

УДК 539.21:539.1.043  
ББК 22.37+22.38я73  
Б81

# **Бондаренко Г. Г.**

Б81 Радиационная физика, структура и прочность твердых тел : учебное пособие / Г. Г. Бондаренко. — 3-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2025. — 465 с. — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-93208-837-1

Настоящее учебное пособие посвящено описанию физических основ взаимодействия высокоэнергетических излучений с веществом, сущности и закономерностям радиационно-индуцированных процессов, протекающих в облученных твердых телах, — образованию первичных структурных дефектов и их эволюции, фокусировке атомных столкновений и каналированию частиц, структурно-фазовым превращениям в сплавах, трансмутационным эффектам, электризации диэлектриков, набуханию, радиационному охрупчиванию и ползучести, нонному распылению, радиационному блистерингу и др. Особое внимание уделено созданию малоактивированных материалов, а также технологическим применениям радиационной обработки и модифицирования материалов.

Для студентов, аспирантов и специалистов в области радиационной и космической физики, прикладной физики, физического материаловедения, наноматериалов и нанотехнологий, твердотельной и вакуумной электроники, наноэлектроники, экологических проблем радиационной безопасности.

УДК 539.21:539.1.043  
ББК 22.37+22.38я73

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Радиационная физика, структура и прочность твердых тел : учебное пособие / Г. Г. Бондаренко. — М. : Лаборатория знаний, 2016. — 462 с. : ил. — ISBN 978-5-906828-06-4.

**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 978-5-93208-837-1

© Лаборатория знаний, 2016

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>9</b>
<b>Глава 1. Общие представления о структурных дефектах в кристаллических твердых телах .....</b>	<b>12</b>
1.1. Точечные дефекты.....	13
1.2. Дислокации.....	20
1.3. Границы зерен и субзерен .....	29
1.4. Дефекты упаковки .....	32
1.5. Стандартный тетраэдр Томпсона.....	37
1.6. Дислокация (барьер) Ломер—Коттрелла.....	38
1.7. Тетраэдры дефектов упаковки.....	39
1.8. Трехмерные дефекты .....	42
1.9. Примесные атмосферы.....	43
Список литературы .....	44
<b>Глава 2. Прочность и пластичность твердых тел .....</b>	<b>46</b>
2.1. Механические свойства и характеристики материалов (общие определения) .....	46
2.2. Диаграммы напряжение—деформация .....	48
2.3. Напряженное и деформированное состояния .....	51
2.3.1. Тензор напряжений .....	51
2.3.2. Тензор деформации .....	54
2.4. Упругие и релаксационные свойства твердых тел.....	60
2.4.1. Упругие свойства .....	60
2.4.2. Релаксационные явления и свойства .....	65
2.5. Эффект Баушингера.....	75

2.6. Пластическая деформация материалов .....	76
2.6.1. Пластическая деформация скольжением .....	77
2.6.2. Пластическая деформация двойникованием.....	80
2.7. Сверхпластичность .....	83
2.8. Прочность, упрочнение и разупрочнение материалов .....	85
2.8.1. Теоретическая и реальная прочность материалов .....	85
2.8.2. Деформационное упрочнение .....	87
2.8.3. Деформационное старение .....	93
2.8.4. Движение дислокаций с порогами .....	94
2.8.5. Упрочнение сплавов частицами второй фазы .....	95
2.9. Твердость и микротвердость .....	96
2.10. Особенности пластической деформации поликристаллических материалов.....	97
2.11. Влияние пластической деформации на структуру и свойства металлов и сплавов .....	100
2.12. Влияние нагрева на структуру и свойства деформированных металлов и сплавов.....	102
2.13. Разрушение .....	106
2.14. Жаропрочность .....	118
2.15. Усталость и изнашивание .....	125
2.15.1. Усталость.....	125
2.15.2. Изнашивание.....	134
Список литературы .....	136

### **Глава 3. Общие закономерности радиационного дефектообразования в твердых телах .....**

3.1. Этапы процесса радиационной повреждаемости твердых тел .....	138
3.2. Определение энергии первично выбитого атома.....	139
3.3. Потенциалы взаимодействия .....	144
3.4. Сечение взаимодействия.....	147
3.5. Каскад столкновений .....	152
3.5.1. Образование и развитие каскада.....	152
3.5.2. Влияние эффектов фокусировки атомных столкновений и каналирования частиц в кристаллах на каскадную функцию.....	155

3.5.3. Структура каскада.....	157
3.5.4. Атермические перестройки в каскаде.....	160
3.6. Энергетические потери движущихся частиц .....	161
Список литературы .....	166

## **Глава 4. Особенности взаимодействия различных видов ионизирующих излучений с твердыми телами .....**

4.1. Нейтроны .....	168
4.2. Ускоренные ионы .....	170
4.2.1. Образование атомных смещений .....	170
4.2.2. Пробег ионы и профили их распределения в твердых телах. Влияние эффекта каналирования.....	172
4.2.3. Эффект теней (блокировки).....	183
4.2.4. Дефектообразование и трекообразование в твердых телах при воздействии высокоэнергетических тяжелых ионов .....	186
4.3. Высокоэнергетические электроны .....	199
4.4. Гамма-кванты .....	203
Список литературы .....	209

