

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор
по учебно-методической работе

А.А.Панфилов

« 13 » 10 20 15 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

(наименование дисциплины)

Направление подготовки: 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Профиль/программа подготовки «Инженерно-физические технологии в nanoиндустрии»

Уровень высшего образования: магистратура

Форма обучения: очная

Семестр	Трудоемкость зач. ед./ час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	СРС, час.	Форма промежуточного контроля (экз./зачет)
3	4 / 144	18	18	18	54	Экзамен (36)
Итого	4 / 144	18	18	18	54	Экзамен (36)

Владимир 2015

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Программа предназначена для подготовки магистров по направлению «Нанотехнологии и микросистемная техника». Курс "Электронная микроскопия" читается в 3 семестре, он базируется на ранее полученных знаниях и компетенциях студентов, приобретенных при обучении по программе бакалавриата. Направлен на ознакомление с методами электронной микроскопии, приобретению навыков работы с современными приборами и расширению компетенции студентов в области неразрушающих методов диагностики материалов.

Целью освоения дисциплины «Электронная микроскопия» является ознакомление (в том числе на практике) магистров с принципами функционирования растровых и просветных электронных микроскопов, получением и анализом соответствующих изображений-сканов, получаемых в различных режимах работы микроскопа.

Задачи дисциплины:

- рассмотрение законов взаимодействия высокоэнергетичных электронов с исследуемым образцом;
- изучение аппаратной части современных электронных микроскопов (электронная колонна, система развёртки, детекторы электронов и пр.), софтверной компоненты оборудования микроскопа и их роль в формировании изображения, даваемого прибором;
- приобретение практических навыков работы с РЭМ QUANTA 200 3D;
- демонстрация возможного использования полученных знаний в своей выпускной квалификационной работе.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП ВО

Дисциплина «Электронная микроскопия» является дисциплиной по выбору вариативной части ОПОП. Изучение дисциплины проходит в 3 семестре, базируется на ранее полученных знаниях студентов в области физики твердого тела, размерных эффектов в нанометровом масштабе, технологии диагностики микро- и наноматериалов и обработки изображений, которые были получены в рамках обучения в бакалавриате (дисциплины «Физика», «Физика твёрдого тела», «Методы анализа и контроля наноструктурированных материалов и систем», «Электроника и микропроцессорная техника») и на первом курсе магистратуры в рамках дисциплин «История и методология науки и техники в области нанотехнологий», «Специальные главы физики твёрдого тела».

Знания, полученные в рамках изучения данной дисциплины, могут быть применены при выполнении выпускной квалификационной работы.

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

В процессе освоения данной дисциплины обучающийся формирует и демонстрирует следующие профессиональные компетенции:

- 1) готовность формулировать цели и задачи научных исследований в области нанотехнологии и микросистемной техники, обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач (ПК-1);
- 2) готовность разрабатывать методики проведения исследований и измерений параметров и характеристик изделий нанотехнологии и микросистемной техники, анализировать их результаты (ПК-2).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1) **Знать:** основные законы естественнонаучных дисциплин, лежащие в основе взаимодействия электронного зонда с поверхностью образца на атомарном уровне, физические принципы работы детекторов рассеянных электронов (ПК-1, 2);

2) **Уметь:** интерпретировать полученные в результате измерения данные, объяснять полученные изображения, проводить калибровку и сопоставлять качественным картинам количественные данные (ПК-1, 2);

3) **Владеть:** элементарными навыками работы на растровом электронном микроскопе (ПК-1, 2).

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единицы, 144 часа.

№ п/п	Раздел (тема) дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Объем учебной работы, с применением интерактивных методов (в часах / %)	Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра), форма промежуточной аттестации (по семестрам)	
				Лекции	Семинары	Практические занятия	Лабораторные работы	Контрольные работы	СРС			КП/КР
1.	Физические принципы работы ЭМ. Электронная оптика. Формирование электронного зонда (ЭЗ).	3	1-6	6		6	4		12		6/37	Рейтинг-контроль №1
2.	Взаимодействие ЭЗ с образцом.	3	7-12	6		6	2		14		4/28	Рейтинг-контроль №2
3.	Формирование изображения в ЭМ. Методы обработки изображений.	3	13-14	3		2	8		14		8/61	Рейтинг-контроль №3
4.	Генерирование рентгеновского излучения при взаимодействии ЭЗ с образцом. Рентгеновский микроанализ.)		15-18	3		4	4		14		4/36	
Всего:		3	18	18		18	18		54		22/40	Экзамен (36)

ТЕМЫ, РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ:

Лекции:

Раздел 1. Электронная оптика. Формирование ЭЗ.

