

И. И. Новиков

Лауреат Государственной премии СССР

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР

Ученик и последователь выдающегося ученого-металловеда, академика АН СССР А. А. Бочвара, сменивший его в качестве заведующего кафедрой металловедения цветных металлов МИСиС (1965–1991)



К. М. Розин

Профессор кафедры физики кристаллов МИСиС

Автор открытия эффекта «Финкельштейна—Розина»

Один из создателей лаборатории по выращиванию водорастворимых монокристаллов для квантовой электроники



КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

УЧЕБНИК
с грифом
Государственного
комитета
СССР
по народному
образованию

Металловедение

И. И. Новиков, К. М. Розин

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Допущено
Государственным комитетом СССР
по народному образованию
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Металловедение, оборудование и технология
термической обработки металлов»

Издание второе



URSS

МОСКВА

ББК 22.371 30.3 34.1 34.2 34.3

**Новиков Илья Изриэлович,
Розин Константин Маркович**

Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. Изд. 2-е.
М.: ЛЕНАНД, 2021. — 336 с. (Классика инженерной мысли: металловедение.)

Рассмотрены методы индирования направлений и плоскостей в кристаллах и построения стереографических проекций. Изложены стандартные способы описания кристаллических структур и на основе кристаллохимических представлений даны характеристики важнейших структурных типов фаз в металлических сплавах; элементарная теория дефектов решетки, определяющих важнейшие свойства металлов и изменения их структуры при обработке и эксплуатации. Рассмотрены вакансии, межузельные атомы, дислокации, дисклинации, дефекты упаковки, мало- и высокоугловые границы, зернограницные дислокации и взаимодействие дефектов разного вида. Приведены задачи и упражнения, помогающие усвоить теоретические положения.

Рецензенты 1-го издания:

кафедра термообработки и физики металлов УПИ;
докт. хим. наук, проф. *А. А. Елисеев*

Формат 60×90/16. Печ. л. 21. Зак. № АР-0122.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978–5–9710–8306–1

(мягкий переплет)

ISBN 978–5–9710–8311–5

(твердый переплет)

© ЛЕНАНД, 2020



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к первому изданию	7
Введение	8
Часть 1. КРИСТАЛЛОГРАФИЯ	10
Глава I. Законы геометрической кристаллографии. Символы направлений и плоскостей	10
§ 1. Пространственная решетка	10
§ 2. Определение символов направлений и атомных рядов	12
1. Определение направления с помощью полярных координат	12
2. Метод стереографической проекции	13
3. Кристаллографическая сетка Вульфа	13
4. Определение символа направления в кристалле	14
§ 3. Определение символов плоскостей	17
1. Определение символа плоскости по отрезкам (параметрам)	17
2. Определение символа атомной плоскости по символам атомных рядов	20
3. Определение символа атомной плоскости по координатам трех узлов пространственной решетки	22
§ 4. Индицирование гексагональных и тригональных кристаллов	24
1. Индицирование плоскостей	25
2. Индицирование направлений	29
§ 5. Классы симметрии и координатные системы для описания кристаллов	30
1. Элементы симметрии кристаллических многогранников	30
2. Классы симметрии, сингонии, категории кристаллов. Координатные системы для описания кристаллов	32
§ 6. Зоны в кристаллах	51
Глава II. Структурная кристаллография и кристаллохимия	58
§ 7. Элементы симметрии кристаллических структур	58
§ 8. Пространственные группы симметрии кристаллических структур	69
1. Определение типа пространственной решетки Браве и правила выбора элементарной ячейки в кристаллической структуре	71
2. Определение символа пространственной группы симметрии	76
§ 9. Правильные системы точек и базис кристаллической структуры	78
1. Правильные системы точек	79
2. Базис кристаллической структуры	81
§ 10. Влияние различных факторов на кристаллическую структуру	84
1. Определение атомных радиусов	84
2. Определение ионных и ковалентных радиусов	86
3. Влияние кристаллохимических факторов на кристаллическую структуру	91
4. Влияние внешних факторов на кристаллическую структуру	94
§ 11. Плотнейшие шаровые упаковки в кристаллических структурах	98
1. Характеристики плотнейших шаровых упаковок	100
2. Правила определения плотнейших шаровых упаковок в кристаллических структурах	105
3. Координационные многогранники Полинга—Бедова	109
§ 12. Структурные типы фаз в металлических сплавах	110
1. Структурный тип меди (A1)	111
2. Структурный тип вольфрама или α -железа (A2)	111
3. Структурный тип магния (A3)	111
4. Структурный тип алмаза (A4)	112
5. Структурный тип белого олова (A5)	112
6. Структурный тип NiAs (B8)	113

