

537.5
Б14

А. Г. Багмут, И. А. Багмут

ВВЕДЕНИЕ В ПРОСВЕЧИВАЮЩУЮ ЭЛЕКТРОННУЮ МИКРОСКОПИЮ "IN SITU"



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

А. Г. Багмут, И. А. Багмут

**ВВЕДЕНИЕ В ПРОСВЕЧИВАЮЩУЮ
ЭЛЕКТРОННУЮ МИКРОСКОПИЮ «*IN SITU*»**

Учебное пособие

по курсу «Методы электронно-микроскопического анализа материалов»
для студентов специальностей «Прикладная физика и наноматериалы»
и «Материаловедение»,
в том числе для иностранных студентов

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 1 от 19.02.2020 г.

Харьков
2020

УДК 548.4/620.18

Б14

Рецензенты:

С. И. Шевченко, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Лауреат государственной премии Украины,
вед. науч. сотр. ФТИНТ НАНУ;

В. М. Береснев, д-р техн. наук, проф.,
Харьковского национального университета
им. В. Н. Каразина

У посібнику теоретичні та практичні методи просвічувальної електронної мікроскопії. Матеріал ілюстровано практичними прикладами, до всіх розділів наведена рекомендована література. Описано результати роботи авторів у галузі мікроскопії тонких плівок і фазових перетворень.

Для аспірантів та студентів фізико-технічних спеціальностей, наукових працівників.

Багмут А. Г.

Б14 Введение в просвечивающую электронную микроскопию «in situ» : учеб. пособ. / А. Г. Багмут, И. А. Багмут.

Харьков : издательство ООО «В деле», 2020. 176 с. На русск. яз.

ISBN 978-617-7305-44-5

В пособии изложены теоретические и практические методы просвечивающей электронной микроскопии. Материал иллюстрирован практическими примерами, во всех разделах приведена необходимая литература. Описаны результаты работ авторов в области микроскопии тонких пленок и фазовых превращений.

Для аспирантов и студентов физико-технических специальностей, научных работников.

Ил. 114. Табл. 12. Библиогр. : 38 найм.

УДК 548.4/620.18

ISBN 978-617-7305-44-5

© А. Г. Багмут,
И. А. Багмут, 2020.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ.....	6
1.1. Электронный луч.....	6
1.2. Преломление электронных лучей.....	8
1.3. Фокусировка электронных лучей.....	9
1.4. Несовершенства (абберации) магнитных линз.....	13
1.5. Предельное разрешение ПЭМ.....	16
1.6. Глубина резкости ПЭМ.....	19
1.7. Рассеяние электронов.....	20
1.7.1. Упругое рассеяние электронов на изолированном атоме.....	20
1.7.2. Рассеяние электронов на элементарной ячейке кристалла.....	22
1.7.3. Сфера Эвальда и дифракционная ошибка.....	23
1.7.4. Влияние структурного фактора на дифракцию электронов...	25
1.7.5. Амплитуда волны, дифрагированной на совершенном кристалле.....	28
Контрольные вопросы.....	31
Литература.....	32
2. ПРОСВЕЧИВАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП.....	33
2.1. Основные составляющие ПЭМ.....	33
2.2. Режимы работы микроскопа.....	34
2.3. Калибровка ПЭМ.....	38
2.3.1. Калибровка увеличения.....	39
2.3.2. Калибровка угла поворота микроскопического изображения относительно дифракционной картины.....	40
2.3.3. Определение дифракционной постоянной микроскопа, работающего в режиме электронографа.....	41
2.3.4. Определение дифракционной постоянной микроскопа, работающего в режиме микродифракции.....	42
Контрольные вопросы.....	45

Литература.....	46
3. Контраст электронно-микроскопического изображения.....	47
3.1. Толщинный контраст.....	48
3.2. Дифракционный контраст.....	52
3.2.1. Полосы толщинных контуров.....	52
3.2.2. Полосы изгибных контуров.....	57
3.2.3. Деформационный контраст от несовершенных кристаллов....	60
3.3. Фазовый контраст.....	63
3.3.1. Изображения плоскостей кристаллической решетки.....	63
3.3.2. Муаровые полосы.....	67
3.4. Магнитный контраст (лоренцева микроскопия).....	72
Контрольные вопросы.....	77
Литература.....	78
4. Фазоконтрастные изображения дефектов в кристаллах Sb_2S_3	79
4.1. Вопросы методики.....	80
4.1.1. Получение и кристаллизация пленок.....	80
4.1.2. Изображение плоскостей и дефокусировка объективной линзы микроскопа.....	82
4.2. Дефекты упаковки в кристаллах Sb_2S_3	88
4.3. Границы зерен в кристаллах Sb_2S_3	92
4.3.1. Малоугловые границы.....	92
4.3.2. Высокоугловые границы.....	96
Контрольные вопросы.....	101
Литература.....	102
5. Структурно-фазовые превращения, инициированные воздействиями «IN SITU».....	103
5.1. Объемные изменения при фазовых превращениях.....	103
5.1.1. Определение относительного изменения плотности вещества.....	104
5.1.2. Статистический анализ результатов измерений.....	106
5.2. Тепловая инициация структурных изменений.....	111
5.2.1. Термическая деструкция фторопластовых пленок.....	111

5.2.2. Кристаллизация и деструкция пленок аморфного рения.....	115
5.3. Полиморфное превращение в пленках никеля.....	116
5.3.1. Структурно-фазовое состояние пленок Ni.....	118
5.3.2. Превращения при отжиге.....	120
5.3.3. Изменения плотности и магнитных характеристик.....	122
Контрольные вопросы.....	127
Литература.....	128
6. ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ КИНЕМАТОГРАФИЯ	
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНЫХ ПЛЕНОК.....	129
6.1. Классификация превращений при электронно-лучевой кристаллизации.....	129
6.1.1. Кристаллизационные моды.....	129
6.1.2. Относительная длина кристаллизации.....	132
6.2. Получение пленок и видеорегистрация кристаллизации «in situ».....	134
6.3. Слоевая полиморфная кристаллизация.....	135
6.3.1. Дискородные кристаллы.....	136
6.3.2. Серповидные кристаллы.....	139
6.3.3. Игольчатые кристаллы.....	143
6.3.4. Автоэпитаксия.....	146
6.3.5. О движении границы кристалл - аморфная фаза при слоевой полиморфной кристаллизации.....	150
6.4. Островковая полиморфная кристаллизация (ОПК).....	153
6.4.1. Кристаллизация аморфных пленок диоксида циркония.....	154
6.4.2. Кристаллизация аморфных пленок Yb ₂ O ₃	157
6.5. Дендритная полиморфная кристаллизация.....	160
6.5.1. Кинетика двустадийной кристаллизации аморфных пленок HfO ₂	162
6.5.2. Кинетика одностадийной кристаллизации аморфных пленок HfO ₂	165
6.5.3. Геометрический отбор среди кристаллов, формирующих дендритные ветви HfO ₂	166
Контрольные вопросы.....	170
Литература.....	171