

УДК 620.22  
ББК 30.3я7  
Б81

*Серия основана в 2009 г.*

**Рецензенты:**

заместитель заведующего кафедрой вакуумной электроники  
Московского физико-технического института  
(государственного университета)  
доктор ф.-м. наук, профессор Е. П. Шешин  
заведующий кафедрой техники и электрофизики высоких  
напряжений Томского политехнического университета  
доктор ф.-м. наук, профессор В. В. Лопатин

**Бондаренко Г. Г.**

Б81 Основы материаловедения : учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко ; под ред. Г. Г. Бондаренко. — 4-е изд., испр., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2023. — 763 с. — (Учебник для высшей школы). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-93208-667-4

Настоящий учебник является одним из наиболее полных современных учебных изданий по материаловедению. В нем систематизированы фундаментальные сведения о строении и физико-химических свойствах, фазовых превращениях и физических процессах широкого спектра материалов, в том числе наноструктурированных, рассмотрены методы исследования их структуры и свойств. Широко проиллюстрированы возможности применения наноструктур для решения разнообразных технических задач. Приведенные в приложении к учебнику тестовые задания с вариативными ответами предназначены для промежуточного и итогового контроля, повышения эффективности усвоения изучаемого материала.

Для студентов и аспирантов, специализирующихся в области физики конденсированных сред и материаловедения, а также специалистов различных областей техники и технологий.

УДК 620.22  
ББК 30.3я7

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Основы материаловедения : учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко ; под ред. Г. Г. Бондаренко. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. — 760 с. : ил. — (Учебник для высшей школы). — ISBN 978-5-9963-0639-8.

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-93208-667-4

© Лаборатория знаний, 2015

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> . . . . .	9
<b>Глава 1. Управление качеством промышленной продукции и материалы технического назначения</b> . . . . .	11
1.1. Показатели качества . . . . .	13
1.2. Управление качеством и жизненный цикл продукции . . . . .	16
1.3. Нормативно-правовая база управления качеством . . . . .	20
<b>Глава 2. Атомно-кристаллическое строение материалов</b> . . . . .	23
2.1. Типы химических связей . . . . .	23
2.2. Аморфные и кристаллические тела . . . . .	25
2.3. Типы кристаллических решеток . . . . .	26
2.4. Индексы Миллера . . . . .	30
2.5. Индексы Миллера–Бравэ . . . . .	32
2.6. Анизотропия свойств кристаллов . . . . .	34
2.7. Кристаллизация . . . . .	34
2.8. Классификация дефектов кристаллического строения материалов . . . . .	36
2.9. Точечные дефекты . . . . .	36
2.10. Дислокации . . . . .	42
2.10.1. Краевая дислокация . . . . .	43
2.10.2. Винтовая дислокация . . . . .	44
2.10.3. Вектор Бюргерса и его свойства . . . . .	46
2.10.4. Смешанные дислокации . . . . .	47
2.10.5. Движение дислокаций . . . . .	48
2.10.6. Плотность дислокаций . . . . .	52
2.10.7. Энергия дислокации . . . . .	55
2.10.8. Сила, действующая на дислокацию . . . . .	55
2.10.9. Образование и размножение дислокаций . . . . .	56
2.11. Двумерные (поверхностные) дефекты кристаллов . . . . .	60
2.11.1. Границы зерен и субзерен . . . . .	60
2.11.2. Дефекты упаковки . . . . .	63
2.12. Частичные дислокации . . . . .	66
2.13. Призматические и сидячие дислокационные петли . . . . .	68
2.14. Дислокация (барьер) Ломер–Коттрелла . . . . .	71
2.15. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами . . . . .	72
2.16. Объемные (трехмерные) дефекты . . . . .	77
2.17. Энергетические дефекты . . . . .	77
2.18. Особенности дефектов кристаллической структуры в неметаллических материалах . . . . .	78
2.19. Собственные точечные дефекты в ионных кристаллах . . . . .	79
2.20. Центры окраски . . . . .	81
2.20.1. Электронные центры окраски . . . . .	81
2.20.2. Дырочные центры окраски . . . . .	82
2.21. Экситоны . . . . .	83

