

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

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

УТВЕРЖДЕНО
решением
Ученого совета ННГУ
протокол от
« ____ » _____ 202_ г. № ____

Рабочая программа дисциплины

Методы диагностики и анализа микро- и наносистем

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

магистерская программа "Квантовые и нейроморфные технологии"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

магистр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

Очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2023

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижегород

1. Место и цели 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:

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

2. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем» составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 34 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (2 часа – мероприятия промежуточной аттестации; 16 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 74 часа составляет самостоятельная работа обучающегося (38 часов самостоятельная работа в течение семестра, 36 часов самостоятельная работа при подготовке к промежуточной аттестации).

Содержание дисциплины «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем»

| Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины | Всего (часы) | В том числе | | | | |
|--|--------------|--|---------------------------|----------------------------|-------|---|
| | | контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них | | | | Самостоятельная работа в течение семестра, часы |
| | | 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-спектроскопия. Вторично-ионная масс-спектроскопия. Масс-анализаторы. Ионизация материала образца. | 11 | 2 | 2 | – | 4 | 7 |

| | | | |
|------------------------------------|---|---|---|
| В т.ч. текущий контроль | 2 | 2 | — |
| Промежуточная аттестация – экзамен | | | |

3. Образовательные технологии

- 1) Чтение лекций;
- 2) сопровождение лекций написанием и выводом формул, построением графиков, изображением рисунков на доске;
- 3) сопровождение лекций презентациями;
- 4) методика «вопросы и ответы»;
- 5) выполнение практического задания у доски;
- 6) индивидуальная работа над практическим заданием;
- 7) работа в парах над практическим заданием;
- 8) работа в малых группах над практическим заданием;
- 9) методика «мозговой штурм».

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы, выполнение практических заданий, отвечающих изучаемым разделам дисциплины, подготовку к промежуточной аттестации.

Перечень основной и дополнительной литературы для самостоятельного изучения приведен в п. 7 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации, примеры практических заданий приведены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

5. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

| Формируемые компетенции | Планируемые результаты обучения по дисциплине |
|---|--|
| ПК-2 Способен самостоятельно анализировать, не предвзято оценивать и ориентироваться в передовых теоретических концепциях и достижениях современной физики | (ПК-2) Знать диаграммы основных характеристик современных аналитических методов и решений в области изучения микро- и наносистем. (ПК-2) Уметь формулировать цели и задачи научных исследований с обоснованным выбором оптимального аналитического метода и его режимов в соответствии с поставленными задачами |

| | |
|--|--|
| | <p>исследования с предварительным анализом оригинальных научных работ.</p> <p>(ПК-2) Владеть опытом составления плана исследований в соответствии с поставленными целями и задачами, теоретическими обоснованиями и параметрами технических средств, опытом подготовки отчета по проделанным исследованиям.</p> |
|--|--|

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем» является **экзамен**.

По итогам экзамена выставляется оценка по семибалльной шкале: оценки «Плохо» и «Неудовлетворительно» означают отсутствие аттестации, оценки «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично» и «Превосходно» выставляются при успешном прохождении аттестации.

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).

Контрольные вопросы для индивидуального собеседования представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

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

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

Примеры практических заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Критериями оценивания являются полнота знаний, наличие умений и владений (навыков), перечисленных в п. 5 настоящей Рабочей программы дисциплины.

«Плохо» – обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса, не показал никаких умений и навыков выполнения практических заданий;

«Неудовлетворительно» – обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий;

«Удовлетворительно» – обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности;

«Хорошо» – обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

«Очень хорошо» – обучающийся продемонстрировал связное изложение практически всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

«Отлично» – обучающийся продемонстрировал связное изложение всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий повышенного уровня сложности;

«Превосходно» – обучающийся продемонстрировал уровень знаний в объеме, превышающем стандартную программу подготовки, и продемонстрировал творческий подход к выполнению практических заданий повышенного уровня сложности.

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

6.3.1. При проведении промежуточной аттестации обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем»:

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-спектропии. 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.

6.3.2. 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.

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

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

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

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

- 1 Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение [Электронный ресурс] / под ред. У. Жу, Ж. Л. Уанга ; пер. с англ. – Эл. изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 582 с. – Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785996321230-SCN0001/001.html>.
- 2 Методы структурных исследований материалов. Методы микроскопии [Электронный ресурс] : учебное пособие / Э.Ф. Вознесенский, Ф.С. Шарифуллин, И.Ш. Абдуллин. – Казань : Издательство КНИТУ, 2014. – Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785788215457.html>.
- 3 Спектроскопия [Электронный ресурс] / Ю. Бёккер. – М. Техносфера, 2009. – Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785948362205.html>.
- 4 Д.Е. Николичев, А.В. Боряков. Локальная диагностика состава полупроводниковых наносистем методом сканирующей оже-микроскопии. Учебно-методическое пособие. – Н. Новгород: Изд-во нижегородского госуниверситета, 2011. – 110 с. Фонд образовательных электронных ресурсов – рег. №405.12.05. – Свободный доступ: http://www.unn.ru/books/met_files/NikolitchevBoryakov.pdf.
- 5 Д.Е. Николичев, А.В. Боряков, С.И. Суродин, Р.Н. Крюков. Химический анализ твердотельных гетеронаносистем методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Учебно-методическое пособие. – Н. Новгород: Изд-во нижегородского госуниверситета, 2014. – 73 с. Фонд образовательных электронных ресурсов – рег. №665.14.05. – Свободный доступ: http://www.unn.ru/books/met_files/esca.pdf.

б) дополнительная литература:

- 1 Справочное руководство по аналитической химии и физико-химическим методам анализа [Электронный ресурс] : Учеб. пособие / И.В. Тикунова,

- Н.В. Дробницкая, А.И. Артеменко и др. – М. : Абрис, 2012. – Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200759.html>.
- 2 Физические основы электронной спектроскопии заряженных поверхностей твердых тел: монография [Электронный ресурс] / А.Т. Козаков. – Ростов н/Д : Изд-во ЮФУ, 2009. – <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785927507115.html>.
 - 3 Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч. 1. Инженерно-физические основы [Электронный ресурс] : учебное пособие / М.Х. Хаблянян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. – Казань : Издательство КНИТУ, 2013. – <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785788214474.html>.
 - 4 Электронная спектроскопия [под ред. И.Б. Боровского] / К. Зигбан, К. Нордлинг, А. Фальман [и др.] – М.: Мир, 1971. – 493 с. – Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ: 4 экз. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=81907>.
 - 5 Гайкович, К.П. Деконволюция изображений в сканирующей оже-микроскопии и в сканирующей электронной микроскопии / К.П. Гайкович, В.Ф. Дряхлушин, Д.Е. Николичев // Нано- и микросист. техника. – 2005. - №5. - С. 30. – Свободный доступ: <http://www.microsystems.ru/files/full/mc200505.pdf>.
 - 6 Нанохимия [Электронный ресурс] / Сергеев Г.Б. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Московского государственного университета, 2007. – Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785211053724.html>.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ
<http://www.lib.unn.ru/>.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

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.

_____ / Николичев Д.Е. /

Рецензент(ы):

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

_____ / Павлов Д.А. /

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ от «____» _____ 2023 года, протокол
№ б/н.

Председатель
Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

_____ / Перов А.А. /