

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики**

В.В. Иванов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Приборы и методы исследования наноструктур и нанобъектов
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанометрологии и наноматериалов
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: С.А. Зайцев, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры нанометрологии и наноматериалов 29.05.2020

Аннотация

Курс "Приборы и методы исследования наноструктур и нанобъектов" предусматривает ознакомление слушателей с приборами и методами исследования наноструктур и нанобъектов и подготовка к изучению нанометрологии и выполнению практикума по созданию и исследованию микро- и наносистем, а также подготовка к выполнению технологического проекта по изготовлению наноструктур.

Задачи курса:

- приобретение слушателями теоретических знаний в области нанодиагностики;
- подготовка слушателей к выполнению практических курсов по нанотехнологиям и нанодиагностике.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- базовую теорию и устройство растрового электронного микроскопа;
- базовую теорию и устройство просвечивающего электронного микроскопа;
- базовую теорию и устройство атомно-силового микроскопа;
- базовую теорию и устройство рентгеновского дифрактометра;
- базовую теорию и устройство оптического профилометра;
- базовую теорию и устройство эллипсометра.

Уметь:

- применять полученные теоретические знания при освоении приборов и методов наносистемной техники.

Владеть:

- базовой теорией наноразмерных исследований в части растровой электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифракции, оптической профилометрии и эллипсометрии.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Вводная лекция
2. Растровый электронный микроскоп
3. Просвечивающий электронный микроскоп
4. Атомно-силовой микроскоп
5. Рентгеновская дифракция
6. Оптическая микроскопия
7. Эллипсометрия

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- ознакомление слушателей с приборами и методами исследования наноструктур и нанобъектов и подготовка к изучению нанометрологии и выполнению практикума по созданию и исследованию микро- и наносистем, а также подготовка к выполнению технологического проекта по изготовлению наноструктур.

Задачи дисциплины

- приобретение слушателями теоретических знаний в области нанодиагностики;
- подготовка слушателей к выполнению практических курсов по нанотехнологиям и нанодиагностике.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
--------------------------------	-----------------------------------

УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- базовую теорию и устройство растрового электронного микроскопа;
- базовую теорию и устройство просвечивающего электронного микроскопа;
- базовую теорию и устройство атомно-силового микроскопа;
- базовую теорию и устройство рентгеновского дифрактометра;
- базовую теорию и устройство оптического профилометра;
- базовую теорию и устройство эллипсометра.

уметь:

- применять полученные теоретические знания при освоении приборов и методов наносистемной техники.

владеть:

- базовой теорией наноразмерных исследований в части растровой электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифракции, оптической профилометрии и эллипсометрии.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Вводная лекция	4			10
2	Растровый электронный микроскоп	4			10
3	Просвечивающий электронный микроскоп	4			10

4	Атомно-силовой микроскоп	4			10
5	Рентгеновская дифракция	4			10
6	Оптическая микроскопия	4			8
7	Эллипсометрия	6			2
Итого часов		30			60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 7 (Осенний)

1. Вводная лекция

Понятие наноразмерных объектов. Виды наноразмерных объектов (композитные материалы, нанопорошки, мемсы, электронные компоненты). Виды и методы диагностики.

2. Растровый электронный микроскоп

Физические основы растровой электронной микроскопии. Вторичная электронная эмиссия. Истинно вторичные электроны. Отраженные электроны. Контраст изображений растровой электронной микроскопии.

Устройство и работа растрового электронного микроскопа. Общее устройство микроскопа. Источник электронов. Электронная оптика. Сканирование электронным зондом. Детектор истинно вторичных электронов. Детектор отраженных электронов. Детекторы рентгеновского излучения. электронов. Информативность отраженных электронов.

Приемы работы на растровом электронном микроскопе. Выбор ускоряющего напряжения. Выбор раstra и скорости сканирования. Фокусировка и коррекция астигматизма. Калибровка растрового электронного микроскопа. Стереоскопические изображения, измерение высоты объектов.

3. Просвечивающий электронный микроскоп

Приемы получения максимально контрастного изображения, получения микродифракции, коррекции астигматизма по Фурье-образу изображения аморфного материала.

