

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 № 4 от 26.04.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Методы диагностики и анализа микро-и наносистем

Уровень высшего образования

Магистратура

Направление подготовки / специальность

28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника

Направленность образовательной программы

Квантовые и нейроморфные технологии

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.03.02 Методы диагностики и анализа микро-и наносистем относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

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-2: Способен разрабатывать методики проведения исследований и измерений параметров и характеристик микро- и наносистем, изделий нанотехнологии и нанoeлектроники, анализировать их результаты	<p>ПК-2.1: Имеет представление о существующих методиках проведения исследований и измерений параметров и характеристик микро- и наносистем, изделий нанотехнологии и нанoeлектроники, а также знаком с методами анализа результатов исследований и измерений</p> <p>ПК-2.2: Проводит исследования и измерения параметров и характеристик микро- и наносистем, изделий нанотехнологии и нанoeлектроники, а также анализирует результаты исследований и измерений</p> <p>ПК-2.3: Разрабатывает методики проведения исследований и измерений характеристик микро- и наносистем, изделий нанотехнологии и нанoeлектроники</p>	<p>ПК-2.1:</p> <p>Знать основы вакуумной техники, которые используются для конструирования систем и устройств нанoeлектроники.</p> <p>Уметь использовать математический аппарат для обработки спектральных данных.</p> <p>Владеть навыками анализа электронных спектров для исследования химического состава твердотельных наноструктур.</p> <p>ПК-2.2:</p> <p>Знать методы электронной спектроскопии и микроскопии, которые используются для исследования наноструктурированных систем и устройств нанoeлектроники.</p> <p>Уметь применять необходимые режимы работы электронного спектрометра и микроскопа в зависимости от исследуемых наноматериалов и структур.</p> <p>Владеть навыками анализа микроскопических</p>	Отчет по лабораторным работам	Экзамен: Контрольные вопросы

		<p>изображений для исследования химического состава твердотельных наноструктур.</p> <p>ПК-2.3: Знать методы масс-спектрометрии, которые используются для исследования наноструктурированных систем и устройств нанoeлектроники.</p> <p>Уметь использовать математический аппарат для обработки микроскопических изображений.</p> <p>Владеть навыками использования математического аппарата для анализа электронных спектров и микроскопических изображений.</p>		
--	--	--	--	--

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):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	49
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 разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе	
		Контактная работа (работа во	Самостоятельная

		взаимодействии с преподавателем), часы из них			работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора- торные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Сравнительные характеристики аналитических методов	3.5	1.5		1.5	2
Введение в спектроскопию заряженных частиц	2.5	0.5		0.5	2
Физические основы электронной оже-спектроскопии	3.5	1	0.5	1.5	2
Интерпретация оже-спектров	7	3	1	4	3
Оборудование электронной оже-спектроскопии	2.5	1	0.5	1.5	1
Физические основы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии	4	1	1	2	2
Интерпретация фотоэлектронных спектров	8	4	1	5	3
Оборудование рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии	5	1	1	2	3
Математическая обработка спектральных данных	14	6	3	9	5
Контраст в растровой электронной микроскопии	6	3	1	4	2
Оборудование растровой электронной микроскопии	4	1	1	2	2
Сканирующая оже-микроскопия	6	3	1	4	2
Источник ионов	4.5	0.5	1	1.5	3
Физические принципы ионного распыления	4.5	1.5	1	2.5	2
Основы вакуумной техники	4.5	0.5	1	1.5	3
Вакуумные насосы. Вакууметры	3.5	0.5	1	1.5	2
Общие требования к образцам	3	0.5	0.5	1	2
Методы препарирования образцов	3	0.5	0.5	1	2
Вторично-ионная масс-спектроскопия	2.5	0.5		0.5	2
Масс-анализаторы	3	1		1	2
Ионизация материала образца	2.5	0.5		0.5	2
Аттестация	45				
КСР	2			2	
Итого	144	32	16	50	49

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение в современные диагностические и аналитические методы

Сравнительные характеристики аналитических методов: электронной-оже спектроскопии рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, растровой электронной микроскопии, сканирующей оже-микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, вторично-ионной масс-спектроскопии, рентгеновского микроанализа, рентгеновской дифракции, атомно-абсорбционной спектроскопии, атомно-эмиссионной спектроскопии, атомно-флуоресцентной спектроскопии, фурье-спектроскопии, спектроскопии фотолюминесценции, спектроскопии фотопроводимости, сканирующей зондовой микроскопии. Сравнение методов спектроскопии заряженных частиц с методами спектроскопии электромагнитного излучения.

