.2.1. Общие замечания	284
18.2.2. Экспериментальные методы	285
18.2.3. Примеры диффузии водорода	287
18.2.4. Неклассические изотопные эффекты	290
Список литературы	291

Глава 19

Диффузия в разбавленных сплавах замещения	293
19.1. Диффузия примесей	293
19.1.1. «Нормальная» диффузия примесей	293
19.1.2. Диффузия примесей в Al	297
19.2. Диффузия примесей в «открытых» металлах — диссоциативный механизм	299
19.3. Диффузия атомов растворенного вещества и растворителя в сплавах	301
Список литературы	303

Глава 20

Диффузия в бинарных интерметаллидах	305
20.1. Общие замечания	305
20.2. Влияние переходов порядок—беспорядок	308
20.3. В2-интерметаллиды	309
20.3.1. Механизмы диффузии в фазе В2	310
20.3.2. Пример В2 NiAl	313
20.3.3. Пример В2 Fe—Al	315
20.4. L1 ₂ -интерметаллиды	316
20.5. D0 ₃ -интерметаллиды	319
20.6. Одноосные интерметаллиды	320
20.6.1. L1 ₀ -интерметаллиды	321
20.6.2. Дисилицид молибдена (структура C11 _d)	322
20.7. Фазы Лавеса	324
20.8. Правило Cu ₃ Au	326
Список литературы	326

Глава 21

Диффузия в квазикристаллических сплавах	329
21.1. Краткое введение в квазикристаллы	329

21.2. Диффузионные свойства квазикристаллов	331
21.2.1. Икосаэдрические квазикристаллы	332
21.2.2. Декагональные квазикристаллы	336
Список литературы	337

Часть IV. Диффузия в полупроводниках

Глава 22	
Общее введение в полупроводники	339
22.1. «Полупроводниковый век» и диффузия	340
22.2. Специфические черты диффузии в полупроводниках	343
Список литературы	346

Глава 23	
Самодиффузия в элементарных полупроводниках	347
23.1. Собственные точечные дефекты и диффузия	348
23.2. Германий	349
23.3. Кремний	353
Список литературы	356

Глава 24	
Диффузия примесных атомов в кремнии и германии	358
24.1. Предел растворимости и заполнение позиций в решетке	359
24.2. Коэффициенты диффузии и режимы диффузии	361
24.2.1. Междоузельная диффузия	361
24.2.2. Диффузия легирующих примесей	364
24.2.3. Диффузия гибридных примесных элементов	367
24.3. Самодиффузия и диффузия примесных атомов — резюме	368
Список литературы	369

Глава 25	
Междоузельно-узельная диффузия	371
25.1. Комбинированные механизмы диссоциативной диффузии и диффузии с вытеснением	371
25.1.1. Диффузия, ограниченная потоком собственных точечных дефектов	373
25.1.2. Диффузия, ограниченная потоком междоузельных атомов примеси	375
25.1.3. Численный анализ промежуточного случая	376
25.2. Механизм диффузии с вытеснением	377
25.2.1. Основные уравнения и два решения	377
25.2.2. Примеры диффузии с вытеснением	379
25.3. Диссоциативный механизм диффузии	384
25.3.1. Основные уравнения	384
25.3.2. Примеры диссоциативной диффузии	385
Список литературы	390

Часть V. Диффузия и проводимость в ионных кристаллах

Глава 26	
Ионные кристаллы	392
26.1. Общие замечания	392
26.2. Точечные дефекты в ионных кристаллах	394
26.2.1. Собственные точечные дефекты	395
26.2.2. Несобственные точечные дефекты	397



26.3. Методы исследования точечных дефектов и процессов переноса	399
26.4. Галогениды щелочных металлов	400
26.4.1. Движение дефектов, самодиффузия меченых атомов и ионная проводимость	400
26.4.2. Пример NaCl	404
26.4.3. Общие свойства галогенидов щелочных металлов	408
26.5. Галогениды серебра AgCl и AgBr	409
26.5.1. Самодиффузия и ионная проводимость	410
26.5.2. Влияние легирования	412
Список литературы	413

