

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени В. Н. КАРАЗИНА

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Учебное пособие

Харьков – 2013

УДК 539.143:620.193(075.8)

ББК 22.383я73

Я 34

Рецензенты:

П. И. Стоев – доктор физико-математических наук, профессор (Национальный научный центр «ХФТИ»);

С. Д. Лавриненко – доктор физико-математических наук, профессор (Национальный научный центр «ХФТИ»).

*Утверждено к печати решением Ученого совета
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина
(протокол № 13 от 28.12.2011 г.)*

Я 34 **Ядерно-физические** методы в материаловедении : учебное пособие / [Н. А. Азаренков, В. Г. Кириченко, В. В. Левенец И. М. Неклюдов]. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. – 300 с.

ISBN 978-966-816-315-9

В пособии изложены основы ядерно-физических методов анализа в материаловедении. Рассмотрены фундаментальные принципы элементного анализа с помощью ядерно-физических методов, регистрации сверхтонких взаимодействий и результаты усовершенствования методики наблюдения ЯФМ. Приведены многочисленные примеры использования ядерно-физических методов анализа элементного и фазового состава различных функциональных материалов.

Для студентов старших курсов, аспирантов и научных работников.

Табл. 21. Ил. 179. Библиогр. 92 назв.

УДК 539.143.49:620.193

ББК 22.385

ISBN 978-966-816-315-9

© Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина, 2013

© Азаренков Н. А., Кириченко В. Г.,
Левенец В. В., Неклюдов И. М., 2013

© Будник О. В., дизайн обложки, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ И АКТИВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА.....	10
§ 1.1. Мгновенные ЯФМА.....	10
§ 1.2. Метод резерфордовского обратного рассеяния (РОР).....	12
§ 1.3. Метод мгновенных ядерных реакций (МЯР).....	15
§ 1.4. Метод характеристического рентгеновского излучения (ХРИ).....	19
§ 1.5. Метод вторичного рентгеновского излучения (РХХ).....	23
§ 1.6. Метод ядер отдачи (ЯО).....	25
§ 1.7. Ядерная микроскопия (ядерный микрозонд). Исследование пространственного распределения элементов.....	28
§ 1.8. ЯФМА на выведенном в атмосферу пучке.....	29
§ 1.9. Активационный анализ.....	30
§ 1.10. Нейтронно-активационный анализ.....	31
§ 1.11. Активационный анализ на заряженных частицах.....	34
§ 1.12. Фотоактивационный анализ.....	37
§ 1.13. Совместное использование методов.....	40
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ СВЕРХТОНКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ.....	45
§ 2.1. Сверхтонкие взаимодействия и в твердых телах.....	45
§ 2.2. Мессбауэровская спектроскопия (ядерный гамма- резонанс) твердых тел.....	47
§ 2.2.1. Параметры мессбауэровской спектроскопии.....	47
§ 2.2.2. Динамика колебаний атомов.....	52
§ 2.2.3. Диффузия и релаксация.....	53
§ 2.2.4. Форма и ширина линии. Принцип измерения.....	55
§ 2.2.5. Методика ядерной гамма-резонансной спектроскопии в геометрии пропускания γ -квантов.....	56
§ 2.2.6. Методика обсчета мессбауэровских спектров и методика «черного поглотителя» учета нерезонансного фона. Измерение изомерных сдвигов.....	58
§ 2.2.7. Мессбауэровская спектроскопия конверсионных электронов.....	60
§ 2.2.8. Методы регистрации электронов конверсии.....	62

§ 2.2.9.	Анализаторы энергии электронов конверсии.....	67
§ 2.3.	Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР).....	69
§ 2.3.1.	Методы наблюдения ЭПР.....	70
§ 2.3.2.	Пути повышения чувствительности микроволновых радиоспектроскопов.....	74
§ 2.3.3.	Применение электронного парамагнитного резонанса.....	74
§ 2.4.	Спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР).....	76
§ 2.4.1.	Теория ядерного магнитного резонанса.....	77
§ 2.4.2.	Ядерная восприимчивость.....	83
§ 2.4.3.	Спектрометры ядерного магнитного резонанса.....	85
§ 2.4.4.	Методы и применение ЯМР.....	88
§ 2.5.	Сверхтонкие взаимодействия, угловое распределение и угловые корреляции ядерного гамма-излучения.....	90
§ 2.6.	Сопоставление методик регистрации сверхтонких взаимодействий.....	96
ГЛАВА 3.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ЯФМА.....	102
§ 3.1.	Экспериментальное оборудование	102
§ 3.1.1.	Аналитический ядерно-физический комплекс «Сокол».....	102
§ 3.1.2.	Ускоритель и выходные устройства.....	104
§ 3.1.3.	Камера «ХРИ».....	105
§ 3.1.4.	Установка «Рентген».....	105
§ 3.1.5.	Универсальная камера.....	106
§ 3.1.6.	Протонный микрозонд.....	106
§ 3.1.7.	Канал облучения материалов.....	107
§ 3.2.	Определение легких примесей в тяжелой матрице.....	110
§ 3.2.1.	Выбор и исследование материала рентгеновского фильтра.....	111
§ 3.2.2.	Моделирование функции пропускания фильтра.....	113
§ 3.2.3.	Экспериментальные исследования фильтров.....	116
§ 3.3.	Анализ тяжелых элементов методом ХРИ по регистрации излучения К-серии.....	122
§ 3.3.1.	Матричные эффекты и определение поглощения ХРИ.....	123
§ 3.3.2.	Учет вторичных процессов при возбуждении атомов мишени	123
§ 3.3.3.	Количественный элементный анализ методом ХРИ по К-серии.....	126
§ 3.3.3.1.	Абсолютный способ.....	128
§ 3.3.3.2.	Относительный способ.....	130

