

Федеральное агентство научных организаций  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ХИМИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКА-  
ДЕМИИ НАУК (ИХТТ УрО РАН)**



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИХТТ УрО РАН

В. Л. Кожевников

«18» 09 2015 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

**ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ, ЭЛЕКТРОННАЯ ДИФРАКЦИЯ: ОСНОВЫ,  
ПРИМЕНЕНИЕ В ХИМИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА**

подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по направлению подготовки 04.06.01 Химические науки  
(уровень подготовки кадров высшей квалификации)

Направленность (профиль) программы: Физическая химия

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь.

ЕКАТЕРИНБУРГ

2015 г.

Составитель:

Ведущий научный сотрудник лаборатории квантовой химии  
и спектроскопии им. А.Л.Ивановского, д.х.н

Е.В.Шалаева

Рецензент:

Заведующий аспирантурой, к.х.н., доцент

Н.С.Кожевникова

Согласовано:

Ученый секретарь ИХТТ УрО РАН, д.х.н.

Т.А. Денисова

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНА И ОДОБРЕНА на заседании Учёного совета  
ИХТТ УрО РАН протокол № 9 от «17» сентября 2015 г.

## АННОТАЦИЯ

Рабочая программа дисциплины «Электронная микроскопия, электронная дифракция: основы, применение в химии твердого тела» составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 04.06.01 Химические науки (уровень подготовки кадров высшей квалификации).

Рабочая программа соответствует требованиям, обязательным при реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования - программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению подготовки кадров высшей квалификации 04.06.01 Химические науки (далее соответственно - программа аспирантуры, направление подготовки).

В рабочей программе используются следующие сокращения:  
ИХТТ УрО РАН - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук;  
УК - универсальные компетенции;  
ОПК - общепрофессиональные компетенции;  
ПК - профессиональные компетенции;  
ООП – основная образовательная программа;  
ФГОС ВО - федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования.

Дисциплина «Электронная микроскопия, электронная дифракция: основы, применение в химии твердого тела» относится к вариативной части (дисциплины по выбору) учебного плана программы аспирантуры по направлению подготовки 04.06.01 «Химические науки» и направленности «Физическая химия» (Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь).

Аспирант по направлению подготовки 04.06.01 Химические науки готовится к следующим видам профессиональной деятельности: научно-исследовательская; педагогическая.

Направленность (профиль) профессиональной деятельности: Физическая химия.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника, освоившего программу аспирантуры, универсальных компетенций УК-1, УК-3, УК-5, общепрофессиональных компетенций ОПК-1, ОПК-2 и профессиональных компетенций ПК-1.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, лабораторные занятия, самостоятельная работа.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

*Итоговый контроль.* Для контроля усвоения дисциплины учебным планом предусмотрен зачет.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа. Программой дисциплины предусмотрены: 22 часа на лекции, 2 часа на лабораторные занятия, 4 часа на зачет и 44 часа самостоятельной работы аспирантов.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Исследование структуры фаз и материалов является важнейшей задачей современной физической химии. Одними из мощных методов изучения структурных свойств наряду с дифракционными рентгенографическими и нейтронографическими методами является группа электронно-микроскопических методов. Обучение будущих специалистов по направлению 04.06.01 Химические науки и по направленности «Физическая химия» этому предмету представляется необходимым, поскольку владение им позволяет понять принципы постановки электронно-микроскопических исследований для решения разнообразных структурных задач. Курс ставит перед собой задачи дать представления о характерных процессах взаимо-

действия электронов с веществом, лежащих в основе различных электронно-микроскопических методов – дифракции упруго рассеянных электронов, дифракции обратно-отраженных электронов, неупругом рассеянии вторичных электронов, рентгеновском характеристическом излучении. Курс рассматривает основы геометрической и волновой электронной оптики, принципы формирования электронной дифракции и электронно-микроскопических изображений, примеры приборного оформления основных микроскопических методик, включающих просвечивающую и сканирующую электронную микроскопию, аналитические дополнения (зондовый электронный анализ, спектроскопию потерь энергии электронов).

