

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау**

**А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Nanomaterials Analysis and Research/Физические методы исследований наноматериалов
<b>по направлению:</b>	Фотоника и оптоинформатика
<b>профиль подготовки:</b>	Фотоника, квантовые технологии и двумерные материалы Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики и технологии наноструктур
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 90 всего, в том числе:

- лекции: 30 час.
- семинары: 0 час.
- лабораторные занятия: 60 час.

Самостоятельная работа: 105 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 225, всего зач. ед.: 5

Программу составили:

- В. Волков, phd (к.ф.-м.н.)
- С. Новиков, канд. физ.-мат. наук
- Г.И. Целиков, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и технологии наноструктур 01.04.2024

## Аннотация

Курс лекций «Физические методы исследования наноматериалов» ориентирован на студентов магистратуры с базовой подготовкой в области физики и математики. Курс дает представление о современных методах исследования различных наноматериалов и наноструктур, включая двумерные материалы, углеродные нанотрубки, квантовые точки, ван-дер-ваальсовы гетероструктуры, метаповерхности и метаматериалы и другие искусственные наноматериалы. Среди рассматриваемых в курсе лекций методов следует выделить: оптическую микроскопию, спектрофотометрию, рефлектометрию, оптическую спектроскопию, включая терагерцовую, спектральную эллипсометрию, комбинационное рассеяние и гигантское комбинационное рассеяние, сканирующую ближнепольную оптическую микроскопию, спектроскопию поверхностного плазмонного резонанса, атомно-силовую микроскопию, сканирующую туннельную микроскопию, растровую и просвечивающую электронную микроскопию, а также рентгеновскую дифрактометрию, электрофизические измерения и ряд других экспериментальных техник. Также в рамках курса будут рассмотрены эффективные методы численного анализа наноматериалов и наноструктур. Лекции сопровождаются лабораторными занятиями для закрепления практических навыков по экспериментальной характеристике наноматериалов и наноструктур.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- овладение обучающимися экспериментальными методами исследований природных и искусственных наноматериалов, включая такие материалы как графен, другие двумерные материалы, углеродные нанотрубки, перовскиты, а также различные метаматериалы. В качестве основных методов исследований наноматериалов в рамках настоящего курса следует выделить оптические методы исследования (оптическую микроскопию, спектрофотометрию, рефлектометрию, спектроскопию, включая терагерцовую спектроскопию, спектральную эллипсометрию, комбинационное рассеяние и гигантское комбинационное рассеяние, сканирующую ближнепольную оптическую микроскопию, спектроскопию поверхностного плазмонного резонанса и др.), атомно-силовую микроскопию, сканирующую туннельную микроскопию, растровую и просвечивающую электронную микроскопию, а также рентгеновскую дифрактометрию, электрофизические измерения и ряд других экспериментальных техник.

Студенты получают начальные навыки работы со сложным научным оборудованием и выполняют ряд практических занятий на образовательных экспериментальных стендах. Предполагается освоение культуры современного эксперимента, а также техники безопасности при работе с оптическим излучением и бережного обращения с оптическим оборудованием и другим высокотехнологичным оборудованием. Закрепление материалов лекционного курса осуществляется в рамках лабораторного практикума. Все лабораторные работы сопровождаются лекциями, где рассматриваются теоретические и практические аспекты работы оборудования и проведения измерений. В рамках лекционного курса и лабораторного практикума будут изучены особенности изготовления наноструктур и техника работы с двумерными материалами (синтез материалов – эксфолиирование и химическое осаждение из газовой фазы, изготовление наноструктур, в том числе с помощью оптической и электронной литографии), а также измерение основных параметров наноматериалов различными физическими методами. При выполнении лабораторных работ обучающиеся научатся грамотному оформлению результатов экспериментов, их последующей обработке, а также представлению результатов для оценки преподавателем. Решенные в рамках лекционного курса и лабораторного практикума задачи могут быть в дальнейшем адаптированы для исследования свойств новых наноструктур и наноматериалов дальнейшей исследовательской деятельности студентов. Выполнение лабораторных работ практикума позволит сформировать у студентов навыки экспериментальной работы, что в дальнейшем позволит им подготовиться к выполнению исследовательских проектов в научных лабораториях. Курс нацелен на развитие творческих навыков постановки перспективных научных задач.

