

543.42  
М 69

Флуоресценция

Дифракция

Флуоресценция

И.Ф. Михайлов

А.А. Батурин

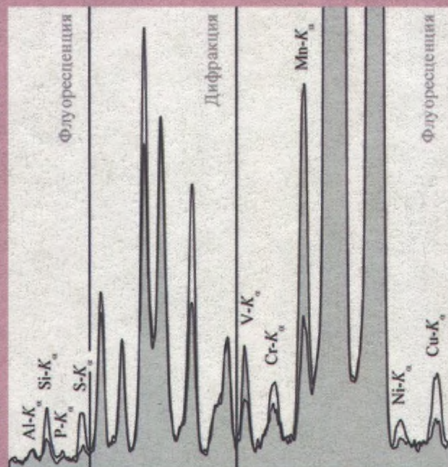
А.И. Михайлов

Рассеяние

Rayleigh

# РЕНТГЕНОВСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ

МОНОГРАФИЯ



Compton

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«Харьковский политехнический институт»

**И. Ф. Михайлов, А. А. Батурин, А. И. Михайлов**

# **РЕНТГЕНОВСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ**

**Монография**

**Харьков  
Підручник НТУ «ХПІ»  
2015**

УДК 543.427.4 : 543.442.2 : 543.442.3

ББК 24.4

М69

Рецензенты:

*И. Е. Проценко*, д-р физ.-мат. наук, проф., Заслуженный деятель науки и техники,  
зав. каф. прикладной физики Сумского государственного университета,

*Е. Н. Зубарев*, д-р физ.-мат. наук, проф., Национальный технический  
университет «ХПИ»

Издается по решению Ученого совета НТУ «ХПИ»  
(протокол № 11 от 22.12.2014 г.)

**Михайлов И. Ф.**

М69 Рентгеновские методы анализа состава материалов : монография /  
И. Ф. Михайлов, А. А. Батулин, А. И. Михайлов. - Х. : Изд-во  
«Підручник НТУ «ХПІ»», 2015. - 204 с. - Рос. мовою.

ISBN 978-617-687-044-9

В монографии представлены комплексные методы рентгеновского анализа состава материалов, основанные на измерении интенсивности флуоресценции, рассеяния и дифракционных отражений. Предложен общий подход к оптимизации рентгеновских спектров по критерию предела обнаружения, который положен в основу разработки рентгенооптических схем. Представлены результаты исследований структуры и рентгенооптических характеристик новых кристаллов-анализаторов из фуллерита и многослойных рентгеновских зеркал.

Книга может быть полезна для специалистов по рентгеновским исследованиям материалов, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

**УДК 543.427.4 : 543.442.2 : 543.442.3**  
**ББК 24.4**

© Михайлов И. Ф., Батулин А. А.,  
Михайлов А. И., 2015

© Підручник НТУ «ХПІ», 2015

ISBN 978-617-687-044-9

## СОДЕРЖАНИЕ

Список условных обозначений и сокращений .....	7
Предисловие.....	8

### Глава 1

#### ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕНТГЕНОВСКОГО АНАЛИЗА

1.1. Взаимодействие рентгеновских лучей с веществом .....	11
1.2. Характеристики рентгеновских спектров.....	14
1.3. Измерение интенсивности линий спектра.....	18
1.4. Волнодисперсионный и энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ.....	20
1.5. Общий подход к расчету рентгеновских спектров.....	23
1.6. Схемы формирования первичного спектра.....	28
1.7. Волновое диспергирование.....	33
1.7.1. Энергетическое разрешение и эффективность ВДРФА спектрометра.....	37
1.8. Диспергирование по энергиям квантов; характеристики твердотельных детекторов рентгеновского излучения.....	39
1.8.1. Энергетическое разрешение и эффективность твердотельных детекторов.....	41
1.8.2. Артефакты спектра.....	44
1.8.3. Толщина активной области детектора.....	46
Заключение к Главе 1 .....	49