7. Структурный тип CsCl (B2)	113
8. Структурный тип CaF ₂ (C1)	113
9. Структурный тип AuCu ₃ (L1 ₂)	113
10. Структурный тип θ -CuAl ₂ (C16)	114
11. Структурный тип MgCu ₂ (C15)	115
12. Структурный тип MgZn ₂ (C14)	116
13. Структурный тип MgNi ₂ (C36)	117
§ 13. Эпитаксиальные и двойниковые кристаллические структуры	117
1. Эпитаксиальные кристаллические структуры	117
2. Двойниковые кристаллические структуры	122
Часть 2. ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ	127
Глава III. Точечные дефекты	127
§ 14. Виды точечных дефектов	127
§ 15. Термодинамика точечных дефектов	130
§ 16. Миграция точечных дефектов	133
1. Миграция вакансий	133
2. Миграция межузельных атомов	135
3. Миграция примесных атомов	136
§ 17. Источники и стоки точечных дефектов	137
§ 18. Комплексы точечных дефектов	137
1. Вакансионные комплексы	138
2. Комплексы собственный дефект—примесный атом	140
§ 19. Поведение вакансий при закалке и отжиге	142
1. Закалка	142
2. Отжиг	143
§ 20. Методы определения концентрации вакансий, энергии их образования и миграции	144
1. Концентрация вакансий и энергия их образования	144
2. Энергия активации миграции вакансий	147
Глава IV. Основные типы дислокаций и их движение	148
§ 21. Краевая дислокация	148
§ 22. Скольжение краевой дислокации	151
§ 23. Переползание краевой дислокации	156
§ 24. Винтовая дислокация	158
§ 25. Скольжение винтовой дислокации	162
§ 26. Смешанные дислокации и их движение	165
§ 27. Призматические дислокации	170
§ 28. Вектор Бюргера	172
§ 29. Плотность дислокаций	178
§ 30. Методы выявления дислокаций в металлах	178
1. Метод ямок травления	179
2. Дифракционная (просвечивающая) электронная микроскопия	180
Глава V. Упругие свойства дислокаций	183
§ 31. Энергия дислокации	183
§ 32. Силы, действующие на дислокацию	187
§ 33. Упругое взаимодействие параллельных краевых дислокаций	189
§ 34. Упругое взаимодействие параллельных винтовых дислокаций	192
Глава VI. Дислокации в типичных металлических структурах	193
§ 35. Подразделение дислокаций на полные и частичные	193
§ 36. Энергетический критерий дислокационных реакций	195
§ 37. Дефекты упаковки	196
§ 38. Характерные полные (единичные) дислокации	202
1. Полные дислокации в г. п. решетке	202

2. Полные дислокации в г.ц.к. решетке	206
3. Полные дислокации в о.ц.к. решетке	208
§ 39. Частичные дислокации Шокли. Растянутые дислокации	210
1. Частичные дислокации Шокли в г.п. решетке	210
2. Частичные дислокации Шокли в г.ц.к. решетке	216
3. Частичные дислокации Шокли в о.ц.к. решетке	219
4. Ширина растянутых дислокаций	221
§ 40. Частичные дислокации Франка	223
§ 41. Стандартный тетраэдр и дислокационные реакции в г.ц.к. решетке	226
1. Стандартный тетраэдр Томпсона	226
2. Вершинные дислокации и дислокации Ломер — Коттрелла	230
3. Тетраэдр дефектов упаковки	233
§ 42. Стандартная бипирамида и дислокационные реакции в г.п. решетке	234
§ 43. Дислокационные реакции в о.ц.к. решетке	236
§ 44. Поперечное скольжение и переползание растянутых дислокаций	240
§ 45. Двойникующая дислокация	243
§ 46. Дислокации в упорядоченных сплавах	245
Глава VII. Пересечение дислокаций	247
§ 47. Пересечение единичных дислокаций	247
1. Пересечение краевых дислокаций	247
2. Пересечение краевой и винтовой дислокаций	250
3. Пересечение винтовых дислокаций	251
§ 48. Движение дислокаций с порогами	253
§ 49. Пересечение растянутых дислокаций	255
Глава VIII. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами	257
§ 50. Взаимодействие дислокаций с примесными атомами	257
1. Атмосферы Коттрелла	257
2. Атмосферы Снука	261
3. Атмосферы Сузуки	262
§ 51. Взаимодействие дислокаций с вакансиями и межузельными атомами	262
Глава IX. Образование дислокаций	264
§ 52. Происхождение дислокаций	264
§ 53. Размножение дислокаций при пластической деформации	267
1. Источник Франка—Рида	267
2. Источник Бардина—Херринга	272
Глава X. Дисклинация	273
§ 54. Дисклинация в непрерывной упругой среде	273
§ 55. Дисклинация в кристаллической решетке	276
Глава XI. Границы зерен и субзерен	279
§ 56. Малоугловые границы	279
§ 57. Высокоугловые границы	283
1. Специальные и произвольные границы	284
2. Зернограничные дислокации	288
Глава XII. Торможение дислокаций	293
§ 58. Сила Пайерлса	293
§ 59. Торможение дислокаций при их взаимодействии с другими дислокациями и границами зерен	295
§ 60. Торможение дислокаций дисперсными частицами	298
1. Выгибание дислокаций между дисперсными частицами	298
2. Локальное поперечное скольжение	299

3. Перерезание дислокациями дисперсных частиц	300
§ 61. Торможение дислокаций атомами примесей и легирующих элементов	301
1. Торможение дислокаций атмосферами Коттрелла, Сузуки и Снука	301
2. Торможение дислокаций в твердых растворах	302
Задачи и упражнения к части 1	303
Задачи и упражнения к части 2	305
Приложение А. Определение нормали к плоскости (<i>hkl</i>)	311
Приложение Б. Обратная пространственная решетка и расчетные формулы для определения межплоскостных расстояний и углов между направлениями	312
Приложение В. Преобразование символов направлений и плоскостей при изменении выбора элементарной ячейки	317
Приложение Г. Построение стандартных стереографических проекций	319
Приложение Д. Формулы для кристаллографических расчетов	320
Приложение Е. Кристаллическая структура металлов, неметаллов и двойных соединений	322
Рекомендуемый библиографический список	332
Предметный указатель	333