Тема 1. Исторический экскурс. Место электронной микроскопии в методах экспериментального исследования поверхности.

Тема 2. Электромагнитные линзы. Формирование электронного зонда. Колонна ЭМ.

Раздел 2. Взаимодействие электронного пучка с образцом.

Тема 1. Упругое и неупругое рассеяние электронов.

Тема 2. Зависимость процессов рассеяния электронов от параметров ЭЗ, образца, геометрии взаимодействия.

Раздел 3. Формирование изображения в ЭМ. Методы обработки изображений.

Тема 1. Детекторы, применяемые в ЭМ. Принципы их работы.

Тема 2. Методы обработки сигналов детектора. Коррекция сканов.

Раздел 4. Генерирование рентгеновского излучения под действием электронного пучка.

Тема 1. Спектральные свойства характеристического рентгеновского излучения.

Тема 2. Типы микрорентгеновских спектрометров: энергодисперсионный и волновой.

Тема 3. Основы качественного и количественного рентгеновского микроанализа.

Лабораторный практикум:

1. Знакомство с РЭМ QUANTA 2003D. Электронная оптика (кроссовер, объектная линза, отклоняющие катушки.). Камера электронного микроскопа. Компьютерная система управления прибором.

2. Главное меню системы управления. Выполнение простейших настроек изображения (фокусировка, регулировка контраста). Получение сканов простых образцов в режиме высокого вакуума.

3. Режим низкого вакуума. Получение сканов непроводящих образцов без предварительной пробоподготовки.

4. Знакомство с ионной колонной РЭМ. Ионная оптика. Препарирование поверхности ионным пучком.

5. Детектор Эверхарта-Торнли – основной тип детекторов для РЭМ. Знакомство с системой детектора Э-Т, установленной в камере микроскопа QUANTA 2003D. Использование детектора Эверхарта-Торнли в режиме отражённых/ вторичных электронов.

6. Самостоятельная работа с материалами оптики и квантовой электроники. Получение сканов структурированных оптических волокон, оптической нанокерамики, исследование плёнок, полученных лазерным испарением в вакууме.

7. Энергодисперсионный анализ (EDS). Si:Li детектор. Изучение программного комплекса EDAX. Пользовательская калибровка по энергии/ длинам волн. Использование эталонного образца Cu-Al.

8. Количественный анализ сплавов Al.

Практические занятия:

1. Оценки разрешающей способности оптического и электронного микроскопов. Зависимость разрешающей способности ЭМ от ускоряющего напряжения колонны.
2. Невозможность достижения теоретического разрешения в реальных ЭМ. Аберрации электронной оптики и способы её уменьшения.
3. Детекторы электронов.
4. Моделирование рассеяния электронов в приповерхностном слое образца. Метод Монте-Карло расчёта траекторий электронов.
5. Квантовые закономерности рентгеновских спектров. Закон Мозли.
6. Дифракция рентгеновского излучения на кристаллах. Формула Вульфа-Брэггов.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Активные и интерактивные формы обучения

С целью формирования и развития профессиональных навыков студентов в учебном процессе используются активные и интерактивные формы проведения занятий (компьютерных симуляций, разбор конкретных ситуаций) в сочетании с внеаудиторной работой.

Самостоятельная работа студентов

Самостоятельная (внеаудиторная) работа студентов включает закрепление теоретического материала при подготовке к выполнению индивидуальной домашней работы. Основа самостоятельной работы - изучение литературы по рекомендованным источникам и методическим указаниям для самостоятельной работы, решение выданных преподавателем практики задач.

Мультимедийные технологии обучения

Некоторые из лекционных и практических занятий проводятся в виде презентаций в мультимедийной аудитории (например, ауд. 420-3) с использованием компьютерного проектора.

Лекции приглашенных специалистов

Проводятся лекции приглашенных специалистов в виде участия в онлайн вебинарах по новаторским направлениям ЭМ.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Текущий контроль успеваемости проводится по всем видам занятий с использованием рейтинговой системы.

