

УДК 537.533.3(075)
ББК 22.33я7

Вознесенский Э. Ф.

Методы структурных исследований материалов. Методы микроскопии : учебное пособие / Э. Ф. Вознесенский, Ф. С. Шарифуллин, И. Ш. Абдуллин; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2014. – 184 с.

ISBN 978-5-7882-1545-7

Рассмотрены основные методы исследования структуры материалов, параметры микроструктуры и способы ее визуализации. Особое внимание уделено методам микроскопии, применяемым в материаловедении, таким как оптическая, электронная и зондовая. Приведены сведения о дополнительных и специальных микроскопических методах.

Предназначено для студентов всех форм обучения по направлениям подготовки 152200.62 «Наноинженерия», 150100.62 «Материаловедение и технология материалов» (профиль «Материаловедение и технология наноматериалов»), а также может быть полезно для научных работников, преподавателей и аспирантов вузов.

Подготовлено на кафедре плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета

Рецензенты: д-р геол.-минерал. наук *Т. З. Лыгина*
д-р физ.-мат. наук *В. С. Желтухин*

ISBN 978-5-7882-1545-7

© Вознесенский Э. Ф., Шарифуллин Ф. С.,
Абдуллин И. Ш., 2014

© Казанский национальный исследовательский
технологический университет, 2014

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение..... | 3 |
| 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ | 4 |
| 1.1. Современные методы структурных исследований..... | 4 |
| 1.2. Различия аналитических методов по видам получаемой информации..... | 5 |
| | 5 |
| 1.3. Взаимодействие излучений с веществом..... | 6 |
| 1.4. Способы визуализации в микроскопии..... | 12 |
| 1.5. Особенности визуализации в микроскопии..... | 14 |
| 1.6. Визуальное наблюдение..... | 19 |
| 1.7. Наблюдение с помощью оптического микроскопа..... | 20 |
| 1.8. Электронная микроскопия..... | 20 |
| 1.9. Сканирующая зондовая микроскопия..... | 22 |
| 2. МИКРОСТРУКТУРА..... | 23 |
| 2.1. Связь структуры и свойств..... | 25 |
| 2.2. Масштабные уровни структуры..... | 25 |
| 2.3. Параметры микроструктуры..... | 27 |
| 2.4. Кристаллические и аморфные фазы..... | 33 |
| 3. ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ..... | 36 |
| 3.1. Области применения оптической микроскопии..... | 36 |
| 3.2. Формирование оптического изображения..... | 37 |
| 3.3. Разрешающая способность и числовая апертура..... | 38 |
| 3.4. Конструкция микроскопа..... | 39 |
| 3.5. Построение и регистрация оптического изображения..... | 44 |
| 3.6. Подготовка образца..... | 46 |
| 3.7. Контраст изображения..... | 49 |
| 3.8. Специальные оптические методы..... | 55 |
| 3.8.1. Флуоресцентная микроскопия..... | 55 |
| 3.8.2. Интерференционная микроскопия..... | 58 |
| 3.8.3. Поляризационная микроскопия..... | 60 |
| 3.8.4. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия... | 62 |
| 4. ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ..... | 65 |
| 4.1. Растровая электронная микроскопия (РЭМ, СЭМ, SEM)..... | 66 |
| 4.1.1. Особенности визуализации сигналов в РЭМ..... | 69 |
| 4.1.2. Особенности метода растровой электронной микроскопии..... | 71 |
| | 71 |

| | |
|--|-----|
| 4.1.3. Составные части растровых электронных микроскопов..... | 75 |
| | 75 |
| 4.1.4. Формирование контраста в РЭМ..... | 78 |
| 4.1.5. Методы обработки видеосигнала в РЭМ..... | 82 |
| 4.1.6. Методы пробоподготовки в РЭМ..... | 84 |
| 4.1.7. Специальные методы растровой электронной микроскопии. Сканирующая электронная микроскопия в нормальных условиях..... | 87 |
| 4.2. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)..... | 87 |
| 4.2.1 Основы метода ПЭМ..... | 87 |
| 4.2.2 Взаимодействие между электронами и материалом в ПЭМ..... | 89 |
| 4.2.3. Составные части просвечивающих электронных микроскопов..... | 92 |
| 4.2.4. Виды контраста в ПЭМ..... | 99 |
| 4.2.5. Методы пробоподготовки в аналитической просвечивающей электронной микроскопии..... | 102 |
| 4.2.6. Специальные методы просвечивающей электронной микроскопии. Сканирующая просвечивающая электронная микроскопия (СПЭМ)..... | 108 |
| | 108 |
| 4.3. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ)..... | 109 |
| | 109 |
| 4.3.1. Спектрометры СХПЭЭ..... | 110 |
| 4.3.2. Особенности анализа методом СХПЭЭ..... | 113 |
| 4.3.3. Анализ спектров СХПЭЭ..... | 114 |
| 4.3.4. Методы энергетической фильтрации электронов..... | 117 |
| 4.4. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДРА, ЭДС, EDS, EDX, EDSX) | 120 |
| 4.4.1. Эмиссия характеристического рентгеновского излучения..... | 120 |
| | 120 |
| 4.4.2. Рентгеновские детекторы и принцип их действия..... | 121 |
| 4.4.3. Анализ элементного состава образцов методом ЭДРА..... | 123 |

| | |
|--|-----|
| 4.5. Приставки к электронным микроскопам для различных аналитических методов..... | 126 |
| 5. СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ..... | 129 |
| 5.1 Конструктивные элементы сканирующих зондовых микроскопов..... | 133 |
| 5.2 Формирование и обработка СЗМ изображений..... | 137 |
| 5.3 Методы сканирующей зондовой микроскопии..... | 141 |
| 5.3.1 Сканирующая туннельная микроскопия..... | 141 |
| 5.3.2. Атомно-силовая микроскопия..... | 144 |
| 5.3.3. Дополнительные и специальные СЗМ методы..... | 149 |
| 6. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МИКРОСКОПИИ..... | 155 |
| 6.1. Методы полевой микроскопии..... | 155 |
| 6.1.1. Полевой электронный микроскоп..... | 156 |
| 6.1.1. Полевая ионная микроскопия..... | 159 |
| 6.2. Рамановская микроскопия..... | 161 |
| 6.3. Когерентная оптическая томография..... | 163 |
| 6.4. Рентгеновская микроскопия, томография и микрофотография..... | 164 |
| 6.4.1. Микроскопы, использующие мягкое рентгеновское излучение..... | 164 |
| 6.4.2. Рентгеновская микрорадиография..... | 165 |
| 6.4.3. Рентгеновская микрофотография..... | 166 |
| 6.5. Ультразвуковая и сканирующая акустическая микроскопия.. | 168 |
| 6.5.1. Сканирующая акустическая микроскопия..... | 169 |
| 6.5.2. Сканирующие системы, измеряющие время распространения ультразвука..... | 170 |
| 6.5.3. Ультразвуковая трехмерная картография констант упругости композиционных материалов..... | 170 |
| Заключение..... | 171 |
| Библиографический список..... | 172 |