

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»**

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
«НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ»**

для программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

Калининград
2025

Лист согласования

Составители:

Грунин Алексей Игоревич, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник НОЦ «Функциональные наноматериалы»

Программа одобрена Экспертным советом ОНК «Институт высоких технологий»

Протокол № 13 от «24» ноября 2025 г.

Содержание

1. Общая характеристика дисциплины.....	4
2. Объём дисциплины.....	4
3. Содержание дисциплины.....	5
4. Учебно-тематический план дисциплины	7
5. Учебно-методическое сопровождение самостоятельной работы обучающихся	8
6. Оценочные средства для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся.....	11
7. Критерии оценивания результатов контрольно-оценочных мероприятий текущей и промежуточной аттестации по дисциплине.....	12
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	13
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины	14

1. Общая характеристика дисциплины

Учебная дисциплина «Нанотехнологии и наноматериалы» относится к числу дисциплин, направленных на подготовку и сдачу кандидатских экзаменов по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Изучение учебной дисциплины «Нанотехнологии и наноматериалы» базируется на знаниях и умениях, полученных аспирантами ранее в ходе освоения программного материала других учебных дисциплин.

Цель изучения дисциплины:

Подготовка к сдаче кандидатского экзамена, который представляет собой форму оценки степени подготовленности аспиранта к проведению научных исследований по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Подготовка научных и научно-педагогических кадров высшей квалификации с углубленными знаниями в области нанотехнологий и наноматериалов, способных самостоятельно проводить научные исследования, связанные с синтезом, структурированием и исследованием свойств наноструктурированных материалов.

Задачи дисциплины:

Формирование углубленных фундаментальных знаний о физических основах современных методов литографии, импульсного лазерного осаждения, растровой электронной и зондовой микроскопии, рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния света

1. Формирование навыков теоретического анализа результатов экспериментальных исследований в области исследования наноструктурированных материалов, методам планирования эксперимента и обработки результатов, систематизации и обобщения как уже имеющейся в литературе, так и самостоятельно полученной в ходе исследований информации.

2. Формирование умений и навыков самостоятельной научной (научно-исследовательской) деятельности по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

3. Формирование навыков выбора и применения современных экспериментальных методов исследования нанообъектов

4. Формирование навыков интерпретации экспериментальных данных с использованием математических моделей и специализированного программного обеспечения.

Язык реализации дисциплины – русский.

2. Объём дисциплины

Вид учебной работы	Всего, час.	Объём по семестрам	
		3	4
Контактная работа обучающегося с преподавателем по видам учебных занятий (КР):	72	36	36
Лекционные занятия (Л)	48	24	24
Семинарские/ Практические занятия (СПЗ)	24	12	12
Самостоятельная работа обучающегося, в том числе подготовка к промежуточной аттестации (СР)	90	36	54
Вид промежуточной аттестации: Зачет (З), Зачет с оценкой (ЗО), Экзамен (Э), Кандидатский экзамен (КЭ)	18	3	18 КЭ
Общий объём	В часах	180	72
	В зачетных единицах	5	2
			3

3. Содержание дисциплины

№ пп	Наименование раздела/ темы	Содержание темы
1	Методы синтеза наноструктур. Импульсно-лазерное осаждение.	<p>1.1. Методы синтеза тонких пленок.</p> <p>1.2. Взаимодействие импульсного лазерного излучения с металлами. Лазерная абляция. Метод импульсного лазерного осаждения. Основные параметры процесса осаждения.</p> <p>1.3. Основные типы лазеров, используемые для процесса ИЛО.</p> <p>1.4 Рост поликристаллических и эпитаксиальных тонкопленочных структур методом ИЛО. In-situ анализ тонких плёнок в процессе осаждения.</p>
2	Современные методы фотолитографии для прототипирования наноструктур.	<p>2.1. Основы и приложения современных технологий литографии.</p> <p>2.2. Литография как метод формирования микро- и наноструктур.</p> <p>2.3. Методы фотолитографии и электронной литографии.</p> <p>2.4. Тенденции развития технологий литографии.</p> <p>2.5. Оборудование для процесса фотолитографии.</p> <p>2.6. Принцип работы и особенности безмасочной фотолитографии</p>
3	Методы исследования функциональных наноматериалов. Растворная электронная микроскопия и энергодисперсионная спектроскопия.	<p>3.1. Краткий обзор существующих методов исследования функциональных наноматериалов.</p> <p>3.2. Выбор методов исследования для решения конкретных практических задач.</p> <p>3.3. Физические основы растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа.</p> <p>3.4. Подготовка образца и алгоритм проведения исследования.</p> <p>3.5. Способы обработки результатов исследования.</p> <p>3.6. Техника безопасности при работе с оборудованием.</p>
4	Основы сканирующей зондовой микроскопии. Измерение рельефа поверхности и толщины пленки методом атомно-силовой микроскопии.	<p>4.1. История развития метода сканирующей зондовой микроскопии, обзор основных видов сканирующей зондовой микроскопии.</p>