Основной целью курса электронной микроскопии является представление характерных структурно-аналитических задач, решаемых методами электронной дифракции, просвечивающей электронной и сканирующей микроскопии и обучение слушателей навыкам постановки таких задач, и самостоятельного анализа структурного состояния фаз и материалов с использованием электронно-микроскопических данных и пакетов программ Mathcad, CaRIne Crystallography, ATOMS, JEMS.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП**

- 2.1. Учебная дисциплина «Электронная микроскопия, электронная дифракция: основы, применение в химии твердого тела» является дисциплиной по выбору и входит в вариативную часть учебного плана ООП.
- 2.2. Данная программа строится на преемственности программ в системе высшего образования и предназначена для аспирантов ИХТТ УрО РАН, прошедших обучение по программам подготовки магистров или специалистов, прослушавших в высших учебных заведениях (университетах) соответствующие курсы и имея по ним положительные оценки. Она основывается на положениях, отраженных учебных программах указанных уровней. Для освоения дисциплины требуются знания и умения, приобретенные обучающимися в результате освоения ряда предшествующих дисциплин (разделов дисциплин), например:
  - Общая неорганическая химия;
  - Общая физика;
  - Высшая математика;
  - Физико-химические методы анализа;
  - Физика твердого тела;
  - Кристаллография
  - и других.
- 2.3. Дисциплина «Электронная микроскопия, электронная дифракция: основы, применение в химии твердого тела» является вспомогательной при подготовке научно-квалификационной работы аспиранта и подготовке к сдаче кандидатского экзамена по направленности (профилю) подготовки: физическая химия.

## **3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Процесс изучения дисциплины «Электронная микроскопия, электронная дифракция: основы, применение в химии твердого тела» направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ООП по направлению подготовки 04.06.01 Химические науки:

### **1. Универсальных компетенций:**

- способности к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- готовности участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);
- способности планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-5).

### **2. Общепрофессиональных компетенций:**

- способности самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);
- готовности организовать работу исследовательского коллектива в области химии и смежных наук (ОПК-2);

### **3. Профессиональных компетенций:**

способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы и получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по специальности (направленности) 02.00.04 Физическая химия (ПК-1).

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны:

#### **знать:**

- системы сбора, обработки и хранения структурно-химической информации, уметь создавать авторские и пользоваться стандартными банками компьютерных программ и базами данных

#### **уметь:**

- анализировать структуру полученных веществ с целью доказательства выполнения поставленной задачи;
- при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений

#### **владеть:**

- навыками анализа возможности создания новых методик и технологий на базе проведенных исследований;
- навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов и формулировки выводов;
- навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.

## 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1 Разделы дисциплины и виды занятий

Наименование разделов и тем	Трудоемкость (в ЗЕТ)	Объем работы (в часах)	Всего учебных занятий (в часах)		
			лекции	лабораторные занятия	самостоятельная работа
1	2	3	4	5	6
<b>Раздел 1. Основы просвечивающей электронной микроскопии и электронной дифракции</b>					
Тема 1. Предмет курса, определение микроскопии. Волновая и геометрическая оптика		4	2		2
Тема 2. Принципы формирования электронной дифракции упруго рассеянных электронов		6	2		4
Тема 3. Дифракция на кристаллической решетке		6	2		4
Тема 4. Принципы формирования изображений и контраста в просвечивающей электронной микроскопии		6	2		4
<b>Раздел 2. Применение просвечивающей электронной микроскопии для решения задач физической химии и физического материаловедения</b>					
Тема 5. Электронно-микроскопические методики в определении микроструктуры материалов, типов и структурных характеристик кристаллографических дефектов, ориентационных соотношений фаз, анализ аперриодических структур		6	2		4
Тема 6. Просвечивающая дифракционная и высокоразрешающая электронная микроскопия в исследовании фазовых превращений, ближнего порядка и доменной структуры		6	2		4
Тема 7. Просвечивающая электронная микроскопия в исследовании композиционных и наноструктурированных материалов		10	2	2	6
Тема 8. Методы подготовки образцов для просвечивающей электронной микроскопии		6	2		4
<b>Раздел 3. Методы сканирующей и аналитической электронной микроскопии</b>					
Тема 9. Сканирующая просвечивающая электронная микроскопия		6	2		4
Тема 10. Аналитическая просвечивающая микроскопия		6	2		4
Тема 11. Растровая электронная микроскопия		6	2		4
<b>Зачет</b>		<b>4</b>			
<b>Всего по дисциплине</b>	<b>2</b>	<b>72</b>	<b>22</b>	<b>2</b>	<b>44</b>