### Глава 2

#### ВОЛНОДИСПЕРСИОННЫЙ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ

2.1. Основные характеристики традиционных кристаллов-анализаторов .....	52
2.2. Критерий выбора материалов для создания монокроматоров с высоким коэффициентом отражения .....	54
2.3. Применение светосильных кристаллов-анализаторов с низким структурным совершенством; рентгенооптическая схема с двумя коллиматорами Соллера.....	59

2.4. Высокоориентированный пиролитический графит; коэффициент отражения в различных излучениях.....	64
2.5. Монохроматоры на основе эпитаксиальных пленок фуллерита $C_{60}$ .....	66
2.5.1. Расчеты структурного фактора в модели вращения.....	68
2.5.2. Соотношение порядков отражения и определение размеров молекулы $C_{60}$ .....	70
2.5.3. Зависимость коэффициента отражения фуллерита от длины волны в диапазоне $\lambda=0,154 \div 0,834$ нм .....	76
2.5.4. Характеристики спектров, полученных с помощью кристаллов-анализаторов из фуллерита.....	79
2.6. Многослойные рентгеновские зеркала.....	80
2.6.1. Структурные характеристики .....	80
2.6.2. Короткопериодные зеркала; зависимость коэффициента отражения от периода в рабочем диапазоне длин волн.....	87
2.6.3. Длиннопериодные рентгеновские зеркала для определения элементов второго периода по линиям флуоресценции .....	90
Заключение к Главе 2.....	93

### Глава 3 ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННЫЙ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ

3.1. Оптимизация блока формирования первичного пучка .....	94
3.1.1. Условия оптимизации параметров фильтра первичного излучения .....	94
3.1.2. Оптимизация параметров вторичной мишени по пределу обнаружения .....	101
3.1.3. Повышение чувствительности схемы с вторичной мишенью посредством фильтрации первичного излучения.....	106
3.1.4. Многослойные вторичные излучатели; оптимизация слоев по толщине и атомному номеру.....	112
3.1.5. Экспериментальное исследование характеристик двухступенчатой флуоресцентной линзы.....	121
3.2. Количественный рентгенофазовый анализ по дифракционным отражениям линии переизлучателя.....	126

3.2.1. Принципы количественного рентгенофазового анализа стали по брэгговским отражениям феррита и цементита.....	127
3.2.2. Количественный фазовый анализ феррита и цементита в схеме рентгенофлуоресцентного спектрометра.....	131
3.2.3. Количественный анализ по отражениям цементита в схеме с вторичной мишенью .....	133
Заключение к Главе 3 .....	137

#### **Глава 4**

### **АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ЛЕГКИХ ПРИМЕСЕЙ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ КОМПТОНОВСКОГО И РЭЛЕЕВСКОГО РАССЕЯНИЯ**

4.1. Теоретические принципы.....	138
4.2. Схема измерения интенсивности комптоновского рассеяния.....	141
4.3. Определение содержания легких элементов в поликристаллических материалах по соотношению интенсивностей комптоновского и рэлеевского пиков.....	150
4.4. Смещение комптоновской полосы при рассеянии на связанных электронах .....	157
Заключение к Главе 4 .....	160

#### **Глава 5**

### **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МЕТОДОВ РЕНТГЕНОВСКОГО АНАЛИЗА СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ**

5.1. Определение содержания микропримесей в чистых материалах.....	164
5.1.1. Экспрессная аттестация чистоты материала по соотношению комптоновского и рэлеевского пиков.....	164
5.1.2. Определение содержания «следовых» примесей в легкой матрице.....	165
5.1.2.1. Сплавы цветных металлов .....	165
5.1.2.2. Золото в ионнообменных смолах .....	167
5.2. Изучение характеристик тонких пленок.....	169

5.3. Количественный анализ легких элементов в гетерогенных образцах.....	173
5.4. Легкие примеси в сплавах на основе железа.....	177
5.5. Экспериментальное сравнение аналитических возможностей различных схем селективного возбуждения .....	183
5.6. Определение минеральной составляющей твердого топлива.....	187
5.7. Нанопримеси в объектах экологии, биологии и медицины.....	190
5.7.1. Питьевая вода и продукты питания .....	190
5.7.2. Биологические жидкости.....	191
5.7.3. Биологические ткани .....	194
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	197
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	198