Введение в спектроскопию заряженных частиц. Общие принципы аналитических методов электронной и

ионной спектроскопии.

2. Электронная оже-спектроскопия

Физические основы ЭОС. Энергия оже-перехода. Вероятность оже-процесса. Ширина оже-пики.

Глубина выхода оже-электрона. Типичный спектр вторичных электронов.

Интерпретация оже-спектров. Тонкая структура оже-спектров: химический сдвиг, мультиплетное расщепление, плазмонные потери.Arteфакты оже-спектров. Качественный и количественный анализ.

Методы эталонных образцов, факторов относительной чувствительности, градуировочной кривой.

Оборудование ЭОС. Сверхвысоковакуумная система. Анализатор кинетической энергии электронов типа «цилиндрическое зеркало». Полусферический анализатор энергии. Формула анализатора. Режимы работы полусферического анализатора.

3. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

Физические основы РФЭС. Соотношение между кинетической энергией фотоэлектрона, энергией первичного ХРИ и энергией связи на электронном уровне. Ширина фотоэлектронных линий. Глубина выхода фотоэлектронов. Типичный фотоэлектронный спектр.

Интерпретация фотоэлектронных спектров. Тонкая структура фотоэлектронных спектров: химический сдвиг, оже-серии, мультиплетное расщепление, спутники встряски и стряхивания, плазмонные потери, спектр валентной зоны. Arteфакты фотоэлектронных спектров: рентгеновские спутники и духи. Фон в спектре фотоэлектронов.

Оборудование РФЭС. Требования к вакуумной системе и образцам. Источник рентгеновского излучения. Устройство комбинированного Al/Mg анода.

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.

5. Растровая электронная микроскопия

Контраст в РЭМ. Взаимодействие пучка первичных электронов с материалом образца. Топографический контраст. Контраст в обратнорассеянных электронах. Вольтовый контраст. Магнитный контраст.

Контраст в наведенных электронах. Каналирование.

Оборудование РЭМ. Виды катодов. Устройство электронной пушки. Положения кроссовера и ток электронного пучка. Принцип формирования развертки и детектирование сигнала от вторичных электронов.

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.

7. Ионное профилирование состава

Источник ионов. Принцип работы. Работа вакуумной системы при проведении ионного травления.

Физические принципы ионного распыления. Взаимодействие ионного пучка с материалом образца.

Разрешение по глубине при профилировании и погрешность определения глубины анализа.

8. Высоковакуумное оборудование

Основы вакуумной техники. Требования, предъявляемые к материалам и устройствам, способу изготовления и обработки, в области высоковакуумного оборудования. Виды фланцев и прокладок к ним. Применение отжига для создания сверхвысоковакуумного вакуума.

Вакуумные насосы. Вакууметры. Насосы для сверхвысоковакуумного оборудования: роторный форвакуумный, турбомолекулярный, диффузионный, ионно-геттерный, сублимационный. Вакууметры ионизационные, мембранно-емкостные, термопарные, тепловые.

9. Подготовка образцов для методов электронной спектроскопии

Общие требования к образцам. Требования, обусловленные сверхвысоковакуумным оборудованием.

Требования, определяемые методами изучения образцов.

Методы препарирования образцов. Предварительная подготовка образцов: механическая и ионная очистка. Подготовка образцов в вакууме: ионная и термическая обработка, скалывание. Исследования *in situ*. Процесс загрузки образца в сверхвысоковакуумный объем.

10. Вторично-ионная масс-спектропия

Вторично-ионная масс-спектропия. Взаимодействие первичных ионов с анализируемым веществом. Фокусированный ионный пучок. Аппаратная часть вторично-ионного масс-спектрометра.

Масс-анализаторы. Общая схема масс-спектрометра. Разрешающая способность масс-анализа, пространственное разрешение вторично-ионного масс-спектрометра. Принцип разделения ионов по массе в магнитном и электрическом полях. Времяпролетный, радиочастотный и квадрупольный масс-анализаторы. Сравнительные характеристики масс-анализаторов.

