

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол № 13 от 30.11.2022 г.

Рабочая программа дисциплины

Методы диагностики и анализа микро- и наносистем

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
03.04.02 - Физика

Направленность образовательной программы
магистерская программа «Физика конденсированного состояния»

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем» относится к вариативной части Б1.В блока Б1 «Дисциплины (модули)», является элективной дисциплиной, преподается на первом году обучения, во втором семестре.

Целями освоения дисциплины «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем» являются:

1. формирование представлений о современных методах диагностики микро- и наноматериалов твердотельной оптоэлектроники и наноэлектроники;
2. изучение методик проведения эксперимента путем выполнения практических лабораторных работ, основанных на исследовании реальных современных наносистем методами электронной спектроскопии и микроскопии;
3. изучение приборной базы современного научно-исследовательского оборудования с демонстрацией его возможностей.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-1 Способен самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта	<i>ПК-1.1. Знание принципов построения научной работы, методов сбора и анализа полученного материала ПК-1.2. Уметь осуществлять постановку и проведение экспериментов с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта ПК-1.3. Навыки решения поставленных задач с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта</i>	(ПК-1) Знать диаграммы основных характеристик современных аналитических методов и решений в области изучения микро- и наносистем; (ПК-1) Уметь формулировать цели и задачи научных исследований с обоснованным выбором оптимального аналитического метода и его режимов в соответствии с поставленными задачами исследования с предварительным анализом оригинальных научных работ; (ПК-1) Владеть опытом составления плана исследований в соответствии с поставленными целями и задачами, теоретическими обоснованиями и параметрами технических средств, опытом подготовки отчета по проделанным	Индивидуальные собеседования	Вопросы к экзамену

		исследованиям.		
--	--	----------------	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	4
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	34
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	110
Промежуточная аттестация	45 экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				Самостоятельная работа в течение семестра, часы
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Введение. Сравнительные характеристики аналитических методов. Введение в спектроскопию заряженных частиц.	4	1	1	–	2	2
2. Электронная оже-спектроскопия. Физические основы электронной оже-спектроскопии. Интерпретация оже-спектров. Оборудование электронной оже-спектроскопии.	11	2	2	–	4	7
3. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. Физические основы РФЭС. Интерпретация фотоэлектронных спектров. Оборудование РФЭС.	11	2	2	–	4	7
4. Математическая обработка спектральных данных.	9	1	1	–	2	7

5. Растровая электронная микроскопия. Контраст в растровой электронной микроскопии. Оборудование РЭМ.	11	2	2	–	4	7
6. Сканирующая оже-микроскопия.	11	2	2	–	4	7
7. Ионное профилирование состава. Источник ионов. Физические принципы ионного распыления.	9	1	1	–	2	7
8. Высоковакуумное оборудование. Основы вакуумной техники. Вакуумные насосы. Вакуумметры.	9	1	1	–	2	7
9. Подготовка образцов для методов электронной спектроскопии. Общие требования к образцам. Методы препарирования образцов.	11	2	2	–	4	7
10. Масс-спектро스코пия. Вторично-ионная масс-спектроскопия. Масс-анализаторы. Ионизация материала образца.	11	2	2	–	4	7
В т.ч. текущий контроль	2	2				–
Промежуточная аттестация – экзамен						

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних контрольных работ с последующей проверкой навыков решения задач.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к экзамену по дисциплине.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Экзамен	
Превосходно	Превосходная подготовка с очень незначительными погрешностями. Исчерпывающее и логически строгое изложение всех разделов дисциплины. Владение материалом позволяет быстро справиться с видеоизмененным заданием. Успешное решение любых типов практических заданий.
Отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с некоторыми ошибками. Твердое знание всех разделов дисциплины. Допускаются неточности, нарушения в последовательности изложения материала. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.

Очень хорошо	Хорошая подготовка с рядом заметных недочетов. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения основных типов практических заданий.
Хорошо	В целом, хорошая подготовка, но со значительными ошибками. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям. Знания основного содержания разделов дисциплины, допускаются грубые неточности, неправильные формулировки, нарушения в последовательности изложения материала. Имеющихся знаний достаточно для освоения дисциплин последующих курсов. Допускаются значительные ошибки при выполнении практических заданий.
Неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания. Незнание значительной части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.
Плохо	Подготовка совершенно недостаточная. Отсутствуют знания большей части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний совершенно недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.

6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация)
- устные и/или письменные ответы на вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии: практические контрольные задания. Типы практических контрольных заданий:

- выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Критерии ответа студента на экзамене

Оценка «отлично» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный и полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «хорошо» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности при этом допущены две–три незначительные ошибки, исправленные по требованию преподавателя и правильно; полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «удовлетворительно» – Ответ полный, но при этом допущена существенная ошибка или неполный, несвязный ответ и выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «неудовлетворительно» – Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не

могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя, не выполнены индивидуальные практические задания

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1 Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

Задание 1. Математическая обработка и качественный химический анализ в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

- а) Подстроить гауссианы для полученных спектров с учетом химического сдвига. Учесть наличие или отсутствие дублета.
- б) Определить для данных элементов по интегральной интенсивности гауссиан соотношение компонент, находящихся в соответствующих химических состояниях для данных элементов.

Задание 2. Локальный анализ методом сканирующей оже-микроскопии.

- а) Идентифицировать оже-линии в полученных спектрах и определить элементы, содержащиеся в образце.
- б) По оже-линии определить в атласе коэффициенты относительной элементной чувствительности.
- в) Построить профиль распределения концентраций элементов, по глубине используя метод факторов относительной чувствительности.
- г) Дать описание полученному профилю распределения: описать полученные результаты, объяснить, как может влиять на профиль распределения ионное травление и поверхностная зарядка.
- д) Сравнить полученные результаты локального анализа в дефекте и в области между ними.

