

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Московский физико-технический институт (государственный университет)»

УТВЕРЖДАЮ

Ректор МФТИ

\_\_\_\_\_ Н.Н. Кудрявцев

**Программа**  
**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных**  
**работников высшей школы по направлению**  
**«Методы диагностики и исследования наноструктур»**  
**на базе учебного курса**  
**«Введение в рентгеновский микроанализ»**

Цель Изучение физических принципов определения локального элементного состава методом рентгеновского микроанализа.

Категория слушателей преподаватели и научные работники высшей школы

Срок обучения 24 часа

Форма обучения с частичным отрывом от работы

Режим занятий 8 часов в день

Целью данного курса является ознакомление с физическими принципами рентгеновского микроанализа, а также основными методами измерений, проводимыми с его помощью.

**Требования к уровню освоения учебного курса**

Преподаватели должны:

- Знать:
  - область применения рентгеновского микроанализа (РМА);
  - физические принципы РМА;
  - устройство рентгеновских спектрометров, используемых в РМА;
  - возможные виды артефактов в спектре характеристического рентгеновского излучения.
- Иметь навыки:
  - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области применения РМА;
  - включать приобретенные знания о РМА в уже имеющуюся систему знаний и применять эти знания в самостоятельных методических разработках;
  - переносить полученных знания о РМА на смежные предметные области и к использованию этих знаний для построения междисциплинарных методических разработок.

- Иметь представление:
  - о взаимодействии ускоренного пучка электронов с веществом;
  - о процедуре проведения локального элементного состава поверхности с помощью РМА;
  - о предельном разрешении РМА;
  - о методе ZAF-коррекции в РМА;
  - о кривых распределения рентгеновского излучения по глубине  $j(rz)$  в приближении Яковица и Ньюбери;

Научные работники должны:

- 1.Знать:
  - область применения рентгеновского микроанализа (РМА);
  - физические принципы РМА;
  - устройство рентгеновских спектрометров, используемых в РМА;
  - возможные виды артефактов в спектре характеристического рентгеновского излучения.
- 2.Иметь навыки:
  - проведения локального элементного состава поверхности с помощью РМА;
  - сбора, систематизации и анализа научно-технической и другой профессиональной информации в области применения РМА;
  - планирования и проведения исследований и экспериментов с использованием РМА;
  - генерировать новые плодотворные научно-технические и инновационные идеи с использованием РМА;
  - переносить полученных знания о РМА на смежные предметные области и к использованию этих знаний для создания новых объектов техники и технологии и для инновационной деятельности;
- 3.Иметь представление:
  - о взаимодействии ускоренного пучка электронов с веществом;
  - о предельном разрешении РМА;
  - о методе ZAF-коррекции в РМА;
  - о кривых распределения рентгеновского излучения по глубине  $j(rz)$  в приближении Яковица и Ньюбери;

Учебный курс «Введение в рентгеновский микроанализ» состоит из дистанционной и очной частей.

Дистанционная часть учебного образовательного курса обеспечивает слушателя необходимым объёмом знаний по выбранной тематике, включая подготовку слушателя к проведению лабораторного практикума. Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению лаборатории в Московском физико-техническом институте.

В дистанционной (теоретической) части учебного курса изложены физические основы метода рентгеновского микроанализа, взаимодействия электронного пучка с твердым телом, общее устройство рентгеновских детекторов, особое внимание уделено вопросу перехода от измеренных интенсивностей излучения к концентрациям элементов в образце, а так же изложены методы расчета поправок на атомный номер, поглощение и флуоресценцию.

Теоретическая часть учебного курса состоит из пяти лекций:

Лекция 1: Общее устройство растрового электронного микроскопа

Электронная пушка. Типы катодов. Кроссовер. Генератор изображений. Разрешение электронно-лучевой системы.