Экзаменационные вопросы

1. Физические принципы, лежащие в основе электронной микроскопии (далее ЭМ). Корпускулярно-волновой дуализм и де-Бройлевская длина волны.
2. Основы электронной оптики. Фокусировка электронного пучка.
3. Просвечивающий и сканирующий ЭМ. Общие принципы формирования изображения в ЭМ.
4. Электронный зонд и его основные характеристики.
5. Взаимодействие электронного пучка с образцом. Понятие сечения рассеяния и длины свободного пробега для электрона.
6. Процессы упругого и неупругого рассеяния электрона при взаимодействии с атомами мишени.
7. Понятие области взаимодействия. Методы моделирования взаимодействия электронного пучка с материалом мишени.
8. Отражённые (обратно рассеянные электроны). Понятие коэффициента отражения электронов η и его зависимость от параметров мишени.
9. Пространственное и угловое распределение отражённых электронов.
10. Понятие глубины выхода.
11. Генерирование рентгеновского излучения в образце под действием электронного зонда. Тормозное и характеристическое излучение.
12. Схема возбуждения K-, L-, M-линий характеристического излучения.
13. Правило Мозли.
14. Рентгеновская флуоресценция.

15. Область генерации рентгеновского излучения.
16. Принцип построения изображения в РЭМ. Система сканирования.
17. Искажения, возникающие при построении скана.
18. Детекторы электронов, применяемые в РЭМ.
19. Детектор Эверхарта-Торнли – основной тип детектора для РЭМ.
20. Формирование контраста в РЭМ. Топографический контраст и контраст по составу.
21. Методы обработки сигнала в РЭМ. Метод дифференциального усиления и метод дифференцирования.
22. Рентгеновский микроанализ. Схема кристалл-волнового спектрометра.
23. Рентгеновский микроанализ. EDS (энергодисперсионный) анализ.

Вопросы рейтинг-контроля

Рейтинг-контроль № 1

1. Изобразите схему просветного электронного микроскопа.
2. Назовите основные механизмы взаимодействия высокоэнергетичного электрона с мишенью.
3. Изобразите схему растрового электронного микроскопа.
4. Что такое длина свободного пробега электрона?
5. Объясните возникновение контраста в просвечивающем ЭМ.
6. Что такое сечение рассеяния электрона?
7. В чём состоит преимущество режима LV (низкий вакуум)?
8. Как зависит сечение упругого рассеяния электрона от атомного номера мишени?
9. Оцените пространственное разрешение просвечивающего ЭМ.

Рейтинг-контроль № 2

1. Каков спектр характеристического рентгеновского излучения?
2. Какими принципиальными физическими явлениями ограничено пространственное разрешение ЭМ?
3. Каков спектр тормозного рентгеновского излучения?
4. Почему в реальных ЭМ не удаётся достичь пространственного разрешения, ограниченного де Бройлевской длиной волны электрона?
5. Что такое вторичные электроны?
Какой вид (качественно!) имеет область взаимодействия электронного пучка с мишенью?
6. Перечислите типы катодов электронных колонн микроскопа. Объясните их преимущества и недостатки.
7. Дайте определение параметру «выход флуоресценции ω ». Как этот параметр зависит от атомного номера элемента Z ?
8. Почему в реальных ЭМ не удаётся достичь пространственного разрешения, ограниченного де Бройлевской длиной волны электрона?
9. Объясните возникновение контраста в просвечивающем ЭМ.

Рейтинг-контроль № 3

1. Как зависит сечение упругого рассеяния электрона от атомного номера мишени?
2. Опишите основные схемы регистрации спектров характеристического рентгеновского излучения (спектрометр с дисперсией по энергии и кристалл-дифракционный спектрометр). Отметьте их преимущества и недостатки.
3. В чём суть метода дифференциального усиления сигнала? В каких случаях целесообразно применение этого метода?

4. Опишите механизм образования контраста из-за различия атомного номера Z (контраст от состава).
5. Дайте определение параметру «критическая энергия ионизации». Для элемента с данным Z критическая энергия ионизации для К-оболочки будет (вставить нужное), чем для L-оболочки.
6. Опишите механизм образования топографического контраста с детектором Эверхарта-Торнли.
7. Как устроен и работает детектор типа «сцинтиллятор – фотоумножитель» (детектор Эверхарта-Торнли)?
8. Сформулируйте закон (правило) Мозли. В чём состоит его значение для рентгеновского микроанализа?
9. Изобразите качественно спектр рентгеновского излучения, генерируемого электронным зондом.