4. Атомно-силовой микроскоп

Физические принципы работы АСМ. Потенциал взаимодействия зонда с образцом. Режимы работы АСМ. Упругие взаимодействия. Задача Герца. Капиллярные силы. Сила Ван-дер-Ваальса. Адгезионные силы. Собственные колебания. Колебания при наличии сил трения. Колебания при наличии внешней вынуждающей периодической силы. Малые колебания кантилевера в силовом поле. Кривые подвода зонда к образцу.

Устройство АСМ. Зонд атомно-силового микроскопа. Измерительная головка и оптическая система регистрации отклонений кантилевера. Сканирующие элементы (сканеры) зондовых микроскопов. Система обратной связи.

Калибровка АСМ для корректного измерения рельефа поверхности. Предельное разрешение АСМ.

5. Рентгеновская дифракция

Теоретические основы метода рентгенофазового анализа. Рентгеновское излучение, источники рентгеновского излучения. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Основы кристаллографии. Кристаллы и их симметрия. Обратное пространство.

Первичная обработка дифрактограмм. Профильный анализ. Понятие о качественном фазовом анализе. Проведение качественного рентгенофазового анализа. Количественный рентгенофазовый анализ. Зависимость интенсивности рефлексов фазы от ее содержания в многофазной смеси. Бесстандартный количественный РФА.

Рентгеновская рефлектометрия. Особенности работы с тонкими пленками и приповерхностными слоями.

6. Оптическая микроскопия

Теоретические основы метода оптической микроскопии. Разрешение оптического микроскопа. Темнопольный режим в оптической микроскопии. Режим DIC контраста в оптической микроскопии.

7. Эллипсометрия

Понятие поляризованного света. Представление поляризованной электромагнитной волны. Основные принципы эллипсометрии. Виды эллипсометрии. Оптические схемы современных эллипсометров. Этапы эллипсометрического эксперимента. Понятие эллипсометрической модели. Основное уравнение эллипсометрии. Модель отражения от подложки с одним тонким слоем. Ограничения метода эллипсометрии.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Голдстей Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лившин Э. — М.: Мир, 1984
2. Рид С. Электронно-зондовый микроанализ. — М.: Мир, 1979.
3. Галлямов М.О., Яминский И.В. Сканирующая зондовая микроскопия: основные принципы, анализ искажающих эффектов.
4. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория упругости. — М.: Наука, 1987. — 246 с.

Дополнительная литература

1. Вайнштейн Б.К. Кристаллография. Т.1. - М., 1979
2. Аззам Р., Башара Н, Эллипсометрия и поляризованный свет. - М.: Мир, 1981

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://lib.mipt.ru>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

на лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

- 1) посещение всех лекций, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении лекций;

2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю на лекции.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанометрологии и наноматериалов
курс:	<u>4</u>
квалификация:	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Дифференцированный зачет	
Разработчик:	С.А. Зайцев, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Приборы и методы исследования наноструктур и нанобъектов» обучающийся должен:

знать:

- базовую теорию и устройство растрового электронного микроскопа;
- базовую теорию и устройство просвечивающего электронного микроскопа;
- базовую теорию и устройство атомно-силового микроскопа;
- базовую теорию и устройство рентгеновского дифрактометра;
- базовую теорию и устройство оптического профилометра;
- базовую теорию и устройство эллипсометра.

уметь:

- применять полученные теоретические знания при освоении приборов и методов наносистемной техники.

владеть:

- базовой теорией наноразмерных исследований в части растровой электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифракции, оптической профилометрии и эллипсометрии.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы для подготовки к дифференцированному зачету:

1. Физические принципы растровой электронной микроскопии. Устройство электронного микроскопа.
2. Калибровка растрового электронного микроскопа. Возможности и приемы работы на растровом электронном микроскопе.
3. Физические принципы работы просвечивающего электронного микроскопа.
4. Физические принципы работы атомно-силового микроскопа. Виды взаимодействия зонда с поверхностью. Устройство атомно-силового микроскопа. Система обратной связи. Измерительные методики АСМ.
5. Физические принципы работы рентгеновского дифрактометра. Возможности рентгеновского дифрактометра.
6. Разрешение оптического микроскопа. Режимы работы оптического микроскопа.
7. Физические принципы работы эллипсометра. Основное уравнение эллипсометрии. Этапы эллипсометрического эксперимента.

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;

- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);

- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;

- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.