

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Структурное подразделение «Радиоэлектроники и телекоммуникационных систем»

УТВЕРЖДЕНА:
на заседании кафедры
Протокол №13 от 02 июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины

«МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРО- И НАНОСИСТЕМ»

Направление: 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Материалы микро- и наносистемной техники

Квалификация: Магистр

Форма обучения: очная

Документ подписан простой
электронной подписью
Составитель программы:
Иванов Николай Аркадьевич
Дата подписания: 08.08.2025

Документ подписан простой
электронной подписью
Утвердил: Ченский Александр
Геннадьевич
Дата подписания: 22.09.2025

Документ подписан простой
электронной подписью
Согласовал: Ниндакова Лидия
Очировна
Дата подписания: 27.08.2025

Год набора – 2025

Иркутск, 2025 г.

1 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

1.1 Дисциплина «Методы исследования микро- и наносистем» обеспечивает формирование следующих компетенций с учётом индикаторов их достижения

Код, наименование компетенции	Код индикатора компетенции
ПК-7 Способен проводить профессиональную деятельность по контролю структуры и свойств материалов и компонентов микро- и наносистемной техники	ПК-7.1

1.2 В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы

Код индикатора	Содержание индикатора	Результат обучения
ПК-7.1	Знать: классификацию методов исследования материалов и компонентов микро- и наносистемной техники; физические основы работы современного аналитического и измерительного оборудования. Уметь: обосновывать выбор метода и оборудования для исследования параметров изделий нанотехнологии и микросистемной техники; производить контроль и диагностику структуры и свойств микро- и наносистем. Владеть: навыками использования современного аналитического и измерительного оборудования для исследования параметров изделий нанотехнологии и микросистемной техники	Знать Знать классификацию методов исследования материалов и компонентов микро- и наносистемной техники; физические основы работы современного аналитического и измерительного оборудования Уметь Уметь обосновывать выбор метода и оборудования для исследования параметров изделий нанотехнологии и микросистемной техники; производить контроль и диагностику структуры и свойств микро- и наносистем. Владеть Владеть навыками использования современного аналитического и измерительного оборудования для исследования параметров изделий нанотехнологии и микросистемной техники.

2 Место дисциплины в структуре ООП

Изучение дисциплины «Методы исследования микро- и наносистем» базируется на результатах освоения следующих дисциплин/практик: «Компьютерные технологии в наноэлектронике и микросистемной технике», «Методы математического моделирования»

Дисциплина является предшествующей для дисциплин/практик: «Микро- и наносистемы в технике и технологии», «Испытания и диагностика микро- и наносистем»

3 Объем дисциплины

Объем дисциплины составляет – 4 ЗЕТ

Вид учебной работы	Трудоемкость в академических часах (Один академический час соответствует 45
--------------------	--

	минутам астрономического часа)	
	Всего	Семестр № 2
Общая трудоемкость дисциплины	144	144
Аудиторные занятия, в том числе:	42	42
лекции	14	14
лабораторные работы	14	14
практические/семинарские занятия	14	14
Самостоятельная работа (в т.ч. курсовое проектирование)	66	66
Трудоемкость промежуточной аттестации	36	36
Вид промежуточной аттестации (итогового контроля по дисциплине)	Экзамен	Экзамен

4 Структура и содержание дисциплины

4.1 Сводные данные по содержанию дисциплины

Семестр № 2

№ п/п	Наименование раздела и темы дисциплины	Виды контактной работы						СРС		Форма текущего контроля
		Лекции		ЛР		ПЗ(СЕМ)				
		№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Методы исследования микро- и наносистем	1	2			1	4	3, 4	32	Устный опрос
2	Метод рентгеновской дифракции	2	2	1	4	2	4			Устный опрос
3	Метод растровой электронной микроскопии	3	2	3	4	3	4	2	24	Устный опрос
4	Метод сканирующей зондовой микроскопии	4	2	2	4					Устный опрос
5	Методы исследования электрических свойств микро- и наносистем	5	2							Устный опрос
6	Методы исследования магнитных свойств микро- и наносистем	6	2			4	2	1	10	Устный опрос
7	Оптические методы исследования свойств микро- и наносистем	7	2	4	2					Устный опрос
	Промежуточная аттестация								36	Экзамен