### Задачи дисциплины

Изучение теоретических и практических основ различных физических методов исследования наноматериалов: оптическая микроскопия, спектрофотометрия, рефлектометрия, спектроскопия, включая терагерцовую спектроскопию, спектральная эллипсометрия, комбинационное рассеяние и гигантское комбинационное рассеяние, сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия, спектроскопия поверхностного плазмонного резонанса, атомно-силовая микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, электрофизические измерения и ряд других экспериментальных техник.

Опыт характеризации наноматериалов, практика и изучение культуры работы с наноматериалами. Изучение техники безопасности работы с наноматериалами.

Синтез и изготовление наноматериалов. Работа с двумерными материалами – эксфолиация и химическое осаждение из газовой фазы. Перенос наноматериалов на различные подложки.

Определение наиболее эффективных методов исследований для заданных наноматериалов и наноструктур.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области фотоники и оптоинформатики
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач в области фотоники и оптоинформатики
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований в области фотоники и оптоинформатики к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен самостоятельно или в составе научного коллектива планировать и проводить научные исследования в области фотоники и оптоинформатики
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные принципы спектроскопии и спектрофотометрии
- основные принципы спектральной эллипсометрии
- основные принципы дальнепольной оптической микроскопии
- основные принципы атомно-силовой микроскопии
- основные принципы сканирующей туннельной микроскопии
- основные принципы сканирующей ближнепольной оптической микроскопии
- основные принципы комбинационного рассеяния и гигантского комбинационного рассеяния
- основные принципы спектроскопии поверхностного плазменного резонанса
- основные принципы растровой электронной микроскопии
- основные принципы просвечивающей электронной микроскопии
- основные принципы терагерцовой спектроскопии
- основные принципы оптической рефлектометрии
- основные принципы рентгеновская дифрактометрия
- основные принципы лазерная нанополимеризация (или двухфотонная полимеризация)
- основные принципы фотoluminesцентная микроскопия
- основные принципы изготовления образцов (напыление металлических пленок, оптическая литография (фотолитография))
- основные объекты и явления, исследование которых возможно оптическими методами
- технику безопасности и правила работы с научным оборудованием

уметь:

- работать со спектрофотометром
- работать с эллипсометром
- работать с атомно-силовым микроскопом
- работать со сканирующим туннельным микроскопом
- работать со сканирующим ближнепольным оптическим микроскопом
- работать со сканирующим рамановским микроскопом
- работать с растровым электронным микроскопом
- работать с фотoluminesцентным микроскопом
- работать с просвечивающей электронной микроскопией
- работать с растровым электронным микроскопом
- работать с химическими растворами, определять химический состав растворов.
- работать с Ван-дер-ваальсовыми материалами. Определять состав, свойства, качество, и количество слоев.
- планировать эксперимент для решения научной задачи с использованием оптических методов.
- собирать, обрабатывать и представлять результаты эксперимента, учитывая возможные ошибки и погрешности

владеть:

- методами анализа и обработки экспериментальных данных.
- навыками представления экспериментальных данных.
- навыками характеристики изготовленных образцов с использованием атомно-силовой микроскопии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии.
- навыками решения научных задач экспериментальными оптическими методами (Комбинационное рассеяние, гигантское Комбинационное рассеяние, спектрофотометрия, ближнепольная микроскопия, эллипсометрии, фотолуминесцентной микроскопии)