### Лекция 2: Взаимодействие ускоренного пучка электронов с веществом

Понятие рассеяния. Общая формула для сечения рассеяния. Длина свободного пробега. Упругое рассеяние. Рассеяние в кулоновском поле ядра. Формула Резерфорда для сечения упругого рассеяния. Зависимость сечения упругого рассеяния от атомного номера материала мишени и энергии электрона. Неупругое рассеяние. Механизмы неупругого рассеяния электрона в твердом теле. Приближение непрерывных потерь Г. Бете. Обратные отраженные электроны. Коэффициент обратного отражения и его зависимость от типа мишени и энергии электрона. Область взаимодействия электронного пучка с мишенью. Вторичные электроны.

### Лекция 3: Рентгеновское излучение

Генерация рентгеновского излучения. Непрерывное рентгеновское излучение. Характеристическое рентгеновское излучение. Глубина генерации рентгеновского излучения. Поглощение рентгеновского излучения. Флуоресценция под действием рентгеновского излучения.

### Лекция 4.Общее устройство рентгеновских микроанализаторов

Рентгеновский спектрометр с волновой дисперсией. Рентгеновский спектрометр с энергетической дисперсией.

### Лекция 5: Обработка рентгеновских спектров. Качественный и количественный микроанализ

Идентификация пиков. Методы вычитания фона. Метод наименьших квадратов. Метод трех поправок. Анализ тонких пленок и частиц.

Очная (экспериментальная) часть учебного курса заключается в изучении принципов функционирования растрового электронного микроскопа и рентгеновских микроанализаторов на основе РЭМ Quanta 200 (FEI) и приставок энерго-дисперсионного и волнового спектрометров (EDAX). В ходе работы слушатель знакомится:

- 1) с основными узлами растрового электронного микроскопа
  - 2) с работой энерго-дисперсионного спектрометра
  - 3) с работой волнового спектрометра
- и обучается:
- 4) приемам фокусировки электронного луча и коррекции астигматизма
  - 5) получению изображений в режиме сбора истинно вторичных электронов,
  - 6) измерению тока пучка с помощью цилиндра Фарадея,
  - 7) получению рентгеновских спектров с помощью энерго-дисперсионного спектрометра
  - 8) получению рентгеновских карт
  - 9) получению рентгеновских спектров с помощью волнового спектрометра
  - 10) обработке рентгеновских спектров

## **Методические рекомендации по реализации учебной программы**

На дистанционную и очную части учебного курса отводится по 12 часов соответственно. Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса находится на сайте [www.nanoobr.ru](http://www.nanoobr.ru). Для контроля степени освоения теоретической части учебного курса (лекций) используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.



выражением:

А)

$$\frac{dE}{dx} = -7,85 \cdot 10^4 \frac{ZE}{Ar} \ln\left(1,116 \frac{E}{I}\right) \text{кэВ/см,}$$

В)

$$\frac{dE}{dx} = -7,85 \cdot 10^4 \frac{Zr}{AE} \ln\left(1,116 \frac{E}{I}\right) \text{кэВ/см,}$$

Б)

$$\frac{dE}{dx} = -7,85 \cdot 10^4 \frac{Ar}{ZE} \ln\left(1,116 \frac{E}{I}\right) \text{кэВ/см,}$$

Г)

$$\frac{dE}{dx} = -7,85 \cdot 10^4 \frac{AE}{Zr} \ln\left(1,116 \frac{E}{I}\right) \text{кэВ/см,}$$

### Лекция 3: Рентгеновское излучение.

3.1. Порядок глубины области выхода оже-электронов?

А) 10 Å

Б) 100 Å

В) 1000 Å

Г) 10000 Å

3.2. Порядок размера области генерации характеристического рентгеновского излучения?

А) 10 Å

Б) 100 Å

В) 1000 Å

Г) 10000 Å

3.3. Как изменяются относительные вероятности излучения характеристического рентгена с ростом атомного номера  $Z$ ?

А) Падает

Б) Растет

В) Сначала растет, затем падает

Г) Сначала падает, затем растет

3.4. Закон Мозли, описывающий энергию характеристического излучения, имеет вид?

А)  $E = R_1(Z - s) \left( \frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right)$

Б)  $E = R_1(Z - s) \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$

В)  $E = R_1(Z - s)^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$

Г)  $E = R_1(Z - s)^2 \left( \frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right)$

3.5. Формула Крамерса, описывающая непрерывный рентгеновский спектр, имеет вид?