	Всего		14		14		14		102	
--	-------	--	----	--	----	--	----	--	-----	--

4.2 Краткое содержание разделов и тем занятий

Семестр № 2

№	Тема	Краткое содержание
1	Методы исследования микро- и наносистем	Классификация методов исследования микро- и наносистем. Объёмная и поверхностная концентрация атомов. Степень заполнения и коэффициент прилипания. Виды адсорбции. Связь между потоком атомов и давлением и температурой окружающей среды. Сверхвысокий вакуум (СВВ). Принципы изготовления систем СВВ. Классификация современных вакуумных насосов. Последовательность проведения эксперимента в условиях СВВ. Основные способы получения атомарно чистой поверхности.
2	Метод рентгеновской дифракции	Метод рентгеновской дифракции. Историческая справка. Рентгеновское излучение: источники и принцип генерирования Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализы. Область когерентного рассеяния. Индексы Миллера. Закон Вульфа-Брэгга. Качественный и количественный дифракционный анализ. Формула Дебая-Шеррера. Влияние искажений решётки на положение и форму дифракционного максимума. Устройство рентгеновского дифрактометра. Пробоподготовка к рентгенофазовому анализу.
3	Метод растровой электронной микроскопии	Метод растровой электронной микроскопии. Историческая справка. Преимущества растровых электронных микроскопов (РЭМ). Процессы, происходящие при взаимодействии материала вещества с пучком электронов (упругое и неупругое рассеяние). Вторичные и обратно рассеянные электроны. Устройство РЭМ. Контраст и разрешение РЭМ. Рентгеноспектральный качественный и количественный микроанализ.
4	Метод сканирующей зондовой микроскопии	Метод сканирующей зондовой микроскопии. Историческая справка. Достоинства и области применения сканирующей зондовой микроскопии. Принцип работы сканирующего зондового микроскопа (СЗМ). Электрохимическое травление зонда. Сканирующие элементы (сканеры) СЗМ (трубчатые и биморфные пьезоэлементы и пьезосканеры). Недостатки пьезокерамики (нелинейность, крип, гистерезис). Защита СЗМ от внешних воздействий (вибраций, акустических шумов, термодрейфа). Побочная информация, искажающая данные о морфологии и свойствах поверхности. Атомно-силовая микроскопия.
5	Методы исследования	Электрические свойства материалов (общие

	электрических свойств микро- и наносистем	положения): электрическое сопротивление, сила тока, напряжение. Структура энергетических зон в проводниках, полупроводниках и диэлектриках. Зависимость проводимости различных типов материалов от температуры. Методы измерения удельного сопротивления полупроводников: двухзондовый метод, четырёхзондовый метод. Удельная электропроводность, концентрация и подвижность носителей заряда. Эффект Холла. Метод холловских измерений. Пробоподготовка (образцы квадратной формы, в форме двойного креста Холла, произвольной формы).
6	Методы исследования магнитных свойств микро- и наносистем	Магнитные свойства материалов (общие положения): намагничённость, магнитная восприимчивость, магнитная проницаемость. Слабوماгнитные и сильномагнитные вещества. Классы магнитных веществ (диа-, пара-, ферро-, антиферро-, ферримагнетики, идеальные диамагнетики). Температура Кюри. Температура Нееля. Кривая намагничивания. Петля гистерезиса. Магнитотвердые и магнитомягкие материалы. Основные методы исследования свойств (баллистический, магнитометрический, электродинамический, индукционный и др.). Магнитометры (магнитостатические, индукционные, квантовые). СКВИД-магнитометры. Методы обработки результатов магнитных измерений.
7	Оптические методы исследования свойств микро- и наносистем	Коэффициенты и спектры отражения, пропускания и поглощения. Прямые и обратные оптические задачи. Классификация оптических методов исследования (рефрактометрия, поляриметрия, абсорбционные оптические методы), их достоинства и недостатки. Основные факторы, влияющие на величину показателя преломления. Приборы для измерения показателя преломления (рефрактометры Аббе и Пульфриха) и угла вращения плоскости поляризации (поляриметры, сахариметры и спектрополяриметры). Основные оптические методы исследования микро- и наноматериалов: спектроскопия комбинационного рассеяния, фотолюминесцентная спектроскопия, дисперсионная спектрофотометрия, Фурье-спектрометрия (физические принципы, приборная база).