#### 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	Искусственные наноматериалы. Технологии изготовления	1		2	3
2	Природные наноматериалы. Технологии синтеза и изготовления	1		2	3
3	Обзор физических методов исследований наноматериалов	1		2	3
4	Оптические свойства наноматериалов	1		2	3
5	Оптическая микроскопия	1		2	3
6	Спектроскопия и спектрофотометрия	1		2	3
7	Терагерцовая спектроскопия	1		2	3
8	Спектроскопия комбинационного рассеяния	1		2	3
9	Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния	1		2	3
10	Спектроскопия поверхностного плазмонного резонанса	1		2	3
11	Спектральная эллипсометрия	1		2	3
12	Спектральная эллипсометрия анизотропных материалов	1		2	3
13	Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (апертурная)	1		2	3
14	Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (безапертурная)	1		2	3
15	Электрофизические методы исследования наноматериалов	1		2	3
16	Атомно-силовая микроскопия	1		2	4
17	Сканирующая туннельная микроскопия	1		2	4
18	Растровая электронная микроскопия	1		2	4
19	Просвечивающая электронная микроскопия	1		2	4
20	Оптическая литография (фотолитография)	1		2	4
21	Электронная литография	1		2	4
22	Рентгеновская дифрактометрия	1		2	4

23	Лазерная нанополимеризация (или двухфотонная полимеризация)	1		2	4
24	Фотолюминесцентная микроскопия	1		2	4
25	Спектроскопия комбинационного рассеяния двумерных материалов	1		2	4
26	Спектральная эллипсометрия двумерных материалов	1		2	4
27	Оптическая рефлектометрия	1		2	4
28	Дальнепольная оптическая микроскопия	1		2	4
29	Ван-дер-ваальсовы материалы	1		2	4
30	Обзор технологий синтеза и методов исследований наноматериалов	1		2	4
Итого часов		30		60	105
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		225 час., 5 зач.ед.			

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

##### Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Искусственные наноматериалы. Технологии изготовления

Метаматериалы, метаповерхности, фотонные кристаллы. Гиперболические метаматериалы. Ван-дер-ваальсовы гетероструктуры. Методы изготовления искусственных наноматериалов. Методы характеристики искусственных наноматериалов.

##### 2. Природные наноматериалы. Технологии синтеза и изготовления

Графен. Двумерные материалы. Эксфолиация двумерных материалов. Методы синтеза с помощью ультразвука и химическое осаждение из газовой фазы. Перенос наноматериалов на различные подложки.

##### 3. Обзор физических методов исследований наноматериалов

Оптические и электрофизические методы исследования наноматериалов. Обзор методов оптической спектроскопии, атомно-силовой, сканирующей туннельной, растровой электронной и просвечивающей электронной микроскопии.

##### 4. Оптические свойства наноматериалов

Оптические свойства объемного вещества. Классические теории оптических постоянных. Модель Лоренца. Многоосцилляторная модель. Модель анизотропных осцилляторов. Модель Друде. Оптические характеристики вещества. Оптические свойства частиц. Экстинкция, поглощение, рассеяние.

##### 5. Оптическая микроскопия

Современная микроскопическая техника. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия. Мультифотонная конфокальная микроскопия. Количественная флуоресцентная микроскопия. Методы сверхразрешения. Специальные оптические методы.

##### 6. Спектроскопия и спектрофотометрия

Оптическая спектроскопия. Спектральный анализ. Спектроскопические методы. Фотоколориметрия. Спектрофотометрия. Фотолюминесцентная спектроскопия.

## 7. Терагерцовая спектроскопия

Терагерцовая спектроскопия непрерывного действия на лампах обратной волны (ЛОВ). Импульсная терагерцовая спектроскопия с временным разрешением. Инфракрасная Фурье-спектроскопия.

## 8. Спектроскопия комбинационного рассеяния

Комбинационное рассеяние света (эффект Рамана). Классическая теория. Квантовая теория. Эмпирические законы комбинационного рассеяния света. Вынужденное комбинационное рассеяние. Методики рамановской спектроскопии. Строение Раман-спектрометра. Получение навыков работы с Раман-спектрометром.

## 9. Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния

Гигантское комбинационное рассеяние (SERS). Экспериментальные методики получения спектров гигантского комбинационного рассеяния. Основные характеристики и механизмы эффекта гигантского комбинационного рассеяния. Применение гигантского комбинационного рассеяния к изучению биологических молекул. Возможности и перспективы развития метода спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния.