		<p>4.2. Физические основы атомно-силовой микроскопии.</p> <p>4.3. Основные узлы атомно-силового микроскопа. Их устройство и назначение.</p> <p>4.4. Принцип получения и обработки изображений.</p>
5	Рентгеновские методы исследования материалов в лабораторных условиях: рентгеновская дифракция и рефлектометрия.	<p>5.1. Явление дифракции на электронах, нейтронах и фотонах – различия и сходство.</p> <p>5.2. Физические основы взаимодействия рентгеновского излучения и вещества.</p> <p>5.3. Основные принципы постановки эксперимента по получению дифракционных спектров: геометрия эксперимента, выбор параметров эксперимента исходя из известных данных об образце. Техника безопасности при работе с оборудованием.</p> <p>5.4. Различия и особенности дифракции на кристалле и порошковой дифракции.</p> <p>5.5. Применение математического аппарата к обработке дифракционных спектров.</p> <p>5.6. Особенности явления рентгеновской дифракции на сверхмалых и малых углах.</p> <p>5.7. Понятия естественной и искусственной кристаллической решетки.</p> <p>5.8. Основные принципы постановки эксперимента по получению спектра рефлектометрии: выбор параметров эксперимента.</p> <p>5.9. Современные методы программного анализа спектров рентгеновской дифракции и рефлектометрии.</p> <p>5.10. Подготовка образцов и алгоритм проведения исследования.</p>
6	Физические методы исследования микро- и наномасштабных объектов: метод спектроскопии комбинационного рассеяния света и спектроскопии Резерфордовского обратного рассеяния	<p>6.1. Упругое и неупругое рассеяние</p> <p>6.2. История открытия явления комбинационного рассеяния света.</p> <p>6.3. Теория комбинационного рассеяния света: классическое и квантовое описание.</p> <p>6.4. Основные узлы и принцип работы спектрометров комбинационного рассеяния света.</p>

		<p>6.5. Получение, обработка и анализ спектров комбинационного рассеяния света.</p> <p>6.6. Теория спектроскопии Резерфордовского обратного рассеяния. Использование законов сохранения энергии и импульса для вывода уравнения кинематического фактора.</p> <p>6.7. Ускорители заряженных частиц. Ускоритель Ван-дер-Граафа. Основные узлы и принцип работы.</p> <p>6.8. Составные части и принцип работы спектрометра Резерфордовского обратного рассеяния.</p> <p>6.9. Обработка и анализ спектров Резерфордовского обратного рассеяния.</p>
7	Методы формирования тонких плёнок. Метод магнетронного напыления	<p>7.1. Виды разрядов в газах. Условия горения тлеющего разряда.</p> <p>7.2. Влияние условий эксперимента на параметры формирования тонкоплёночных структур</p> <p>7.3. Основы метода магнетронного напыления – DC, ВЧ и импульсное распыление</p> <p>7.4. Типы катодов магнетронных распылительных систем</p>

4. Учебно-тематический план дисциплины

Номер раздела, темы	Наименование разделов, тем	Количество часов					Форма контроля
		Всего	КР	Л	СПЗ	СР	
	Семестр 3	72	36	24	12	36	
1	Методы синтезаnanoструктур. Магнетронное напыление	26	16	6	4	10	
2	Методы исследования функциональных наноматериалов. Растворная электронная микроскопия и энергодисперсионная спектроскопия	29	10	10	4	14	
3	Основы сканирующей зондовой микроскопии. Атомно-силовая микроскопия	24	10	8	4	12	
	Семестр 4	108	36	24	12	54	КЭ
4	Методы синтеза nanoструктур. Импульсно-лазерное осаждение	42	14	8	4	16	
5	Рентгеновские методы исследования: дифракция и рефлектометрия	32	6	8	2	16	

6	Физические методы исследования микро- и наномасштабных объектов: спектроскопия комбинационного рассеяния света и обратное Резерфордовское рассеяние	28	8	4	4	12	
7	Современные методы фотолитографии для прототипирования наноструктур	24	8	4	2	10	
	Общий объем	180	72	48	24	90	18

5. Учебно-методическое сопровождение самостоятельной работы обучающихся

Цель самостоятельной работы обучающихся заключается в глубоком, полном усвоении учебного материала и в развитии навыков самообразования. Самостоятельная работа может включать: работу с текстами, литературой, учебно-методическими пособиями, нормативными материалами, в том числе материалами сети интернет, а также проработку конспектов лекций, написание докладов, рефератов, участие в работе семинаров, научных конференциях и пр.