Глава 27

Суперионные проводники	415
27.1. Проводники с высокой проводимостью по ионам серебра	417
27.1.1. AgI и родственные простые анионные структуры	417
27.1.2. RbAgI ₃ и родственные соединения	419
27.2. PbF ₂ и другие галогенидные ионные проводники	419
27.3. Стабилизированный оксид циркония и родственные оксидные ионные проводники	420
27.4. Перовскитные оксидные ионные проводники	421
27.5. Натриевый β -глинозем и родственные материалы	421
27.6. Литиевые ионные проводники	423
27.7. Полимерные электролиты	424
Список литературы	427

Часть VI. Диффузия в стеклах

Глава 28

Стеклообразное состояние	429
28.1. Что такое стекло?	429
28.2. Диаграмма объем—температура	430
28.3. Диаграмма превращение—время—температура	432
28.4. Семейства стекол	433
Список литературы	437

Глава 29

Диффузия в металлических стеклах	438
29.1. Общие замечания	438
29.2. Релаксация структуры и диффузия	441
29.3. Диффузионные свойства металлических стекол	444
29.4. Диффузия и вязкость в сплавах, образующих стекла	450
Список литературы	452

Глава 30

Диффузия и ионная проводимость в оксидных стеклах	454
30.1. Общие замечания	454
30.2. Экспериментальные методы	459
30.3. Проникновение газов	461
30.4. Примеры диффузии и ионной проводимости	462
Список литературы	472

Часть VII. Диффузия вдоль каналов ускоренной диффузии и в наноматериалах

Глава 31

Каналы ускоренной диффузии в металлах	474
31.1. Общие замечания	474

31.2. Диффузионный спектр	475
31.3. Эмпирические правила для диффузии по границам зерен	476
31.4. Диффузия по решетке и микроструктурные дефекты	477
Список литературы	479
 Глава 32	
Диффузия по границам зерен	480
32.1. Общие замечания	480
32.2. Границы зерен	481
32.2.1. Мало- и большеугловые границы зерен	482
32.2.2. Специальные большеугловые границы	483
32.3. Диффузия вдоль изолированной границы (модель Фишера)	484
32.4. Кинетика диффузии в поликристаллах	492
32.4.1. Кинетический режим типа А	492
32.4.2. Кинетический режим типа В	494
32.4.3. Кинетический режим типа С	497
32.5. Диффузия вдоль границ зерен и сегрегация	498
32.6. Атомарные механизмы диффузии по границам зерен	501
Список литературы	502
 Глава 33	
Трубочная диффузия по дислокациям	504
33.1. Модель дислокационной трубки	505
33.2. Решения для средней концентрации в тонком слое	507
Список литературы	510
 Глава 34	
Диффузия в нанокристаллических материалах	512
34.1. Общие замечания	512
34.2. Синтез нанокристаллических материалов	513
34.2.1. Приготовление порошков	513
34.2.2. Сильная пластическая деформация	515
34.2.3. Химические методы синтеза и родственные методы	516
34.2.4. Расстеклование аморфных прекурсоров	517
34.3. Диффузия в поли- и нанокристаллах	517
34.3.1. Размеры зерен и режимы диффузии	518
34.3.2. Эффективные коэффициенты диффузии в поли- и нанокристаллах	522
34.4. Диффузия в нанокристаллических металлах	524
34.4.1. Общие замечания	524
34.4.2. Релаксация структуры и рост зерен	525
34.4.3. Наноматериалы с бимодальной структурой зерна	526
34.4.4. Границы зерен, образующие тройной стык	529
34.5. Диффузия и ионная проводимость в нанокристаллической керамике	529
Список литературы	534