Вопросы для проверки самостоятельной работы студента:

1. Приведите выражение для дебройлевской длины волны квантовой частицы. Какова будет длина таковая длина волны для электрона, прошедшего разность потенциалов 30 кВ (типичное ускоряющее напряжение РЭМ) и 300 кВ (максимальное ускоряющее напряжение ПЭМ).
2. Почему в электронной микроскопии достигаемое пространственное разрешение многократно превосходит длину волны де Бройля, в то время как в оптической микроскопии разрешение сопоставимо с длиной волны света, на которой ведётся наблюдение?
3. Электронная оптика. Получение изображений в электронной оптике. Электростатические и магнитные линзы.
4. Аберрации электронных линз. Методы коррекции аберраций в современной электронной оптике?
5. Метод Монте-Карло моделирования взаимодействия высокоэнергетичных электронов с мишенью.
6. Принцип действия полупроводникового детектора отражённых электронов.
7. Основные закономерности спектров рентгеновского излучения. K , L и M серии. Закон Мозли.
8. Схема волнодисперсионного спектрометра. Использование дифракции на монокристалле для спектрального анализа рентгеновского излучения.
9. Принцип действия пропорционального газового детектора рентгеновских квантов.
10. Сравнение энергодисперсионного и волнового рентгеновского анализа. Их достоинства и недостатки.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Основная литература:

1. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение [Электронный ресурс] / под ред. У Жу, Ж. Л. Уанга ; пер. с англ.-2-е изд. (эл.).-Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 600 с.). - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. -Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". - ISBN 978-5-9963-2123-0. <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785996321230.html>

2. Величко А.А. Методы исследования микроэлектронных и нанозлектронных материалов и структур. Часть II [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Величко А.А., Филимонова Н.И.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014.— 227 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45105>

3. Сергеев А.Г. Нанометрология [Электронный ресурс]: монография/ Сергеев А.Г.— Электрон. текстовые данные.— М.: Логос, 2012.— 416 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/9122>

Дополнительная литература:

1. Кларк Э.Р. Микроскопические методы исследования материалов [Электронный ресурс]: монография/ Кларк Э.Р., Эберхард К.Н.— Электрон. текстовые данные.— М.: Техносфера, 2007.— 376 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12728>

2. Данилина Т.И. Оборудование для создания и исследования свойств объектов нанозлектроники [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Данилина Т.И., Чистоедова И.А.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Эль Контент, 2011.— 96 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13950>

3. Аракелян С. М. Введение в фемтонанофотонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов : учебное пособие по направлениям подготовки бакалавриата 200400 (200200) "Оптотехника", 200500 "Лазерная техника и лазерные технологии", 200700 (200600) "Фотоника и оптоинформатика" и специальностям 200200 "Оптотехника" и 200201 "Лазерная техника и лазерные технологии" / С. М. Аракелян [и др.] ; под общ. ред. С. М. Аракеяна .— Москва : Логос, 2015 .— 743 с. : ил., табл. + 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) (211 Мб) .— Библиогр. в конце ч. — С. М. Аракеян, А. О. Кучерик, В. Г. Прокошев, В. Г. Рау, А. Г. Сергеев - преподаватели ВлГУ .— ISBN 978-5-98704-812-2. Библиотека ВлГУ. <http://www.iprbookshop.ru/40504.html>

Интернет-ресурсы:

1. Список статей и публикаций сотрудников компании "Системы для Микроскопии и Анализа" (СМА)// Режим доступа: <http://www.microscop.ru/stati.html/>

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Лекционные аудитории, оснащённые доской (для мела или маркера), экраном для проекционных систем, проектором и ноутбуком.

Аудитории для проведения лабораторных и практических занятий, оснащённые современными персональными компьютерами, объединёнными в локальную вычислительную сеть и укомплектованными необходимым системным и прикладным программным обеспечением и научная лаборатория (104-3), где размещен РЭМ QUANTA 200 3D.

Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» программе подготовки: «Инженерно-физические технологии в nanoиндустрии»

Рабочую программу составил _____ М.Н. Герке
(ФИО, подпись)

Рецензент
(представитель работодателя) _____
(место работы, должность, ФИО, подпись)
кафедра физ. науки ФФП "ИИТ Рязань"

Программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФиПИМ
Протокол № 2А от 13.10.15 года
Заведующий кафедрой _____ С.М. Аракелян
(ФИО, подпись)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании учебно-методической комиссии направления 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» программе подготовки: «Инженерно-физические технологии в nanoиндустрии»
Протокол № 2А от 13.10.15 года
Председатель комиссии _____ С.М. Аракелян
(ФИО, подпись)

**ЛИСТ ПЕРЕУТВЕРЖДЕНИЯ
РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

Рабочая программа одобрена на _____ учебный год
Протокол заседания кафедры № _____ от _____ года
Заведующий кафедрой _____

Рабочая программа одобрена на _____ учебный год
Протокол заседания кафедры № _____ от _____ года
Заведующий кафедрой _____

Рабочая программа одобрена на _____ учебный год
Протокол заседания кафедры № _____ от _____ года
Заведующий кафедрой _____