5.1. Тематика самостоятельных работ

№ п/п	Наименование темы	Тематика самостоятельных работ
1.	Тема № 1. Методы синтеза наноматериалов.	Научные основы метода магнетронного распыления. Научные основы метода импульсно-лазерного осаждения
2.	Тема №2. Современные методы фотолитографии для прототипирования наноструктур.	Оборудование и методы фотолитографии.
3.	Тема № 3. Методы исследования функциональных наноматериалов. Растворная электронная микроскопия и энергодисперсионная спектроскопия.	Сравнение сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Технические возможности современных устройств. Сравнение методов дисперсионной рентгеновской спектроскопии по длине волны и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.
4.	Тема № 4. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Измерение рельефа поверхности и толщины пленки методом атомно-силовой микроскопии.	Применение сканирующей зондовой микроскопии для манипуляции атомами. Атомно силовая микроскопия в биологии.
5.	Тема № 5. Рентгеновские методы исследования материалов в лабораторных	Способы генерации рентгеновского излучения в различных источниках:

	условиях: рентгеновская дифракция и рефлектометрия.	характеристическое, тормозное и синхротронное излучение. Типы детекторов и получаемых с их помощью рентгеновских спектров, технические особенности.
6.	Тема № 6. Физические методы исследования микро- и наномасштабных объектов: метод спектроскопии комбинационного рассеяния света и спектроскопии Резерфордовского обратного рассеяния.	Использование конфокальной оптики в спектрометрах комбинационного рассеяния света. Методы исследования наноструктур посредством ядерных реакций на основе ускорителя и прибора для спектроскопии Резерфордовского обратного рассеяния.

Обучающийся самостоятельно выбирает только одну тему из данного списка и сдает работу в письменном виде до начала зачетно-экзаменационной сессии.

5.2. Тематика рефератов

№ п/п	Наименование темы	Тематика рефератов
1.	Тема № 1. Методы синтеза наноматериалов.	Химические и физические методы роста тонких плёнок. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Особенности импульсного лазерного осаждения фемтосекундным лазером. Атомно-слоевое осаждение.
2.	Тема №2. Современные методы фотолитографии для прототипирования наноструктур.	Особенности технологического процесса безмасочной фотолитографии.
3.	Тема № 3. Методы исследования функциональных наноматериалов. Растровая электронная микроскопия и энергодисперсионная спектроскопия.	Зондовые методы микроскопии (атомно-силовая и сканирующая тунNELьная микроскопия). Дифракционные методы анализа (рентгеновские, электронные, нейтронные). Электронная спектроскопия (Фотоэлектронная спектроскопия, Оже-спектроскопия). Нелинейно-оптические методы исследования (Рамановская спектроскопия)

4.	Тема № 4. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Измерение рельефа поверхности и толщины пленки методом атомно-силовой микроскопии	Сканирующая тунNELьная микроскопия. Электросиловая микроскопия. Магнитно-силовая микроскопия.
5.	Тема № 5. Рентгеновские методы исследования материалов в лабораторных условиях: рентгеновская дифракция и рефлектометрия.	<p>Современные источники рентгеновского излучения для использования в лабораторных установках: сравнительная характеристика, преимущества и недостатки.</p> <p>Современные лабораторные исследовательские комплексы оборудования, включающие в себя возможности рентгеновской дифракции и рефлектометрии: конструктивные отличия от лабораторных дифрактометров, преимущества и недостатки.</p> <p>Морфология поверхности и ее влияние на спектр рефлектометрии: корреляционная функция, среднеквадратичная разность высот рельефа, функция спектральной плотности.</p> <p>Понятие критического угла, полное внешнее отражение рентгеновского излучения.</p>
6.	Тема № 6. Физические методы исследования микро- и наномасштабных объектов: метод спектроскопии комбинационного рассеяния света и спектроскопии Резерфордовского обратного рассеяния	<p>Подробная схема спектрометра комбинационного рассеяния света. Ход лучей и назначение всех узлов устройства.</p> <p>Взаимодействие фотонов с веществом. Различие упругого и неупругого взаимодействия. Причины, приводящие к изменению энергии фотонов во время взаимодействия. Теория комбинационного рассеяния света.</p> <p>Теория спектроскопии Резерфордовского обратного рассеяния. Реализация методики на основе ускорителя Ван-дер-Граафа. Основные узлы и принцип работы экспериментально-измерительной установки.</p>

Обучающийся самостоятельно выбирает только одну тему из данного списка и сдает работу в письменном виде до начала зачетно-экзаменационно сессии.