§ 3.3.4.	Влияния пробоподготовки на результат анализа.....	134
§ 3.3.5.	Оптимизация проведения анализа.....	136
§ 3.3.5.1.	Выбор энергии протонов.....	136
§ 3.3.5.2.	Ток пучка протонов.....	137
§ 3.3.5.3.	Поглотители.....	137
§ 3.4.	Методика регистрации вторичного характеристического рентгеновского излучения. Фоновые условия.....	138
§ 3.4.1.	Многослойная мишень.....	141
§ 3.5.	ЯФМА на выведенном пучке с использованием установки «Рентген».....	143
§ 3.5.1.	Система отклонения пучка (режекции).....	146
§ 3.5.2.	Использование СОП на АЯФК «Сокол».....	149
§ 3.5.3.	Измерение заряда и форма пучка на воздухе.....	150
§ 3.6.	Определение профиля концентрации (метод МИЯР).....	154
§ 3.6.1.	Определение профиля Al по реакции $^{27}Al(p, \gamma)^{28}Si$	154
§ 3.6.1.1.	Моделирование профилей имплантации ионов алюминия в цирконии.....	155
§ 3.6.1.2.	Экспериментальное исследование профилей алюминия.....	156
§ 3.7.	Исследование профиля распределения аргона в Zr и Zr-1%Nb.....	160
ГЛАВА 4.	ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА МЕТАЛЛОВ И СТАЛЕЙ.....	169
§ 4.1.	Анализ и определение толщины пленочных покрытий на поверхности металлов и полупроводников.....	170
§ 4.1.1.	Определение толщины слоя методом ХРИ.....	171
§ 4.1.2.	Определение профиля концентрации (метод ХРИ). Обратные задачи. Метод максимального правдоподобия.....	174
§ 4.2.	Ядерно-физический анализ сталей.....	180
§ 4.2.1.	Мессбауэровский фазовый анализ железорудных материалов и продуктов металлургического передела.....	181
§ 4.2.2.	Мессбауэровское исследование $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при термомеханической обработке и облучении сталей.....	199
§ 4.3.	Влияние ионной и лазерной обработки на поверхность сталей.....	205
§ 4.4.	Мессбауэровское исследование сварных швов сталей 06X16H15M3B и 12X18H10T.....	212
§ 4.5.	Исследование коррозии сталей X18H10T и ЭИ-847 в нитрине и жидком натрии.....	215

ГЛАВА 5.	ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ Zr И СПЛАВОВ НА ЕГО ОСНОВЕ.....	222
§ 5.1.	Определение элементного состава и анализ циркония и соединений.....	222
§ 5.1.1.	Определение металлических примесей методом ХРИ.....	225
§ 5.1.2.	Определение газовых примесей методом МИЯР.....	233
§ 5.1.3.	Исследование распределения элементов в слитке Zr1%Nb после ЭЛП.....	238
§ 5.1.4.	Исследование распределения элементов в слитке Zr1%Nb после ВДП.....	245
§ 5.2.	Ядерно-физический анализ сплавов циркония.....	246
§ 5.2.1.	Техника эксперимента	248
§ 5.2.2.	Фазовые превращения в сплавах Zr	250
§ 5.3.	Моделирование ядерных трансмутационных эффектов и их влияние на состав интерметаллидов в циркониевых сплавах.....	250
§ 5.4.	Сегрегация интерметаллических фаз в сплавах циркония...	258
§ 5.5.	Влияние ионного облучения на структуру интерметаллидов в сплаве Zr-Fe ⁵⁷	264
§ 5.6.	Влияние легирования на коррозионную стойкость циркониевых сплавов.....	269
§ 5.7.	Влияние импульсного лазерного облучения на структуру поверхностных слоев циркониевых сплавов.....	284
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	296