## 10. Спектроскопия поверхностного плазмонного резонанса

Поверхностные электромагнитные волны. Поверхностный плазмонный резонанс. Спектроскопия поверхностного плазмонного резонанса. Чувствительность метода. Ограничения метода. Компактные схемы. Биосенсоры на основе спектроскопии поверхностного плазмонного резонанса.

## 11. Спектральная эллипсометрия

Поляризация света. Введение в спектральную эллипсометрию. Схема измерений. Получение данных. Анализ данных. Измерение спектров оптических постоянных материалов, в том числе тонких пленок. Изучение структурных свойств тонких пленок и межфазных границ. Определение толщин и физических характеристик многослойных структур.

## 12. Спектральная эллипсометрия анизотропных материалов

Введение в спектральную эллипсометрию анизотропных материалов. Матрица Мюллера. Измерение спектров оптических постоянных анизотропных материалов. Анализ спектров оптических постоянных анизотропных материалов.

## 13. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (апертурная)

Дифракционный предел. Введение в сканирующую ближнепольную оптическую микроскопию. Разрешение сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. Принципиальные схемы сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. Практические измерения. Решение прикладных задач.

## 14. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (безапертурная)

Введение в рассеивающую сканирующую ближнепольную оптическую микроскопию. Разрешение рассеивающей сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. Схема. Практические измерения. Прикладные задачи. Плазмоны в двумерных материалах.

## 15. Электрофизические методы исследования наноматериалов

Методы измерения удельного сопротивления. Четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления. Удельное сопротивление и удельное поверхностное сопротивление. Измерение поверхностного сопротивления относительно тонких полупроводниковых пластин и тонких проводящих (полупроводниковых и металлических) слоев, изолированных от проводящих подложек. Двухслойные структуры. Метод самокомпенсации геометрических эффектов. Современные установки измерения поверхностного сопротивления.

Семестр: 2 (Весенний)

#### 16. Атомно-силовая микроскопия

Принцип работы. Конструкция атомно-силового микроскопа. Особенности работы. Обработка полученной информации и восстановление полученных изображений. Современное состояние и развитие сканирующей зондовой микроскопии. Практические измерения. Толщины двумерных материалов. Шероховатость тонких металлических пленок.

#### 17. Сканирующая туннельная микроскопия

Принцип работы. Конструкция сканирующего туннельного микроскопа. Особенности работы. Обработка полученной информации и восстановление полученных изображений. Современное состояние и развитие сканирующей туннельной микроскопии. Практические измерения.

#### 18. Растровая электронная микроскопия

Принцип работы. Конструкция и основные составляющие растрового электронного микроскопа. Особенности работы. Обработка полученной информации и восстановление полученных изображений. Практические измерения. Морфология поверхности ультратонких металлических пленок.

#### 19. Просвечивающая электронная микроскопия

Принцип работы. Конструкция и основные составляющие просвечивающего электронного микроскопа. Особенности работы. Обработка полученной информации и восстановление полученных изображений. Практические измерения. Просвечивающая электронная микроскопия двумерных материалов.

#### 20. Оптическая литография (фотолитография)

Принцип работы. Процесс фотолитографии. Фотополимеры. Изготовление микроструктур. Очистка и подготовка поверхности. Нанесение фоторезиста. Экспонирование. Проявление. Обработка поверхности.

#### 21. Электронная литография

Принцип работы. Процесс электронной литографии. Разрешение в электронной литографии. Принципы записи рисунка на образце. Системы для электронной литографии. Запись рисунков на образце.

#### 22. Рентгеновская дифрактометрия

Теоретические основы метода. Рентгеноструктурный анализ. Рентгенодифрактометрический метод. Идентификация и количественное определение фаз (фазовый анализ). Практические измерения для тонких металлических пленок.

#### 23. Лазерная нанополимеризация (или двухфотонная полимеризация)



Теоретические основы метода. Двухфотонная полимеризация. Полимеры. Изготовление двумерных и трехмерных структур. Разрешающая способность в типичных экспериментах по лазерной нанополимеризации.

#### 24. Фотолюминесцентная микроскопия

Фотолюминесцентная микроскопия при комнатной температуре и картирование. Фотолюминесцентная абсорбционная микроскопия при комнатной температуре. Низкотемпературная фотолюминесцентная микроскопия.