2.22. Дислокации в ионных кристаллах . . . . .	85
2.23. Особенности поведения точечных дефектов в полупроводниковых материалах . . . . .	88
2.24. Дислокации в полупроводниковых материалах . . . . .	91
<b>Глава 3. Элементы теории сплавов . . . . .</b>	<b>95</b>
3.1. Химические соединения . . . . .	96
3.2. Твердые растворы . . . . .	97
3.3. Эвтектики . . . . .	98
3.4. Правило фаз. . . . .	99
3.5. Фазовые диаграммы равновесия. . . . .	100
3.5.1. Фазовая диаграмма равновесия эвтектического типа системы двух компонентов, неограниченно взаимно растворимых в жидком состоянии и нерастворимых в твердом . . . . .	101
3.5.2. Правило отрезков . . . . .	106
3.5.3. Фазовая диаграмма равновесия системы двух компонентов, неограниченно взаимно растворимых в жидком и твердом состояниях . . . . .	107
3.5.4. Фазовая диаграмма равновесия эвтектического типа системы двух компонентов, неограниченно взаимно растворимых в жидком состоянии и ограниченно растворимых в твердом . . . . .	109
3.5.5. Фазовая диаграмма равновесия перитектического типа системы двух компонентов, неограниченно взаимно растворимых в жидком состоянии и ограниченно растворимых в твердом . . . . .	112
3.5.6. Фазовые диаграммы равновесия систем двух компонентов, неограниченно взаимно растворимых в жидком состоянии и образующих химическое соединение . . . . .	114
3.5.7. Фазовые диаграммы равновесия систем двух компонентов, претерпевающих полиморфные превращения . . . . .	116
3.6. Влияние пластической деформации на структуру и свойства металлов и сплавов . . . . .	118
3.7. Влияние нагрева на структуру и свойства деформированных металлов и сплавов . . . . .	120
3.7.1. Возврат металлов и сплавов . . . . .	121
3.7.2. Рекристаллизация металлов и сплавов . . . . .	122
3.8. Термическая обработка металлов и сплавов . . . . .	125
3.8.1. Виды термической обработки . . . . .	125
3.8.2. Отжиг первого рода . . . . .	126
3.8.3. Отжиг второго рода . . . . .	128
3.8.4. Закалка. . . . .	129
3.8.5. Отпуск и старение . . . . .	130
3.8.6. Параметры термообработки . . . . .	132
3.8.7. Термообработка и фазовые диаграммы. . . . .	133
3.9. Химико-термическая и термомеханическая обработка металлов и сплавов . . . . .	134
3.10. Применение термической, химико-термической и термомеханической обработки металлов и сплавов . . . . .	135
<b>Глава 4. Электрические свойства твердых тел . . . . .</b>	<b>138</b>
4.1. Электрические свойства металлических материалов. . . . .	141
4.2. Электрические свойства тонких металлических пленок. . . . .	145
4.3. Контактная разность потенциалов и термо-ЭДС . . . . .	147