## **Глава 5. Точечные радиационные дефекты и их скопления в облученных кристаллических материалах .....**

5.1. Образование точечных радиационных дефектов и их скоплений .....	210
5.2. Исследование образования и поведения скоплений радиационных дефектов при облучении материалов в колонне высоковольтного электронного микроскопа.....	223
5.3. Отжиг радиационных дефектов .....	234
Список литературы .....	238

## **Глава 6. Радиационно-индуцированные и радиационно-стимулированные процессы в твердых телах .....**

6.1. Радиационно-стимулированная диффузия .....	241
6.2. Ионное перемешивание и имплантация атомами отдачи.....	250
6.3. Эффект дальнего действия .....	255

6.4. Процессы сегрегации и сепарации компонентов сплавов.....	264
6.4.1. Термическая поверхностная сегрегация (сегрегация Гиббса) .....	265
6.4.2. Радиационно-индуцированная сегрегация .....	267
6.4.3. Радиационно-индуцированная сепарация атомов в сплавах .....	273
6.4.4. Потееющие сплавы.....	274
6.5. Радиационно-индуцированные и радиационно-стимулированные структурно-фазовые изменения в сплавах .....	284
6.6. Трансмутационные эффекты и ядерное легирование материалов.....	300
6.7. Радиационная электризация диэлектрических материалов.....	306
Список литературы .....	311
<b>Глава 7. Радиационное распухание материалов .....</b>	<b>313</b>
7.1. Влияние различных факторов на процесс распухания.....	314
7.1.1. Влияние температуры облучения.....	314
7.1.2. Влияние дозы облучения.....	316
7.1.3. Влияние скорости введения радиационных дефектов и типа бомбардирующих частиц .....	319
7.1.4. Влияние дислокационной структуры .....	321
7.1.5. Влияние двумерных дефектов.....	323
7.1.6. Влияние напряженного состояния материала .....	325
7.1.7. Влияние газовых примесей .....	327
7.2. Образование решетки пор в структуре облученного материала .....	332
7.3. Пути подавления радиационного распухания материалов .....	334
Список литературы .....	337
<b>Глава 8. Влияние радиационного воздействия на прочность и пластичность твердых тел .....</b>	<b>339</b>
8.1. Механизмы радиационного упрочнения.....	341
8.2. Зависимость радиационного упрочнения от дозы облучения.....	344
8.3. Влияние температуры облучения и испытания материалов на радиационное упрочнение .....	348

8.4. Низкотемпературное радиационное охрупчивание .....	353
8.5. Восстановление механических свойств облученных материалов при пострадиационном отжиге.....	361
8.6. Высокотемпературное радиационное охрупчивание .....	363
Список литературы .....	368
<b>Глава 9. Радиационная ползучесть материалов .....</b>	<b>370</b>
9.1. Общее описание радиационной ползучести, влияние на нее различных факторов.....	370
9.2. Теоретические представления .....	376
Список литературы .....	380
<b>Глава 10. Распыление материалов при облучении .....</b>	<b>382</b>
10.1. Введение.....	382
10.2. Теория распыления .....	383
10.3. Коэффициент распыления и его зависимость от различных параметров .....	385
10.4. Преимущественное распыление .....	393
10.5. Ионное травление поверхности материала при распылении .....	396
10.6. Распыление материалов под действием нейтронов.....	400
10.7. Химическое распыление .....	401
10.8. Радиационная эрозия материалов при образовании униполярных дуг .....	408
Список литературы .....	409
<b>Глава 11. Радиационный блистеринг .....</b>	<b>412</b>
11.1. Введение .....	412
11.2. Влияние различных факторов на блистеринг .....	413
11.2.1. Влияние дозы облучения .....	413
11.2.2. Влияние энергии бомбардирующих ионов .....	420
11.2.3. Влияние температуры облучения .....	421
11.2.4. Влияние кристаллографической ориентации мишени.....	423
11.2.5. Влияние угла падения ионов.....	424
11.2.6. Влияние термомеханической обработки материала .....	424
11.2.7. Влияние напряженного состояния материала при облучении.....	425

11.3. Особенности водородного блистеринга .....	428
11.4. Синергетические эффекты.....	429
11.5. Влияние блистеринга на радиационно-стимулированное испарение материалов .....	430
11.6. Теория блистеринга .....	432
11.7. Способы подавления блистеринга .....	437
11.8. Smart cut-технология создания КНИ-структур .....	439
Список литературы .....	443
<b>Глава 12. Малоактивируемые материалы .....</b>	<b>445</b>
12.1. Влияние различных факторов на активационные параметры МАМ .....	445
12.2. Методы уменьшения наведенной радиоактивности конструкционных материалов.....	447
Список литературы .....	452
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>454</b>