4.3 Перечень лабораторных работ

Семестр № 2

№	Наименование лабораторной работы	Кол-во академических часов
---	----------------------------------	----------------------------

1	Изучение фазового состава и структуры порошкообразных и керамических образцов на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000	4
2	Исследование морфологии поверхности неорганических микро- и наносистем с помощью атомно-силового микроскопа NT-MDT Solver P47	4
3	Изучение элементного состава и морфологии поверхности керамических мишеней на растровом электронном микроскопе Jeol Jib-4500, оснащённом системой рентгеноспектрального микроанализа	4
4	Интерференционный способ определения толщины тонких плёнок	2

4.4 Перечень практических занятий

Семестр № 2

№	Темы практических (семинарских) занятий	Кол-во академических часов
1	Расчёт поверхностной и объёмной концентрации атомов в различных кристаллах. Определение степени заполнения адатомами и коэффициента прилипания адатомов. Расчёт потока атомов газа в зависимости от давления и температуры окружающей среды. Определение экспозиции в вакууме.	4
2	Решение задач на использование уравнения Вульфа-Брэгга. Расчёт параметров кристаллических решёток. Определение индексов Миллера	4
3	Формирование изображения в растровом электронном микроскопе. Изучение примеров практического использования растровой электронной микроскопии. Растровый электронный микроскоп Jeol Jib-4500 с энергодисперсионным детектором.	4
4	Решение задач на определение намагниченности, магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости веществ. Рассмотрение примеров обработки результатов магнитных измерений с помощью функции Ланжевена.	2

4.5 Самостоятельная работа

Семестр № 2

№	Вид СРС	Кол-во академических часов
---	---------	----------------------------

1	Подготовка к практическим занятиям	10
2	Подготовка к практическим занятиям (лабораторным работам)	24
3	Подготовка к сдаче и защите отчетов	12
4	Проработка разделов теоретического материала	20

В ходе проведения занятий по дисциплине используются следующие интерактивные методы обучения: Дискуссии, компьютерные симуляции

5 Перечень учебно-методического обеспечения дисциплины

5.1 Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

5.1.1 Методические указания для обучающихся по практическим занятиям

Методические указания для практических занятий по дисциплине «Методы исследования микро- и наносистем» [Электронный ресурс] : методические указания / Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, Ин-т выс. технол., Каф. радиоэлектрон. и телекоммун. систем. - Электрон. дан. - Иркутск : ИРНИТУ, 2017.

5.1.2 Методические указания для обучающихся по лабораторным работам:

Методические указания для лабораторных занятий по дисциплине «Методы исследования микро- и наносистем» [Электронный ресурс] : методические указания / Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, Ин-т выс. технол., Каф. радиоэлектрон. и телекоммун. систем. - Электрон. дан. - Иркутск : ИРНИТУ, 2017.

5.1.3 Методические указания для обучающихся по самостоятельной работе:

Самостоятельная работа является неотъемлемым элементом учебного процесса, одним из основных методов освоения учебных дисциплин и овладения навыками профессиональной и научно-исследовательской деятельности. При самостоятельной работе достигается конкретное усвоение учебного материала, развиваются теоретические способности, важные для современной подготовки магистра.

Целью самостоятельной работы обучающихся является неаудиторное изучение современных методов исследования характеристик микро- и наноструктур.

Для достижения цели дисциплины в рамках самостоятельной работы решаются следующие задачи - формирование представлений о фундаментальных явлениях, на которых строится функционирование современного оборудования для исследований микро- и наносистем, а также изучение основных конструктивных элементов и принципов работы этого оборудования.

Самостоятельная работа включает себя подготовку к практическим (лабораторным) занятиям, оформление, подготовку к сдаче и защите отчетов по лабораторным работам, написание курсового проекта, самостоятельную проработку отдельных разделов теоретического курса (п. 4.5).

Подготовка к практическим занятиям осуществляется согласно методическим указаниям для практических занятий по дисциплине (п. 5.1.1) и заключается в самостоятельном решении задач по темам и в работе с учебниками и дополнительной литературой. При работе с литературой следует вести запись основных положений (конспектировать отдельные разделы, выписывать новые термины и раскрывать их содержание).

Оформление отчетов по лабораторным работам и подготовка к сдаче и защите отчетов осуществляется согласно методическим указаниям для лабораторных занятий по дисциплине (п. 5.1.2).

6 Фонд оценочных средств для контроля текущей успеваемости и проведения промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Оценочные средства для проведения текущего контроля

6.1.1 семестр 2 | Устный опрос

Описание процедуры.

Экзамен в форме устного опроса по билетам

Критерии оценивания.

Применяет способы, методы контроля и диагностики структуры и свойств наноматериалов и компонентов микро- и наносистемной техники.

6.2 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

6.2.1 Критерии и средства (методы) оценивания индикаторов достижения компетенции в рамках промежуточной аттестации

Индикатор достижения компетенции	Критерии оценивания	Средства (методы) оценивания промежуточной аттестации
ПК-7.1	Применяет способы, методы контроля и диагностики структуры и свойств наноматериалов и компонентов микро- и наносистемной техники.	Экзамен в форме устного опроса по билетам.

6.2.2 Типовые оценочные средства промежуточной аттестации

6.2.2.1 Семестр 2, Типовые оценочные средства для проведения экзамена по дисциплине

6.2.2.1.1 Описание процедуры

К экзамену допускаются студенты, правильно выполнившие практические задания, курсовой проект и предоставившие отчёты по лабораторным работам. Экзамен проводится в форме устного опроса по билетам. Каждый обучающийся получает один билет, содержащий три контрольных вопроса, на которые необходимо предоставить развёрнутые ответы. Экзаменатор вправе задать дополнительные вопросы по темам, смежным с указанными в билете. Результат экзамена объявляется студенту непосредственно после его сдачи, затем выставляется в экзаменационную ведомость и зачетную книжку студента

Вопросы для подготовки к экзамену:

1. Классификация методов исследования микро- и наносистем.
2. Виды вакуума. Классификация современных вакуумных насосов.
3. Объёмная и поверхностная концентрация атомов. Степень заполнения и коэффициент прилипания.
4. Использование сверхвысокого вакуума в методах исследования микро- и наносистем.

- Принципы изготовления систем сверхвысокого вакуума.
5. Способы получения атомарно чистой поверхности.
 6. Метод рентгеновской дифракции: историческая справка, достоинства и недостатки.
 7. Рентгеновское излучение: источники и принцип генерирования.
 8. Дифракция рентгеновских лучей. Условие Вульфа-Брэггов.
 9. Индексы Миллера и методика их определения. Связь параметров элементарной ячейки и межплоскостных расстояний.
 10. Область когерентного рассеяния. Формула Дебая-Шеррера. Факторы, влияющие на уширение дифракционного максимума.
 11. Конструкция рентгеновского дифрактометра.
 12. Качественный и количественный дифракционный анализ. Пробоподготовка к рентгенофазовому анализу.
 13. Информация, извлекаемая из рентгенограммы поликристалла.
 14. Метод растровой электронной микроскопии: историческая справка, достоинства и недостатки.
 15. Вторичные и обратно рассеянные электроны. Коэффициенты обратного рассеяния и эмиссии вторичных электронов. Факторы, определяющие эмиссию вторичных электронов.
 16. Процессы, происходящие при взаимодействии материала вещества с пучком электронов (упругое и неупругое рассеяние). Длина свободного пробега электрона. Глубина проникновения.
 17. Конструкция растрового электронного микроскопа.
 18. Формирование изображения в растровом электронном микроскопе. Контраст изображения в растровом электронном микроскопе (топографический, композиционный).
 19. Рентгеноспектральный микроанализ. Энергодисперсионный детектор.
 20. Метод сканирующей зондовой микроскопии: историческая справка, достоинства и недостатки.
 21. Принцип работы сканирующего зондового микроскопа.
 22. Режимы работы атомно-силового микроскопа.
 23. Электрохимическое травление зондов для сканирующих зондовых микроскопов.
 24. Сканирующие элементы зондовых микроскопов (трубчатые и биморфные пьезоэлементы).
 25. Нелинейность, крип и гистерезис пьезокерамики в СЗМ.
 26. Защита сканирующих зондовых микроскопов от внешних воздействий (вибраций, акустических шумов, температуры окружающей среды или разогрева элементов конструкции).
 27. Методы измерения удельного сопротивления полупроводниковых микро- и наноструктур.
 28. Эффект Холла. Метод холловских измерений. Пробоподготовка к холловским измерениям.
 29. Структура энергетических зон в проводниках, полупроводниках и диэлектриках. Зависимость сопротивления различных материалов от температуры. Удельная электропроводность, концентрация и подвижность носителей заряда.
 30. Оборудование для исследования электрических характеристик микро- и наноструктур.
 31. Намагниченность, магнитная восприимчивость, магнитная проницаемость. Классы магнитных веществ. Слабомагнитные и сильномагнитные вещества. Магнитотвердые и магнитомягкие материалы.
 32. Основные методы исследования магнитных свойств.
 33. Виды магнитометров. СКВИД-магнитометр.
 34. Методы обработки результатов магнитных измерений.
 35. Достоинства оптических методов исследования микро- и наносистем. Коэффициенты и спектры отражения, пропускания и поглощения. Прямые и обратные оптические задачи.