4.4. Электрические свойства полупроводников . . . . .	147
4.4.1. Электропроводность полупроводников . . . . .	152
4.4.2. Электронно-дырочный переход ( $p-n$ -переход) . . . . .	154
4.5. Электрические свойства диэлектриков . . . . .	156
<b>Глава 5. Магнитные свойства твердых тел . . . . .</b>	<b>159</b>
5.1. Характеристики магнитных свойств . . . . .	159
5.2. Классификация материалов по магнитным свойствам. . . . .	161
5.3. Доменная структура ферромагнетиков . . . . .	163
5.4. Магнитная анизотропия . . . . .	164
5.5. Намагничивание и перемангничивание. Петля гистерезиса . . . . .	165
5.6. Магнитные свойства в переменных полях . . . . .	169
5.7. Зависимость магнитных свойств от температуры . . . . .	170
<b>Глава 6. Тепловые свойства твердых тел . . . . .</b>	<b>172</b>
<b>Глава 7. Диэлектрические свойства материалов . . . . .</b>	<b>176</b>
7.1. Поляризация диэлектриков . . . . .	176
7.1.1. Характеристики поляризации . . . . .	178
7.1.2. Классификация диэлектриков . . . . .	181
7.1.3. Поляризация диэлектриков в электрическом поле . . . . .	182
7.1.4. Поляризация диэлектриков при отсутствии электрического поля. Спонтанная (самопроизвольная) поляризация . . . . .	188
7.1.5. Зависимость диэлектрической проницаемости от различных факторов. . . . .	189
7.2. Диэлектрические потери . . . . .	190
7.2.1. Характеристики диэлектрических потерь . . . . .	191
7.2.2. Виды диэлектрических потерь . . . . .	194
7.3. Электрическая прочность твердых диэлектриков. . . . .	199
7.3.1. Виды пробоя в твердых диэлектриках . . . . .	199
7.3.2. Электрический пробой . . . . .	200
7.3.3. Тепловой (электротепловой) пробой . . . . .	201
7.3.4. Другие виды пробоя . . . . .	202
7.3.5. Влияние различных факторов на электрическую прочность. . . . .	202
<b>Глава 8. Механические и технологические свойства твердых тел . . . . .</b>	<b>206</b>
8.1. Механические свойства . . . . .	206
8.1.1. Общие понятия и механические характеристики . . . . .	206
8.1.2. Упругая деформация. Модули упругости. . . . .	211
8.1.3. Неупругие явления. . . . .	214
8.1.4. Эффект Баушингера . . . . .	224
8.1.5. Пластическая деформация материалов. . . . .	226
8.1.6. Деформационное упрочнение . . . . .	232
8.1.7. Деформационное старение . . . . .	238
8.1.8. Упрочнение сплавов частицами второй фазы . . . . .	239
8.1.9. Особенности пластической деформации поликристаллических материалов . . . . .	240
8.1.10. Теоретическая и реальная прочность материалов. . . . .	243
8.1.11. Разрушение . . . . .	244
8.1.12. Ползучесть . . . . .	256
8.1.13. Сверхпластичность . . . . .	262

8.1.14. Усталость . . . . .	264
8.1.15. Изнашивание . . . . .	273
8.1.16. Твердость . . . . .	275
8.1.17. Прочность и пластичность неметаллических материалов . . . . .	276
8.2. Технологические свойства . . . . .	277
<b>Глава 9. Проводниковые и резистивные материалы . . . . .</b>	<b>281</b>
9.1. Материалы высокой проводимости . . . . .	281
9.2. Материалы низкой проводимости (высокоомные, или резистивные). . . . .	283
9.3. Металлические проводниковые и резистивные материалы для электроники . . . . .	285
9.4. Сверхпроводящие материалы . . . . .	287
<b>Глава 10. Полупроводниковые материалы . . . . .</b>	<b>292</b>
10.1. Тенденции развития полупроводниковой микроэлектроники . . . . .	292
10.2. Общие сведения о технологии полупроводников . . . . .	296
10.3. Методы получения монокристаллов полупроводниковых материалов . . . . .	298
10.3.1. Коэффициент сегрегации . . . . .	300
10.3.2. Методы направленной кристаллизации . . . . .	300
10.3.3. Методы зонной кристаллизации . . . . .	302
10.3.4. Методы кристаллизации из раствора и газовой фазы . . . . .	304
10.4. Методы эпитаксиального наращивания полупроводниковых пленок . . . . .	305
10.4.1. Жидкофазная эпитаксия . . . . .	306
10.4.2. Газофазная эпитаксия . . . . .	306
10.4.3. Молекулярно-лучевая эпитаксия . . . . .	307
10.4.4. Контроль качества эпитаксиальных слоев . . . . .	308
10.5. Планиарная технология . . . . .	308
10.5.1. Процессы получения тонких пленок . . . . .	309
10.5.2. Процессы травления . . . . .	310
10.5.3. Процессы легирования . . . . .	311
10.5.4. Литографические процессы . . . . .	314
10.6. Основные группы полупроводниковых материалов . . . . .	316
10.7. Элементарные полупроводники . . . . .	316
10.7.1. Элементарные полупроводники IV группы Периодической системы. Германий, кремний . . . . .	318
10.7.2. Элементарные полупроводники других групп . . . . .	325
10.8. Полупроводниковые соединения . . . . .	327
10.8.1. Полупроводниковые соединения типа $A^3B^5$ . . . . .	328
10.8.2. Полупроводниковые соединения типа $A^2B^6$ . . . . .	333
10.8.3. Другие полупроводниковые соединения . . . . .	335
10.9. Органические полупроводники . . . . .	336
<b>Глава 11. Диэлектрические материалы . . . . .</b>	<b>340</b>
11.1. Эксплуатационные свойства диэлектриков . . . . .	340
11.2. Классификация диэлектриков . . . . .	342
11.3. Твердые органические электроизоляционные и конденсаторные материалы . . . . .	344
11.3.1. Пластмассы . . . . .	344
11.3.2. Полимеры . . . . .	345
11.3.3. Эластомеры . . . . .	362
11.3.4. Электроизоляционные лаки, эмали, компаунды . . . . .	367
11.4. Твердые неорганические электроизоляционные и конденсаторные материалы . . . . .	369
11.4.1. Электроизоляционные стекла . . . . .	369

11.4.2. Ситаллы (стеклокерамика) . . . . .	373
11.4.3. Электротехническая керамика . . . . .	376
11.4.4. Материалы подложек интегральных микросхем . . . . .	382
11.5. Активные (нелинейные) диэлектрики . . . . .	382
11.5.1. Материалы твердотельных лазеров . . . . .	383
11.5.2. Сегнетоэлектрики . . . . .	384
11.5.3. Пьезоэлектрики . . . . .	386
11.5.4. Электреты . . . . .	388
11.5.5. Жидкокристаллические материалы . . . . .	390
<b>Глава 12. Магнитные материалы . . . . .</b>	<b>395</b>
12.1. Классификация магнитных материалов . . . . .	395
12.2. Металлические магнитно-мягкие материалы . . . . .	400
12.3. Магнитно-мягкие ферриты . . . . .	402
12.4. Металлические магнитно-твердые материалы . . . . .	403
12.5. Магнитно-твердые ферриты . . . . .	405
12.6. Металлопорошковые материалы . . . . .	405
12.7. Магнитодиэлектрики . . . . .	406
12.8. Материалы для магнитных носителей информации . . . . .	406
12.9. Нанокристаллические магнитные материалы . . . . .	411
<b>Глава 13. Конструкционные материалы . . . . .</b>	<b>414</b>
13.1. Сплавы системы «железо—углерод» . . . . .	415
13.1.1. Общая характеристика . . . . .	422
13.1.2. Углеродистые стали . . . . .	423
13.1.3. Термическая обработка стали . . . . .	426
13.1.4. Сверхупругость и эффект памяти формы . . . . .	440
13.1.5. Химико-термическая обработка стали . . . . .	444
13.1.6. Холодная пластическая деформация . . . . .	445
13.1.7. Чугуны . . . . .	446
13.1.8. Легированные стали . . . . .	448
13.2. Цветные металлы и сплавы . . . . .	451
13.2.1. Медь и сплавы на ее основе . . . . .	452
13.2.2. Алюминий и сплавы на его основе . . . . .	460
13.2.3. Магний и сплавы на его основе . . . . .	472
13.2.4. Титан и сплавы на его основе . . . . .	475
13.2.5. Бериллий и сплавы на его основе . . . . .	479
13.2.6. Припой . . . . .	481
13.3. Специальные конструкционные металлические материалы . . . . .	483
13.3.1. Коррозионностойкие стали и сплавы . . . . .	484
13.3.2. Жаропрочные стали и сплавы . . . . .	500
13.3.3. Жаростойкие стали и сплавы . . . . .	505
13.4. Неметаллические конструкционные материалы . . . . .	509
13.5. Композиционные конструкционные материалы . . . . .	512
13.5.1. Неорганические композиционные материалы . . . . .	513
13.5.2. Пластики . . . . .	515
<b>Глава 14. Нанообъекты и наноструктурированные материалы . . . . .</b>	<b>526</b>
14.1. Терминология и исходные понятия . . . . .	527
14.2. Строение и свойства нанообъектов . . . . .	534
14.2.1. Графит . . . . .	534
14.2.2. Алмаз . . . . .	535
14.2.3. Карбин . . . . .	535