### 4.2. Содержание разделов и тем

#### Раздел 1. Основы просвечивающей электронной микроскопии и электронной дифракции

*Тема 1. «Предмет курса, определение микроскопии. Волновая и геометрическая оптика».* Волновые свойства электрона. Основы волновой оптики (монохроматическая волна, когерентность, интерференция, дифракция). Краткая история создания электронного микроскопа. Оптическая и электронная микроскопия (геометрическая оптика, линзы, увеличение и разрешающая способность микроскопа). Устройство электронного микроскопа. Взаимодействие электронного пучка с образцом. Упругое и неупругое рассеяние.

*Тема 2. «Принципы формирования электронной дифракции упруго рассеянных электронов».* Упругое рассеяние электронов на атоме и ансамбле атомов (кинематическое приближение). Атомный фактор рассеяния. Дифракция электронов на различных типах структур. Примеры. Режим наблюдения дифракции в электронном микроскопе.

*Тема 3.* «Дифракция на кристаллической решетке». Понятие обратной решетки и условие дифракционного отражения (условие Вульфа-Брэгга). Структурный фактор рассеяния. Сравнение рентгеновской и электронной дифракции.

*Тема 4.* «Принципы формирования изображений и контраста в просвечивающей электронной микроскопии». Дифракционная микроскопия (светлопольное, темнопольное изображения). Микроскопия высокого разрешения (изображение решетки, высокоразрешающее изображение). Фурье-преобразование в микроскопии высокого разрешения. Примеры.

## **Раздел 2. Применение просвечивающей электронной микроскопии для решения задач физической химии и физического материаловедения**

*Тема 5.* «Электронно-микроскопические методики в определении микроструктуры материалов, типов и структурных характеристик кристаллографических дефектов, ориентационных соотношений фаз, анализ аperiodических структур». Принципы индицирования электронограмм и определения кристаллографических направлений на изображениях. Определение кристаллографии границ, двойников, дислокаций, дефектов упаковки.

*Тема 6.* «Просвечивающая дифракционная и высокоразрешающая электронная микроскопия в исследовании фазовых превращений, ближнего порядка и доменной структуры». Примеры изучения эффектов ближнего порядка в упорядочивающихся твердых растворах, выделений упорядоченной фазы, доменной структуры в оксидных и металлических системах. Приемы электронно-дифракционного анализа упорядоченной и матричной фазы. Матричный метод.

*Тема 7.* «Просвечивающая электронная микроскопия в исследовании композиционных и наноструктурированных материалов».

*Тема 8.* «Методы подготовки образцов для просвечивающей электронной микроскопии».

## **Раздел 3. Методы сканирующей и аналитической электронной микроскопии**

*Тема 9.* «Сканирующая просвечивающая электронная микроскопия». Принципы зондовой микроскопии. Некогерентное упругое рассеяние и Z-контраст. HAADF-микроскопия. Примеры решения задач HAADF-методикой. Сравнение с высокоразрешающей микроскопией. Серии современных электронных просвечивающих микроскопов – JEM, Philips, FEI (Technai). Перспективы развития просвечивающей электронной микроскопии.

*Тема 10.* «Аналитическая просвечивающая микроскопия». Энергодисперсионный анализ. Спектроскопия энергетических потерь электронов EELS (предел обнаружения и разрешающая способность, количественный анализ энергетических потерь электронов, тонкая структура края поглощения). Примеры решения структурно-аналитических задач с использованием HAADF-микроскопии и спектроскопии потерь электронов.

*Тема 11.* «Растровая электронная микроскопия». Общее устройство растрового сканирующего микроскопа. Формирование изображения в РЭМ (вторичные, обратно отраженные электроны, сигнал катодолюминесценции и т.д.). Факторы, влияющие на качество получаемого изображения, разрешение и глубина фокуса в растровой микроскопии. Подготовка образцов. Приставка дифракции обратно отраженных электронов. Принцип формирования Кикучи-линий и структурная информация. Примеры.

## **5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Технология процесса обучения по дисциплине «Электронная микроскопия, электронная дифракция: основы, применение в химии твердого тела» включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- а) аудиторские занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа аспирантов;
- г) контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончанию;
- д) зачёт.