А)  $N(E) = \frac{aZ^2(E_0 - E)}{E}$

Б)  $N(E) = \frac{aZ(E_0 - E)}{E}$

В)  $N(E) = \frac{aZ^2(E_0^2 - E^2)}{E^2}$

Г)  $N(E) = \frac{aZ(E_0^2 - E^2)}{E^2}$

### Лекция 4: Общее устройство рентгеновских микроанализаторов

4.1. Предельная относительная концентрация примеси, которая может быть замечена с помощью микроанализа, оценивается как?

А) 10%

Б) 0,1%

В) 0,001%.

Г) 0,00001%.

4.2. Закон Брэгга-Вульфа, описывающий положение максимума отражения рентгеновского излучения, имеет вид?

А)  $\lambda n = 2d \sin\theta$

Б)  $\lambda n^2 = 2d \sin\theta$

В)  $\lambda^2 n = 2d^2 \sin\theta$

Г)  $\lambda n = 2d \cos\theta$

4.3. Спектральное разрешение волнового детектора составляет порядка?

- A) 0,1 эВ  
B) 10 эВ

- Б) 1 эВ  
Г) 100 эВ

4.4. Спектральное разрешение энергодисперсионного детектора составляет порядка?

- A) 0,1 эВ  
B) 10 эВ

- Б) 1 эВ  
Г) 100 эВ

4.5. Чему равен радиус закругления плоскостей кристалла в геометрии круга Роуланда (R – радиус круга Роуланда)?

- A) 0.5R  
B) 2R

- Б) R  
Г) 1.5R

Лекция 5: Обработка рентгеновских спектров. Качественный и количественный микроанализ.

5.1. В первом приближении зависимость концентрации определенного элемента от интенсивности характеристического излучения ему соответствующего?

- A) Линейная  
B) Экспоненциальная

- Б) Квадратичная  
Г) Логарифмическая

5.2. В аббревиатуре ZAF буква “A” означает, что метод ZAF-коррекции учитывает поправку на:

- A) Атомный номер элемента  
B) Поглощение излучения

- Б) Аберрации линз  
Г) Величину тока первичного пучка

5.3. В аббревиатуре ZAF буква “F” означает, что метод ZAF-коррекции учитывает поправку на:

- A) Вклад фона тормозного излучения  
B) Поток электронов

- Б) Флуоресценцию  
Г) Фазу вещества подложки

5.4. В приближении Яковица и Ньюбери кривая  $j(rz)$  в области  $0 \leq rz \leq 1,5h$  моделируется как:

$$A) j(rz)_{z \leq 1,5h} = \left( \frac{rZ - h}{h} \right) (j_0 - k)^2 + k$$

$$Б) j(rz)_{z \leq 1,5h} = \left( \frac{rZ - h}{h} \right)^2 (j_0 - k) + k$$

$$B) j(rz)_{z > 1,5h} = 0.25(j_0 + 3h)^2 \cdot e^{\frac{2rZ \sec q}{rZ_r - 1.5k}}$$

$$Г) j(rz)_{z > 1,5h} = 0.25(j_0 + 3k) \cdot e^{\frac{3h \sec q - 2rZ \sec q}{rZ_r - 1.5k}}$$

5.5. Искажения вида фона на снимаемой рентгенограмме связаны с:

- A) Частичным поглощением излучения образцом  
B) Ошибками счета

- Б) Флуоресценцией  
Г) Все вышеперечисленное

**Контрольные вопросы для проверки материала в количестве 25 вопросов**

1. Размер характерной область генерации истинно вторичных электронов?
2. Размер характерной области генерации отраженных электронов?
3. Размер характерной области генерации оже-электронов?
4. Размер характерной области выхода истинно-вторичных электронов?

5. Размер характерной области выхода отраженных электронов?
6. Что такое сечение рассеяния?
7. Какие процессы возникают при неупругом взаимодействии первичного электронного пучка с твердым телом?
8. Чем определяется пространственное разрешение рентгеновского микроанализа?
9. Характерная длина свободного пробега электронов первичного пучка (с энергией 30 кэВ) в металлах?
10. Чему равна средняя энергия ионизации атомов мишени?
11. Назовите правило переходов между уровнями в дипольном приближении.
12. Как выглядит зависимость коэффициента поглощения от длины волны рентгеновского излучения?
13. Вещества с каким атомным номером  $Z$  наиболее просто идентифицировать с помощью рентгеновского микроанализа?
14. Причины возникновения рентгеновской флюоресценции?
15. Размер характерной области генерации рентгеновского излучения?
16. Зачем охлаждать кремний-литиевый кристалл энерго-дисперсионного спектрометра?
17. Какова эффективность сбора энерго-дисперсионного спектрометра?
18. Спектральное разрешение энерго-дисперсионного и волнового спектрометров?
19. Чем определяется радиус изгиба плоскостей кристалла в геометрии круга Роуланда?
20. Чем определяется величина мертвого времени энерго-дисперсионного спектрометра?
21. Как выглядит первое приближение Кастена?
22. Что учитывает  $ZAF$ -коррекция?
23. Какие существуют методы вычитания фона?
24. С чем связаны трудности анализа тонких пленок?
25. Вид кривых распределения рентгеновского излучения по глубине  $j(rz)$  в приближении Яковица и Ньюбери?

В конце очной части учебного курса слушатели готовят отчеты по **темам контрольных рефератов**, которые используются для контроля степени усвоения всего учебного курса на базе экспериментальных результатов и их обработки с применением знаний из дистанционной части курса.

**Темы контрольных рефератов по курсу**  
**«Введение в рентгеновский микроанализ»**

1. История развития растровой электронной микроскопии
2. Процессы неупругого рассеяния электронного пучка в твердом теле.
3. Генерация рентгеновского излучения
4. Обзор методов химического анализа твердого тела.
5. Спектрометры с энергетической дисперсией.
6. Спектрометры с волновой дисперсией.

7. Сравнение преимущества и недостатков спектрометров с волновой и энергетической дисперсией.
8. Обзор статей по микроскопическому исследованию тонких пленок
9. Обзор статей по микроскопическому исследованию в биологии.
10. Особенности математической обработки рентгеновского спектра.

### Учебно-тематический план

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное общение с преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и др.)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	«Введение в рентгеновский микроанализ»	24 ч.	10 ч.	2 ч.	12 ч.	Контрольные вопросы (электронная зачётка)
1.	Лекция 1: Общее устройство растрового электронного микроскопа		2 ч.	0,25 ч.		Реферат
2.	Лекция 2: Взаимодействие ускоренного пучка электронов с веществом		2 ч.	0,5 ч.		
3.	Лекция 3: Рентгеновское излучение.		2 ч.	0,5 ч.		
4.	Лекция 4. Общее устройство рентгеновских микроанализаторов		2 ч.	0,25 ч.		
5.	Лекция 5: Обработка рентгеновских спектров. Качественный и количественный микроанализ.		2 ч.	0,25 ч.		
Итоговый контроль				Контрольные вопросы (электронная зачётка)	Реферат	

### Список литературы (основной и дополнительной),



**а также других видов учебно-методологических материалов и пособий, необходимых для изучения (конспектов лекций, видеолекций, лазерных дисков и др.).**

**Список литературы  
и др. дополнительных источников информации в кол-ве – 5.**

1. *Голдстей Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лившин Э.* Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. — М.: Мир, 1984.
2. *Рид С. Дж. Б.* Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. — М.: Техносфера, 2008.
3. *Малви Т., Скотт В.Д., Рид С. Дж. Б., Кокс М. Дж. К., Лав Г.* Количественный электронно-зондовый микроанализ: Пер. с англ./Под ред. В. Скотта, Г. Лава. — М.: Мир, 1986.
4. *Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В.* Эмиссионная электроника — М.: Наука, 1966 г.;
5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика, том 3: Квантовая механика — М.: Наука, 1989.

**Полное содержание лекций в электронной дистанционной части  
учебного курса на сайте [www.nanoobr.ru](http://www.nanoobr.ru)**