14.2.4. Графен . . . . .	536
14.2.5. Фуллерены и фуллереноподобные нанообъекты . . . . .	543
14.2.6. Нанотрубки и родственные нанообъекты . . . . .	558
14.2.7. Астралены . . . . .	594
14.2.8. Квантовые нанообъекты . . . . .	595
14.3. Методы получения нанообъектов и наноструктурированных материалов . . . . .	602
14.3.1. Плазменный метод . . . . .	603
14.3.2. Метод лазерной абляции . . . . .	608
14.3.3. Метод каталитического разложения углеводородов . . . . .	610
14.3.4. Другие методы получения нанообъектов . . . . .	612
14.4. Механизмы образования нанообъектов . . . . .	618
14.5. Примеры практического применения и перспективы использования нанообъектов и наноструктурированных материалов . . . . .	621
14.5.1. Использование наноматериалов в машиностроении . . . . .	622
14.5.2. Использование наноматериалов в электронике . . . . .	626
14.5.3. Применение наноматериалов в энергетике и на транспорте . . . . .	633
14.5.4. Применение наноматериалов в приборостроении . . . . .	639
14.5.5. Использование наноматериалов в химической отрасли . . . . .	644
14.5.6. Применение наноматериалов в строительной индустрии . . . . .	644
14.5.7. Использование наноматериалов в медицине . . . . .	647
14.5.8. Применение наноматериалов в других отраслях промышленности и в быту . . . . .	649
<b>Глава 15. Методы анализа материалов . . . . .</b>	<b>656</b>
15.1. Электронно-лучевые методы . . . . .	656
15.1.1. Просвечивающая электронная микроскопия . . . . .	658
15.1.2. Растровая электронная микроскопия . . . . .	666
15.1.3. Электронная оже-спектроскопия . . . . .	676
15.1.4. Рентгеновский микроанализ . . . . .	680
15.1.5. Автоионная проекционная микроскопия . . . . .	686
15.2. Сканирующие зондовые методы исследования . . . . .	688
15.2.1. Сканирующая туннельная микроскопия . . . . .	689
15.2.2. Атомно-силовая микроскопия . . . . .	694
15.2.3. Магнитосиловая зондовая микроскопия . . . . .	696
15.3. Квантовые методы . . . . .	696
15.3.1. Микроскопия ближнего поля . . . . .	696
15.3.2. Конфокальная микроскопия . . . . .	701
15.3.3. Фотолуминесцентный анализ . . . . .	704
15.3.4. Рентгеноструктурный анализ . . . . .	708
15.3.5. Метод комбинационного рассеяния . . . . .	713
15.4. Ионно-лучевые методы . . . . .	715
15.4.1. Спектроскопия обратного рассеяния Резерфорда . . . . .	716
15.4.2. Ионный микроанализ и ионная масс-спектрометрия . . . . .	720
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>727</b>
<b>Приложение . . . . .</b>	<b>729</b>
Тестовые задания . . . . .	729
<b>Ответы к тестовым заданиям . . . . .</b>	<b>746</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>748</b>