Аудиторские занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения (ноутбук, проектор) и технологии проблемного обучения.

Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами,

формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют четко структурировать материал занятия.

Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что позволяет улучшить восприятие материала.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей.

## **6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

### **6.1. Темы лабораторных работ**

Устройство и принцип работы просвечивающего электронного микроскопа, на примере JEOL JEM-2100.

### **6.2. Перечень тем рефератов**

1. Просвечивающая электронная микроскопия и электронная дифракция в исследовании структурно-фазовых превращений в оксидных системах с функциональными ионно-транспортными свойствами.
2. Последние достижения просвечивающей электронной микроскопии в исследовании структуры нанокристаллических материалов на примере фуллеренов, нанотрубок и слоистых композитов.
3. Возможности электронного зондового микроанализа, спектроскопии потерь электронов и HAADF-микроскопии для решения структурно-аналитических задач методом сканирующей просвечивающей электронной микроскопии.
4. Успехи и проблемы структурной электронографии. Восстановление 3D-структуры.

### **6.3. Перечень тем для решения задач**

1. Индексирование кристаллографических направлений и плоскостей в прямой и обратной кубической и гексагональной решетках. Работа в программе Mathcad.
2. Формулы обратной решетки для кубической и гексагональной структур. Расчет обратной решетки в программе CaRIne Crystallography. Построение стереографических проекций. Моделирование композитных электронно-дифракционных картин.
3. Определение индексов кристаллографических направлений залегания и векторов Бюргерса дислокаций в кубической и гексагональной структурах по электронно-микроскопическим изображениям.

### **6.4. Перечень тем контрольных работ**

1. Формулы обратной решетки. Построение обратной решетки для матричной и сверхструктурной упорядоченной фазы в конкретной оксидной системе в программе CaRIne Crystallography. Моделирование композитных электронно-дифракционных картин.
2. Расчеты размерно-ориентационных соотношений матричной и упорядоченной фаз в пакете Mathcad для прямой и обратной решеток.
3. Анализ и интерпретация электронно-микроскопического изображения в двух пучках. Расчет высокоразрешающего изображения для известной структуры с использованием пакета JEMS.
4. Индексирование кристаллографических направлений и плоскостей залегания структурных дефектов (границ, дислокаций) по электронно-микроскопическим изображениям и электронно-дифракционным картинам.
5. Процессы неупругого рассеяния электронов. Интенсивности вторичных и обратно-отраженных электронов. Зависимость от атомной массы, концентрации компонентов и топологии поверхности.



## **7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература**

1. Williams D.B., Carter C.B. Transmission electron microscopy. Textbook for Material Science. – N.Y.: Springer Science Business Media, 2009. V.1-4.- 832 P.
2. Э.Р. Кларк, К.Н. Эберхардт. Микроскопические методы исследования материалов. М.: Техносфера, 2007. – 376 с.
3. Хирш П., Хови А., Николсон Р., Пэшли Д., Уэлан М. Электронная микроскопия тонких кристаллов. – М.: Мир, 1968. -574 С.
4. Frontiers of Electron Microscopy in Materials Science 2005 // J. Materials Science. 2006. V.41. P. 4381-4603.

### **Дополнительная литература**

1. Основы аналитической электронной микроскопии / Под ред. Грена Дж., Гольдштейна Дж., Джоя Д., Ромига А. – М: Металлургия, - 1990. – 584 С.
2. Kirkland E.J. Advanced Computing in Electron Microscopy. – N.Y.: Plenum Press, 1998. – 252 P.
3. Современная кристаллография Т.1,2 / Под ред. Вайнштейна Б.К.– М.: Наука, 1979.
4. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. – М.: Наука, 1983. – 316 С.
5. Дифракционные и микроскопические методы в материаловедении / Под. Ред. Амелинкса С., Геверса Р., Ван Ладе Дж. – М.: Металлургия, 1984. – 502 С.
6. Каули Дж. Физика дифракции. – М.: Мир, 1979.-432 С.
7. Спенс Дж. Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения.
8. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Под ред. Уманского Я.С., Скакова Ю.А., Иванова А.Н., Расторгуева Л.Н. – М.: Металлургия, 1982. – 632С.
9. Микроанализ и растровая электронная микроскопия / Под Ред. Мориса Ф., Мени Л., Тиксье Р. – М.: Металлургия, 1985. – 408 С.
10. Шаскольская М.П. Кристаллография. – М.: Высшая школа, 1976. – 350 С.