Контроль самостоятельной работы осуществляется на семинарских (практических) занятиях

6. Оценочные средства для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся

Задание к зачету:

1. Каковы ограничения методов литографии и чем они обуславливаются.
2. Основные этапы технологического процесса фотолитографии
3. Принципиальная схема установки УФ-фотолитографии
4. Сфера применения технологий литографии.
5. Особенности современных установок для УФ-фотолитографии.
6. Виды технологий литографии, их преимущества и недостатки.
7. Перспективные методы литографии.
8. Значение методов литографии в научных исследованиях и промышленности.
9. Лабораторная установка УФ-фотолитографии.
10. Развитие методов и средств литографии.
11. Основные взаимодействия импульсного лазерного излучения с металлами.
12. Основные различия физических и химических методов осаждения тонких пленок.
13. Преимущества и недостатки метода импульсного лазерного осаждения.
14. Рост поликристаллических и epitаксиальных тонких плёнок.
15. Метод дифракции быстрых электронов.
16. Применение твердотельных и эксимерных лазеров в методе импульсного лазерного осаждения.
17. Дайте объяснение понятиям «непрерывный рентгеновский спектр» и «характеристический рентгеновский спектр».
18. Какие электроны называют «вторичными», а какие «обратнорассеянными»?
19. Что такое Оже-электрон? Почему в атомах Н и Не Оже-электроны возникать не могут?
20. Какие явления происходят в твердом теле при облучении его электронным пучком?
21. Сформулируйте закон Мозли
22. Опишите принцип работы ЭДС детектора.
23. Что такое «рентгеноспектральный микроанализ»?
24. Опишите основные узлы РЭМ (катодная пушка, электроннооптическая система, система формирования изображения).
25. Назовите несколько методов исследования функциональных наноматериалов. Подробно опишите один из них.

Перечень вопросов к кандидатскому экзамену:

1. Основные виды сканирующей зондовой микроскопии: сканирующая тунNELьная микроскопия (СТМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), электросиловая микроскопия (ЭСМ), магнитносиловая микроскопия (МСМ). Их отличительные черты и области применения.
2. Принципы работы сканирующих зондовых микроскопов. Сканирующие элементы и способы перемещения иглы и образца. Понятие обратной связи.
3. Защита зондовых микроскопов от внешних воздействий.
4. Режимы работы АСМ. Достоинства и недостатки режимов, области их применения.
5. Физические принципы работы АСМ: силовое взаимодействие зонда с поверхностью, потенциал взаимодействия зонда с образцом.
6. Физические принципы работы АСМ: Линейные колебания кантileвера. Кривые подвода зонда к образцу.