36. Классификация оптических методов исследования материалов. Их достоинства и недостатки.
37. Спектроскопия комбинационного рассеяния.
38. Дисперсионная спектрофотометрия.
39. Фурье-спектрометрия.
40. Фотолюминесцентная спектроскопия.

6.2.2.1.2 Критерии оценивания

Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
Студент: – глубоко изучил учебный материал; – последовательно и исчерпывающе ответил на три вопроса; – при ответах применил знания, полученные в ходе лабораторных, практических занятий и самостоятельного изучения отдельных разделов курса; – не испытывал затруднений при ответах на дополнительные вопросы (при их наличии).	Студент: – твердо знает учебный материал; – ответил на два вопроса, при этом не допустив серьезных ошибок; – при ответах применил знания, полученные в ходе лабораторных и практических занятий; – не испытывал затруднений при ответах на дополнительные вопросы (при их наличии).	Студент: – знает лишь основной материал; – исчерпывающе ответил на один вопрос, на остальные вопросы отвечал недостаточно четко и полно; – при ответах применил знания, полученные только в процессе лекционных занятий; – испытывал затруднения при ответах на дополнительные вопросы (при их наличии).	Студент: – имеет отдельные представления об изученном материале; – не смог полно и правильно ответить ни на один из вопросов; – при ответах допускал грубые ошибки; – испытывал затруднения при ответах на дополнительные вопросы (при их наличии).

7 Основная учебная литература

1. Пул Ч. Нанотехнологии : учеб. пособие по направлению подгот. "Нанотехнологии" / Ч. Пул - мл., Ф. Оуэнс, 2006. - 334.
2. Суздалев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздалев, 2009. - 589.
3. Елисеев А. А. Функциональные наноматериалы : учебное пособие для старших курсов по специальности 020101 (011000) - Химия / А. А. Елисеев, А. В. Лукашин; под ред. Ю. Д. Третьякова, 2010. - 452.
4. Старостин В. В. Материалы и методы нанотехнологии : учебное пособие для вузов по направлению "Нанотехнология" / В. В. Старостин, 2010. - 431.

8 Дополнительная учебная литература и справочная

1. Брандон Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля : учеб. пособие для студентов по направлению подгот. "Прикладные математика и физика" / Д. Брандон, У. Каплан, 2006. - 377.

2. Энгель Л. Растровая электронная микроскопия. Разрушение : справочник / Л. Энгель; Пер. с нем. Б. Е. Левина, 1986. - 230.

9 Ресурсы сети Интернет

1. <http://library.istu.edu/>

2. <https://e.lanbook.com/>

10 Профессиональные базы данных

1. <http://new.fips.ru/>

2. <http://www1.fips.ru/>

11 Перечень информационных технологий, лицензионных и свободно распространяемых специализированных программных средств, информационных справочных систем

1. Лицензионное программное обеспечение Системное программное обеспечение

2. Лицензионное программное обеспечение Пакет прикладных офисных программ

3. Лицензионное программное обеспечение Интернет-браузер

12 Материально-техническое обеспечение дисциплины

1. Учебная аудитория для проведения лекционных занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Оснащение: комплект учебной мебели, рабочее место преподавателя, доска. Мультимедийное оборудование (в том числе переносное): мультимедийный проектор, экран, акустическая система, компьютер с выходом в интернет.

2. Учебная аудитория для проведения лабораторных/практических (семинарских) занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Оснащение: комплект учебной мебели, рабочее место преподавателя, доска. Мультимедийное оборудование (в том числе переносное): мультимедийный проектор, экран, акустическая система, компьютер с выходом в интернет.