

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 "30" ноября 2023 г. №13

Рабочая программа дисциплины
«Методы диагностики и анализа микро- и наносистем»

Уровень высшего образования
Подготовка научных и научно-педагогических кадров

Программа аспирантуры
1.3.11. Физика полупроводников

Научная специальность
03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Форма обучения
Очная

Нижний Новгород
2023 год

1. Место и цель дисциплины в структуре ПА

Дисциплина «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем» относится к числу *элективных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 2 году обучения в 4 семестре.

Цель дисциплины –

- формирование представлений о современных методах диагностики микро- и наноматериалов твердотельной опто- и наноэлектроники;
- изучение методик проведения эксперимента путем выполнения практических лабораторных работ, основанных на исследовании современных наносистем методами электронной спектроскопии и микроскопии;
- изучение математических подходов к обработке и интерпретации электронных спектров и изображений электронной микроскопии;
- изучение приборной базы современного научно-исследовательского оборудования с демонстрацией его возможностей.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

Знать:

- базовую информацию, современную научную, техническую и патентную литературу о методах диагностики микро- и наноматериалов твердотельной опто- и наноэлектроники.

Уметь:

- применять приборную базу современного научно-исследовательского оборудования с демонстрацией его возможностей

Владеть:

- методикой проведения эксперимента путем выполнения практических лабораторных работ, основанных на исследовании современных наносистем методами электронной спектроскопии и микроскопии

3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа – 36 часов), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2

Структура дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1. Введение	4	2				2	2

2. Электронная оже-спектроскопия	4	2				2	2
3. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия	8	4				4	4
4. Математическая обработка спектральных данных	8	4				4	4
5. Растровая электронная микроскопия	8	4				4	4
6. Сканирующая оже-микроскопия	8	4				4	4
7. Ионное профилирование состава	8	4				4	4
8. Углеродные нанотрубки	8	4				4	4
9. Подготовка образцов для методов электронной спектроскопии	8	4				4	4
10. Масс-спектроскопия	8	4				4	4
Промежуточная аттестация:	зачет						
Итого	72	36				36	36

Таблица 3

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1.	Введение	Сравнительные характеристики аналитических методов Введение в спектроскопию заряженных частиц	Лекции, практические занятия	Зачёт
2.	Электронная оже-спектроскопия	Физические основы ЭОС Интерпретация оже-спектров Оборудование ЭОС	Лекции, практические занятия	Зачёт
3.	Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия	Физические основы РФЭС Интерпретация фотоэлектронных спектров Оборудование РФЭС	Лекции, практические занятия	Зачёт
4.	Математическая обработка спектральных данных	Методы вычитания фона, сглаживания и дифференцирования спектра. Работа с атласами эталонных спектров. Изучение программного обеспечения обработки спектральных данных. Аппроксимация спектров функциями Гаусса и Лоренца. Методика количественного анализа химических соединений на основе спектров фотоэлектронов.	Лекции, практические занятия	Зачёт

5.	Растровая электронная микроскопия	Контраст в растровой электронной микроскопии Оборудование РЭМ	Лекции, практические занятия	Зачёт
6.	Сканирующая оже-микроскопия	Объединенный метод растровой электронной микроскопии и электронной оже-спектроскопии для изучения состава в нанометровом масштабе. Принцип действия. Алгоритмы работы. Режим локальной оже-спектроскопии и режим картирования состава. Общая схема сканирующего оже-микроскопа.	Лекции	Зачёт
7.	Ионное профилирование состава	Источник ионов Физические принципы ионного распыления	Лекции, практические занятия	Зачёт
8.	Углеродные нанотрубки	Основы вакуумной техники Вакуумные насосы. Вакууметры	Лекции, практические занятия	Зачёт
9.	Подготовка образцов для методов электронной спектроскопии	Общие требования к образцам Методы препарирования образцов	Лекции, практические занятия	Зачёт
10.	Масс-спектроскопия	Вторично-ионная масс-спектроскопия Масс-анализаторы Ионизация материала образца	Лекции, практические занятия	Зачёт

4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа включает в себя теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы.

Также самостоятельная работа предусмотрена при освоении материала разделов 2 - 7. Она связана с теоретической подготовкой к допуску и с написанием отчетов по лабораторным работам. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, Интернет-ресурсам.

Контроль самостоятельной работы проводится в виде тестирования.

5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;

- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета

Оценка	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине

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. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.

а) основная литература:

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.

<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. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785788215457.html>
- 3 Спектроскопия [Электронный ресурс] / Бёккер Ю. - М. Техносфера, 2009. <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785948362205.html>
- 4 Николичев Д.Е., Боряков А.В. "Локальная диагностика состава полупроводниковых наносистем методом сканирующей оже-микроскопии". Учебно-методическое пособие. – Н. Новгород, Изд-во нижегородского госуниверситета, 2001. -110 с. Фонд образовательных электронных ресурсов –рег. №405.12.05. http://www.unn.ru/books/met_files/NicolitchevBoryakov.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. 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. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200759.html>
- 2 Физические основы электронной спектроскопии заряженных поверхностей твердых тел: монография [Электронный ресурс] / Козаков А.Т. - 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 К. Зигбан. Электронная спектроскопия [под ред. И. Б. Боровского] М.:Мир, 1971. – 493 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=81907&DB=1>
- 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.
- 6 Нанохимия [Электронный ресурс] / Сергеев Г.Б. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Издательство Московского государственного университета, 2007. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785211053724.html>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы :

Материалы лекций на сайте физического факультета ННГУ

<http://phys.unn.ru/content.asp?CatId=307&ContentType=Library>

- 2 Программное обеспечение для обработки спектральных данных CasaXPS. Распространится свободно с ограничением функционала <http://www.casaxps.com/>
- 3 Программное обеспечение для обработки микроскопических изображений Gwyddion <http://gwyddion.net/>
- 4 Онлайн базы данных фотоэлектронных и оже-спектров <https://srdata.nist.gov/xps/>
5. Открытый проект Materials Project <https://www.materialsproject.org/>.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
 - материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
 - лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
 - обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.
- ресурсам.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Автор (ы) проф. _____ Демидов Е. С

Рецензент (ы) _____

Заведующий кафедрой проф. _____ Павлов Д.А.

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от _____ 2022 года, протокол № б/н