7. Устройство АСМ: Измерительная головка АСМ. Оптическая система регистрации отклонений кантилевера.
8. Пределы разрешения АСМ. Эффект уширения профиля. Эффект занижения высоты. Влияние радиуса закругления зонда и угла раствора конуса.
9. Формирование и обработка изображений. Артефакты и реальные объекты
10. Как связана энергия фотонов, нейтронов и электронов с длиной волны?
11. Перечислите виды взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, опишите то, которое приводит к проявлению дифракционной картины.
12. Закон Брэгга-Бульфа: математическое описание и физический смысл.
13. Что такое структурный и атомарный факторы рассеяния, как они влияют на дифракционный спектр.
14. Какие схемы эксперимента применяются в методе рентгеновской дифракции?
15. Чем отличается дифракция на кристалле и порошках?
16. В чем заключается метод Ритвельда для анализа дифракционного спектра?
17. В чем заключается метод рентгеновской рефлектометрии?
18. Какие параметры образца можно узнать методами рентгеновской дифракции и рефлектометрии?
19. Формула Шеррера: для чего применяется, какие есть ограничения?
20. Понятие искусственной кристаллической решетки. Как метод рентгеновской рефлектометрии применяется к искусственным кристаллическим решеткам?
21. Какие процессы происходят при столкновении электронов с атомами?
22. Чем определяется разрешение просвечивающего электронного микроскопа?
23. Каковы основные проблемы с интерпретацией всех изображений получаемых с помощью просвечивающей электронной микроскопии?
24. Что такое сечение взаимодействия, и в каких единицах оно измеряется?
25. Чем отличаются когерентное и некогерентное рассеяние?
26. В чем фундаментальные отличия рассеяния электронов и рентгеновских лучей?
27. Почему упругое электро-электронное взаимодействие проявляется в рассеянии на малые углы, а взаимодействие электрона с ядрами приводит к рассеянию на большие углы?
28. Назовите преимущества и недостатки работы на 400 кВ микроскопе по сравнению со 100 кВ.
29. Какие два типа источников электронов в настоящее время используются в ПЭМ?
30. Каким образом изменяется фокусировка изображения в ПЭМ?
31. Какие эксперименты привели к открытию эффекта комбинационного рассеяния света?
32. В чём состоит явление комбинационного рассеяния света?
33. Как описывается явление комбинационного рассеяния света с точки зрения классической физики?
34. Как описывается явление комбинационного рассеяния света с точки зрения квантовой физики?
35. Что такое стоковое и антистоковое рассеяние?
36. Что такое комбинационное рассеяние света первого и второго порядка?
37. Каким образом регистрируют сигнал комбинационного рассеяния света?
38. Какие существуют типы спектрометров комбинационного рассеяния света? Зачем используется режекторный фильтр?
39. Как и зачем производится калибровка спектрометров комбинационного рассеяния света?

7. Критерии оценивания результатов контрольно-оценочных мероприятий текущей и промежуточной аттестации по дисциплине

В ходе текущего контроля успеваемости (устный или письменный опрос, подготовка и защита реферата, доклад, презентация, тестирование и пр.) при ответах на учебных занятиях, а

также промежуточной аттестации в форме зачета обучающиеся оцениваются по двухбалльной шкале:

Оценка «зачтено» – выставляется аспиранту, если он продемонстрировал знания программного материала, подробно ответил на теоретические вопросы, справился с выполнением заданий и (или) ситуационных задач, предусмотренных рабочей программой дисциплины.

Оценка «не зачтено» – выставляется аспиранту, если он имеет пробелы в знаниях программного материала, не владеет теоретическим материалом и допускает грубые, принципиальные ошибки в выполнении заданий и (или) ситуационных задач, предусмотренных рабочей программой дисциплины.

Оценка по результатам проведения кандидатского экзамена по дисциплине выставляется на основе совокупности ответов по вопросам программы кандидатского экзамена и по вопросам дополнительной программы по теме диссертации аспиранта, которая согласовывается с научным руководителем.

Оценка «отлично» выставляется за исчерпывающий ответ, отражающий знание и профессиональное владение материалом программы кандидатского экзамена и дополнительной программы по теме диссертации.

Оценка «хорошо» выставляется за ответ, содержащий непринципиальные погрешности, отражающий знание и свободное владение материалом программы кандидатского экзамена и дополнительной программы по теме диссертации.

Оценка «удовлетворительно» выставляется за ответ, отражающий знание принципиальных положений вопросов, при наличии погрешностей, устраниемых аспирантом при ответе на дополнительные вопросы программы кандидатского экзамена и дополнительной программы по теме диссертации.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется за ответ, показывающий непонимание существа вопроса, наличии грубых ошибок в ответах на вопросы программы кандидатского экзамена и дополнительной программы по теме диссертации.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендуемая литература:

1. Елисеев А. А., Лукашин А. В. Функциональные наноматериалы. – М.: Физматлит, 2010.
2. Бхушан Б. Справочник Шпрингера по нанотехнологиям. – 2010.
3. Менущенков А.П., Неволин В.Н. Физические основы лазерной технологии. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010.
4. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Техносфера, 2009.
5. Анищик В.М., Понарядов В.В. Дифракционный анализ. – Минск: БГУ, 2002

Программное обеспечение:

Microsoft Word, Excel, PowerPoint
LabSpec (спектральный анализ)
Gwyddion (обработка данных СЗМ)
Match! (анализ рентгеновских спектров)

Электронные образовательные ресурсы:

1. <http://elibrary.ru>
2. <https://www.scopus.com>
3. <http://www.nanoscopy.ru>
4. <http://xdb.lbl.gov>
5. <http://www.crystallography.net/cod>

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

БФУ им. И. Канта имеет специальные помещения и лаборатории для проведения занятий лекционного типа, групповых и индивидуальных консультаций, научных исследований, промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы и помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования.