

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 |