

Э. В. Суворов

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ: МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА

2-е издание, переработанное и дополненное

Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим и естественнонаучным направлениям

Допущено УМО по образованию в области материаловедения, технологии материалов и покрытий в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Материаловедение и технологии материалов»

Допущено УМО по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Физическое материаловедение»

Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru

Москва ■ Юрайт ■ 2018

УДК 67.017(075.8)
ББК 30.3я73
С89

Автор:

Суворов Эрнест Витальевич — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики твердого тела Российской академии наук, профессор факультета фундаментальной физико-химической инженерии Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Рецензенты:

Антонов В. Е. — профессор, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики высоких давлений Института физики твердого тела Российской академии наук;

Аронин А. С. — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией структурных исследований Института физики твердого тела Российской академии наук.

Суворов, Э. В.

С89 **Материаловедение: методы исследования структуры и состава материалов : учеб. пособие для академического бакалавриата / Э. В. Суворов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 180 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс).**

ISBN 978-5-534-06011-9

В пособии рассмотрены физические основы теории дифракции, основные методы рентгеновской дифракционной топографии, высоко разрешающей электронной микроскопии, растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа. В конце каждой главы приводятся контрольные вопросы и задания, а также рекомендуемая литература. В конце пособия помещен ряд приложений, в которых приводятся сведения, необходимые для успешного овладения изучаемой дисциплиной.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим и естественнонаучным направлениям.

Российская академия наук
БИБЛИОТЕКА
НАУЧНОГО ЦЕНТРА
в Черноголовке

УДК 67.017(075.8)
ББК 30.3я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-06011-9

© Суворов Э. В., 2011
© Суворов Э. В., 2018, с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2018

Оглавление

Предисловие	6
Глава 1. Физика дифракции на трехмерных периодических структурах	9
1.1. Основные понятия физики дифракции	9
1.2. Основные положения кинематического приближения теории рассеяния.....	14
1.2.1. Интерференционная функция Лауэ.....	14
1.2.2. Обратная решетка. Геометрическая интерпретация условий дифракции	21
1.2.3. Дифракция на сложной решетке с базисом. Структурная амплитуда	23
1.3. Рассеяние в неупорядоченных системах.....	25
1.3.1. Рассеяние на случайном скоплении рассеивающих центров.....	25
1.3.2. Атомный фактор рассеяния	27
1.3.3. Влияние температуры на амплитуду рассеяния	33
1.3.4. Рассеяние на молекулах разреженного газа. Уравнение Дебая ...	35
1.3.5. Радиальная функция межатомных расстояний	37
1.4. Основные положения динамического приближения теории рассеяния ...	39
1.4.1. Волновое поле в совершенном кристалле	39
1.4.2. Двухволновое приближение в совершенном кристалле	44
1.4.3. Важнейшие следствия динамической теории рассеяния	48
1.4.4. Волновое поле в кристаллах с искажениями. Уравнения Такаги — Топена	51
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>54</i>
<i>Рекомендуемая литература</i>	<i>55</i>
Глава 2. Рентгеновская дифракционная микроскопия	56
2.1. Методы рентгеновской топографии	56
2.1.1. Основные характеристики методов рентгеновской топографии ...	56
2.1.2. Классификация типов контраста	60
2.1.3. Применение рентгеновских топографических методов.....	64
2.2. Механизмы образования рентгеновского дифракционного контраста дефектов.....	68
2.2.1. Основные проблемы анализа дифракционного изображения дефектов	68
2.2.2. Природа дифракционного изображения дислокаций	69
2.2.3. Дифракционный контраст, формируемый дальним полем дислокаций	71

2.2.4. Механизмы формирования изображения ближнего поля дислокаций	75
Контрольные вопросы и задания	80
Рекомендуемая литература	80
Глава 3. Электронная микроскопия высокого разрешения.....	82
3.1. Краткий экскурс в историю вопроса	82
3.2. Физические основы оптической микроскопии.....	83
3.2.1. Основные характеристики оптических систем.....	83
3.2.2. Амплитудный и фазовый контраст.....	88
3.3. Формирование изображения в оптической системе	91
3.3.1. Микроскоп как дифракционный прибор. Подход Э. Аббе.....	91
3.3.2. Передаточная функция оптической системы.....	93
3.4. Анализ aberrаций в электронном микроскопе	95
3.4.1. Тонкий фазовый объект в электронной микроскопии	95
3.4.2. Анализ передаточной функции электронного микроскопа	96
3.4.3. Метод оптического дифрактометра для экспериментального исследования передаточной функции.....	99
3.5. Применение электронной микроскопии высокого разрешения в физике твердого тела	100
Контрольные вопросы и задания	105
Рекомендуемая литература	105
Глава 4. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ.....	107
4.1. Основные принципы работы растрового электронного микроскопа ...	107
4.2. Устройство растрового электронного микроскопа.....	109
4.2.1. Формирование электронного зонда	110
4.2.2. Детекторы вторичных сигналов в растровом электронном микроскопе.....	113
4.3. Взаимодействие электронного пучка с веществом	115
4.3.1. Основные механизмы потерь энергии электронов в веществе ...	116
4.3.2. Основные источники сигналов, используемых для формирования изображения в растровом электронном микроскопе ...	117
4.3.3. Область взаимодействия электронов зонда с веществом мишени.....	125
4.4. Формирование контраста в растровом электронном микроскопе	127
4.4.1. Основные механизмы формирования изображения в растровом электронном микроскопе	127
4.4.2. Методы обработки видеосигнала в растровом электронном микроскопе.....	130
4.5. Применение растровой электронной микроскопии	132
4.6. Рентгеновский микроанализ	137
4.6.1. Методы регистрации рентгеновского спектра.....	137
4.6.2. Принципы количественного рентгеноспектрального микроанализа	141

Контрольные вопросы и задания	143
Рекомендуемая литература	144
Заключение.....	146
Список литературы	149
Приложение 1. Длины волн K-серий элементов, употребляемых в качестве анодов в рентгеноструктурном анализе	152
Приложение 2. Вывод интерференционной функции Лауэ	153
Приложение 3. Индексы Миллера. Обратная решетка и ее свойства ...	155
Приложение 4. Уравнения Лауэ и их связь с векторной формой уравнения дифракции.....	159
Приложение 5. Погасания рефлексов для примитивной, гранцентрированной и объемно-центрированной решеток.....	161
Приложение 6. Установочные брэгговские углы для кремния (решетка кремния кубическая с параметром $a = 5,4306 \text{ \AA}$) и соответствующие экстинкционные длины (Λ) для двух длин волн ...	162
Приложение 7. Примеры решения типовых задач.....	163