Задание 3. Профилирование состава твердотельных структур по глубине методами электронной спектроскопии с ионным распылением.

- а) Найти каким элементам принадлежат представленные фотоэлектронные линии, используя атлас эталонных спектров.
- б) Построить профиль распределения концентрации элементов по глубине структуры, измеряя интегральную интенсивность фотоэлектронных линий.
- в) Провести анализ полученного профиля распределения концентрации по глубине.

Задание 4. Калибровка растрового электронного микроскопа.

Представлены РЭМ-изображения образца, полученные при различном ускоряющем напряжении на пушке и различном увеличении электронно-оптической системы. Величина ускоряющего напряжения на пушке влияет на увеличение. Определить реальный размер пикселя (нм) и всего РЭМ-изображения (мкм) по нескольким периодам на изображении, а

также рассчитать погрешность. При определении размера пикселя необходимо убрать из рассмотрения периоды, захватывающие левый край скана, так как в этой области присутствуют нелинейные искажения, а при определении размера скана искажениями пренебречь.

6.3.2. Вопросы для итогового контроля сформированности компетенции:

1. Сравнительные характеристики методов диагностики и анализа микро- и наносистем. Разновидности аналитического сигнала, пространственное и спектральное разрешение, чувствительность и ошибка, трудоемкость и экспрессность, пр. Влияние состава на свойства вещества и наноструктурированных материалов.
2. Взаимодействие электронного пучка с поверхностью твердого тела и возникающие при этом виды аналитического сигнала. Методы диагностики, реализованные на этом взаимодействии.
3. Физические основы метода электронной оже-спектроскопии. Энергия и вероятность оже-переходов, глубина анализа. Типичный спектр в ЭОС.
4. Интерпретация оже-спектров. Тонкая структура и артефакты на спектрах. Методы учета спектральных артефактов и борьбы с ними.
5. Качественный и количественный анализ в методе электронной оже-спектроскопии. Методы и пошаговый алгоритм количественного анализа.
6. Физические основы метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Энергия фотоэлектронов, глубина анализа. Типичный спектр в РФЭС. Соотношение на спектре между кинетической энергией фотоэлектрона, энергией первичного ХРИ и энергией связи на электронном уровне.
7. Интерпретация фотоэлектронных спектров. Тонкая структура и артефакты на спектрах. Методы учета спектральных артефактов и борьбы с ними.
8. Качественный и количественный анализ в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Методы и пошаговый алгоритм количественного анализа.
9. Устройство источника ХРИ в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Принцип работы комбинированного Al/Mg анода.
10. Принцип действия, формулы и сравнительные характеристики анализатора типа "цилиндрическое зеркало" и полусферического анализатора кинетических энергий электронов, не включая подробное описание работы (режимы) ПСА.
11. Полусферический анализатор. Принцип работы, режимы и их выбор. Оптическая система анализатора. Пространственное и энергетическое разрешение. Сохранение абсолютного и относительного разрешения по энергии.
12. Математическая обработка фотоэлектронных спектров. Источники помех и искажений на спектрах и способы их устранения. Фон. Работа с атласами эталонных спектров. Аппроксимация фотоэлектронных линий математическими функциями. Критерии правильности разложения спектральных линий.
13. Виды детекторов в методах электронной спектроскопии. Принцип работы блока канальных вторично-электронных умножителей с несколькими детекторами.
14. Виды контраста в методе растровой электронной микроскопии. Аналитический сигнал и применение различных режимов работы РЭМ. Математическая обработка РЭМ-изображений.
15. Устройство электронной пушки. Положения кроссовера и изменение тока электронного пучка.

16. Методика подготовки образцов для методов электронной спектроскопии и микроскопии, реализованных в условиях сверхвысокого вакуума. Дополнительные методы подготовки образца в вакууме.
17. Сканирующий оже-микроскоп. Принцип работы и режимы микроскопа/спектрометра. Картирование элементного состава поверхности. Общая схема сканирующего оже-микроскопа и алгоритм его работы.
18. Послойный анализ с использованием травления ионами. Взаимодействие ионного пучка с материалом образца. Разрешение по глубине при профилировании и погрешность определения глубины анализа.
19. Устройство и принцип работы источника ионов. Работа вакуумной системы при ионном профилировании.
20. Пошаговая процедура послойного анализа с ионным профилированием в методах электронной оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Различия для двух методов. Особые условия в методе РФЭС.
21. Пошаговая процедура послойного анализа с ионным профилированием в методе сканирующей оже-микроскопии.
22. Вакуумная система электронного спектрометра/микроскопа. Виды насосов и вакууметров. Требования к материалам вакуумной камеры. Требования к образцам и процесс их загрузки. Исследования *in situ*.
23. Общие характеристики метода масс-спектроскопии. Статические и динамические масс-анализаторы. Сравнительные характеристики масс-анализаторов: разрешение по массе, чувствительность, экспрессность анализа. Интерпретация масс-спектров.
24. Схема масс-спектрометра. Ионный микроскоп.
25. Источники ионов, сравнительные характеристики и применение для различных материалов.
26. Принцип работы вторично-ионного масс-спектрометра. Принцип профилирования состава в ВИМС. Изображение в ВИМС, локальный анализ состава и разрешение ВИМС.

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Учебные аудитории могут быть при необходимости оснащены демонстрационным оборудованием для сопровождения учебных занятий презентациями.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

доцент кафедры физики полупроводников и оптоэлектроники физического факультета, к. ф.-м. н. Д.Е. Николичев.

Рецензенты(ы):

Зав. кафедрой физики полупроводников и оптоэлектроники физического факультета, д. ф.-м. н., профессор Д.А. Павлов.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 17.11.2022, протокол № б/н.