### **Программное обеспечение**

1. Mathcad-11
2. ATOMS
3. CaRIne Crystallography
4. JEMS

### **Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

1. <http://www.springerlink.com/content/978-0-387-76501-3#section=109713&page=1> \ Чтение online “Transmission Electron Microscopy”, D. Williams, C.B. Carter
2. <http://www.eurmicsoc.org/contact.htm> \ Сайт Европейского электронно-микроскопического сообщества
3. <http://www.matter.org.uk/tem/default.htm> \ Основы просвечивающей электронной микроскопии, обучающий сайт.
4. <http://www.jeol.com> \ Микроскопы, приставки, аксессуары.
5. <http://www.gatan.com> \ Микроскопы, приставки, аксессуары, программные продукты
6. <http://www.analitex.com> \ Программные продукты по электронной микроскопии

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **8.1. Общие требования**

1. Персональные компьютеры, мультимедийная система для аудиторных занятий.

### **8.2. Сведения об оснащённости дисциплины специализированным и лабораторным оборудованием**

1. Просвечивающие электронные микроскопы ЦКП УрО РАН “Электронная микроскопия” (ИФМ УрО РАН) JEM-200 С, Philips CM-30.
2. Сканирующий электронный микроскоп, оснащенный рентгеновским зондовым микроанализатором (ИХТТ УрО РАН) JSM JEOL 6390 LA.

## **9. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **10.1. Рекомендации для аспиранта**

Слушателям курса рекомендуется уделить время самостоятельной работе для повторения правил преобразований и вычислений экспоненциальных функций, матриц и векторных величин. Аспирантам рекомендуется также углубленно рассмотреть основные вопросы кристаллографии, касающиеся подходов в описании кристаллических структур.

### **10.2. Перечень контрольных вопросов для подготовки к итоговой аттестации по дисциплине**

1. Гармоническая монохроматическая волна. Понятие когерентности волн. Явление интерференции. Оптическая разность хода волн. Геометрическая и волновая оптика, их роль в микроскопах. Разрешающая способность микроскопа.
2. Дифракция монохроматической волны на неоднородностях среды. Дифракция оптических волн, рентгеновского излучения, электронов. Волновые свойства электронов, зависимость длины волны от энергии электронов.
3. Упругое рассеяние электронной волны на атоме. Атомный фактор рассеяния электронов и рентгеновских лучей, сравнение. Определение вектора рассеяния. Упругое рассеяние электронов на группе атомов. Амплитуда рассеянной волны.
4. Дифракция электронов на кристаллической решетке. Понятие и формулы обратной решетки. Условие и схема дифракционного отражения для кристаллической решетки. Закон Вульфа-Брэгга. Режим наблюдения дифракции в просвечивающем электронном микроскопе.
5. Принципы формирования изображений (контраста) в дифракционной микроскопии. Формулы амплитуды дифрагированной волны. Темнопольное, светлопольное изображения. Формулы дифракционной микроскопии для изображений структурных дефектов.
6. Формирование высокоразрешающих изображений и изображений в двух пучках. Прямое и обратное Фурье преобразование. Уточнение высокоразрешающего изображения. Режим наблюдения в микроскопе. Аберрации объективных линз и передаточная функция микроскопа.
7. Неупругое взаимодействие электронов с веществом. Процессы генерирования вторичных электронов и характеристического рентгеновского излучения. Энергодисперсионный анализ. Применение в просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии. Локальность энергодисперсионного анализа. Спектроскопия энергетических потерь электронов в сканирующей и просвечивающей микроскопии.
8. Сканирующая просвечивающая электронная микроскопия. Формирование зонда. Сравнение с просвечивающей электронной микроскопией. Некогерентное упругое рассеяние электронов и Z-контраст. Режим HAADF-STEM. Разрешающая способность режима HAADF-STEM. Схема хода лучей.
9. Сканирующая электронная микроскопия. Взаимодействие электронов с веществом. Вторичные и обратно-отраженные электроны, рентгеновское характеристическое излучение. Механизмы формирования контраста. Разрешающая способность и глубина фокуса сканирующей электронной микроскопии.