#### 25. Спектроскопия комбинационного рассеяния двумерных материалов

Методика спектроскопии комбинационного рассеяния двумерных материалов: графен и дихалькогениды переходных металлов. Практические измерения и обработка спектров.

#### 26. Спектральная эллипсометрия двумерных материалов

Эффективные модели спектральной эллипсометрии для анализа оптических свойств двумерных материалов: графен и дихалькогениды переходных металлов. Практические измерения и извлечение оптических констант.

#### 27. Оптическая рефлектометрия

Теоретические основы метода. Модели для анализа. Моделирование. Практические измерения для тонких и ультратонких металлических пленок.

#### 28. Дальнепольная оптическая микроскопия

Рассеяние наночастиц. Темнопольная микроскопия. Разрешение метода. Применения. Гибридные наноструктуры. Практические измерения.

#### 29. Ван-дер-ваальсовы материалы

Физика ван-дер-ваальсовых материалов. Сборка ван-дер-ваальсовых гетероструктур. Методы изучения ван-дер-ваальсовых гетероструктур. Двуслойные структуры и муар.

#### 30. Обзор технологий синтеза и методов исследований наноматериалов

Анализ технологий синтеза и методов исследований наноматериалов. Теоретические и практические основы.

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

Лекционные занятия: комплект электронных презентаций/слайдов; аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук); специальные технические средства для обучающихся инвалидов и лиц с ОВЗ.

1. Установка спектроскопии комбинационного рассеяния света Horiba JY LabRAM HR Evolution с возможностью картографирования образцов
2. Рассеивающий сканирующий ближнепольный оптический микроскоп Neaspec NeaSNOM с модулями визуализации и спектроскопии (рабочий диапазон 0,4 - 20 мкм).
3. Спектроскопический эллипсометр (240-930 нм) SENTECH SE 800E с рефлектометрическим зондом FTPadvance.
4. Спектроскопический эллипсометр (250-3200 нм) Woollam VASE.
5. Биосенсор на основе поверхностного плазмонного резонанса BiOptix 104sa.
6. Спектрофотометр (175-3300 нм) Agilent Technologies Cary 5000 UV-Vis-NIR.
7. Лабораторный поляризационный микроскоп Carl Zeiss Axio Scope.A1.
8. Спектрометр ИК диапазона (900-2550 нм) Ocean Optics NIRQuest256-2.5,
9. Фурье-спектрометр (900-2600 нм) Ocean Optics ANIR-900-2600,
10. Спектрометр (200-950 нм) Ocean Optics QE65000,
11. Компактные спектрометры (350-700 нм) Thorlabs CCS100.
12. Вакуумный инфракрасный Фурье спектрометр BRUKER VERTEX 80V с инфракрасным микроскопом HYPERION 2000.
13. Терагерцевый спектрометр, включая систему визуализации (имиджинг) Menlo Systems TERA K15 - All-Fiber Coupled THz Spectrometer и программное обеспечение TeraLyzer Single THz.
14. Установка электроннолучевого осаждения в высоком вакууме NanoMaster Dual-E-beam Evaporation System NEE-4000.
15. Система для нанесения растворов центрифугированием Laurell Model WS-650Mz-23NPP Single Wafer Spin Processor.
16. Установка плазменной чистки образцов Femto (Diener Electronic GmbH).
17. Установка для лазерной 3D литографии (Nanoscribe Photonic Professional).
18. Наборы современной оптики (в том числе волоконной) и высокоточной оптомеханики Thorlabs и Newport.