Ионизация материала образца. Ионизация электронным ударом. Фотоионизация. Ионизация в электрическом поле. Ионизация лазерным излучением. Ионизация ионным ударом.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход. Учебно-методическое пособие. /Сост. П.А. Шиляев, Д.А. Павлов. – Н.Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 18 с.
http://www.nanotech.unn.ru/sites/default/files/13_semiconductors_heterotransition.pdf

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

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

Типовые вопросы для допуска к лабораторным работам

1. Подходы к нахождению полного момента количества движения в рамках концепции \mathbf{j} и \mathbf{L} .
2. Физические принципы, лежащие в основе методов РФЭС и ЭОС. Глубина выхода оже- и фотоэлектронов.
3. Типичный спектр в методах электронной спектроскопии. Особенности, наблюдаемые на спектрах.
4. Химический сдвиг в методах электронной спектроскопии.
5. Тонкая структура оже- и фотоэлектронных спектров. Оже-параметр.
6. Артефакты оже- и фотоэлектронных спектров.

Практические задания для лабораторного практикума

Каждое задание присутствует в 4 вариантах, и, соответственно, слушатели делятся на 4 подгруппы.

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 отсутствия 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.

Требования к отчету по лабораторным работам

По результатам выполнения лабораторной работы обучающийся обязан написать отчет. Отчет должен включать следующие обязательные элементы: содержание, цель работы, теоретическая часть, методика эксперимента, экспериментальную часть, включающую описание и обсуждение результатов, заключение и/или выводы, список использованных источников. Отчет не должен содержать неправомерных заимствований.

Объем отчета – 15-30 стр. формата А4 (шрифт Times New Roman 12 пт, междустрочный интервал – полуторный, интервал между абзацами – отсутствует, поля – верхнее 2 см, нижнее 2 см, левое 3 см, правое 1,5 см).

Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Даны ответы на контрольные вопросы, предоставлен отчет об анализе экспериментальных данных.
не зачтено	Не предоставлен отчет об анализе экспериментальных данных.

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений.	При решении стандартных задач не	Продемонстрированы основные	Продемонстрированы все	Продемонстрированы все	Продемонстрированы все	Продемонстрированы все основные

	Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-2

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.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Отличная подготовка. Обучающийся отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
отлично	Отличная подготовка. Обучающийся отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
очень хорошо	Хорошая подготовка. Обучающийся показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.
хорошо	Хорошая подготовка. Обучающийся показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя.
удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Обучающийся показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.
неудовлетворительно	Обучающийся показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна

Оценка	Критерии оценивания
	только с комиссией.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Ищенко А. А. Методы анализа поверхности. Ч. 2. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия / Ищенко А. А., Лазов М. А. - Москва : РТУ МИРЭА, 2022. - 58 с. - Книга из коллекции РТУ МИРЭА - Химия., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=807354&idb=0>.
2. Ищенко А. А. Методы анализа поверхности : Учебное пособие. Ч. 1. Методы локального анализа изэлектронная микроскопия / Ищенко А. А., Лукьяно А. Е. - Москва : РТУ МИРЭА, 2021. - 49 с. - Книга из коллекции РТУ МИРЭА - Химия., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=801431&idb=0>.
3. Козаков Алексей Титович. Физические основы электронной спектроскопии заряженных поверхностей твердых тел : Монография / Южный федеральный университет. - Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2009. - 406 с. - ВО - Магистратура. - ISBN 978-5-9275-0711-5., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=608919&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Нанохимия / Сергеев Г.Б. - Москва : МГУ, 2007., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=637851&idb=0>.
2. Николичев Дмитрий Евгеньевич. Локальная диагностика состава полупроводниковых наносистем методом сканирующей оже-микроскопии : учебно-методическое пособие / Д. Е. Николичев, А. В. Боряков ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2011. - 110 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=851142&idb=0>.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

- 1) Интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом www.eqworld.ipmnet.ru;
- 2) интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ <http://www.lib.unn.ru/>;
- 3) открытый проект Materials Project <https://www.materialsproject.org/>.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, специализированным оборудованием: лабораторным оборудованием ННГУ.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника.

Автор(ы): Крюков Руслан Николаевич, кандидат физико-математических наук
Николичев Дмитрий Евгеньевич, кандидат физико-математических наук.

Рецензент(ы): Конаков Антон Алексеевич, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 15.04.2024, протокол № б/н.