## 6.Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Физическая оптика [Текст] : учебник для вузов / С. А. Ахманов, С. Ю. Никитин .— М : Изд-во МГУ, 2004 .— 656 с.
2. Основы нанооптики [Текст] / Л. Новотный, Б. Хехт ; пер. с англ. А. А. Коновко, О. А. Шутовой ; под ред. В. В. Самарцева - М.Физматлит,2009, 2011
3. Наноплазмоника и метаматериалы [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. А. Астапенко ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т .— М. : МФТИ, 2011 .— 180 с.
4. Оптика и фотоника. Принципы и применения [Электронный ресурс]. В 2 т. Т. 1, учеб. пособие / Б. Салех, М. Тейх . — Долгопрудный, Интеллект, 2012.— URL: <http://books.mipt.ru/book/301340> (дата обращения: 22.12.2020). - Полный текст (Режим доступа : из сети МФТИ / Удаленный доступ)
5. Оптика и фотоника. Принципы и применения [Электронный ресурс]. В 2 т. Т. 2, учеб. пособие / Б. Салех, М. Тейх . — Долгопрудный, Интеллект, 2012.— URL: <http://books.mipt.ru/book/301342> (дата обращения: 22.12.2020). - Полный текст (Режим доступа : из сети МФТИ / Удаленный доступ)

### Дополнительная литература

1. Наноплазмоника [Текст]/В. В. Климов, -М., Физматлит, 2010
2. Квантовая наноплазмоника [Текст] : [учебное пособие] / Е. С. Андрианов [и др.] .— Долгопрудный : Изд. дом "Интеллект", 2015 .— 368 с.
3. Квазичастицы в физике конденсированного состояния [Электронный ресурс] / Н. Б. Брандт, В. А. Кульбачинский. — М., Физматлит, 2010.— URL: <https://e.lanbook.com/book/59598> (дата обращения: 21.01.2021). - Полный текст (Режим доступа : из сети МФТИ / Удаленный доступ)

4. Основы оптики [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / М. Борн, Э. Вольф ; пер. с англ. С. Н. Бреуса, А. И. Головашкина, А. А. Шубина ; под ред. Г. П. Мотулевич .— М. : Наука, 1970 .— 855 с.

Literature fund of the basic departament:

5. Б. А. Колесов, «Прикладная КР-спектроскопия», Москва, РАН, (2018)

6. С. П. Кэри, «Применения спектроскопии КР и РКР в биохимии», Москва, Мир, (1985)

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

[https://mipt.ru/education/chairs/physics\\_and\\_technology\\_of\\_nanostructures/study.php](https://mipt.ru/education/chairs/physics_and_technology_of_nanostructures/study.php)

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

При подготовке и проведении лекционных занятий используется сеть интернет.

Кроме того, используется Libre Office, а также графический пакет Ink Scape.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Фотоника и оптоинформатика
<b>профиль подготовки:</b>	Фотоника, квантовые технологии и двумерные материалы Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики и технологии наноструктур
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчики:**

В. Волков, phd (к.ф.-м.н.)  
С. Новиков, канд. физ.-мат. наук  
Г.И. Целиков, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области фотоники и оптоинформатики
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач в области фотоники и оптоинформатики
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований в области фотоники и оптоинформатики к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен самостоятельно или в составе научного коллектива планировать и проводить научные исследования в области фотоники и оптоинформатики
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Nanomaterials Analysis and Research/Физические методы исследований наноматериалов» обучающийся должен:

### знать:

- основные принципы спектроскопии и спектрофотометрии
- основные принципы спектральной эллипсометрии
- основные принципы дальнепольной оптической микроскопии
- основные принципы атомно-силовой микроскопии
- основные принципы сканирующей туннельной микроскопии
- основные принципы сканирующей ближнепольной оптической микроскопии
- основные принципы комбинационного рассеяния и гигантского комбинационного рассеяния
- основные принципы спектроскопии поверхностного плазменного резонанса
- основные принципы растровой электронной микроскопии
- основные принципы просвечивающей электронной микроскопии
- основные принципы терагерцовой спектроскопии
- основные принципы оптической рефлектометрии
- основные принципы рентгеновская дифрактометрия
- основные принципы лазерная нанополимеризация (или двухфотонная полимеризация)
- основные принципы фотолюминесцентная микроскопия
- основные принципы изготовления образцов (напыление металлических пленок, оптическая литография (фотолитография))
- основные объекты и явления, исследование которых возможно оптическими методами
- технику безопасности и правила работы с научным оборудованием

### уметь:

- работать со спектрофотометром
- работать с эллипсометром
- работать с атомно-силовым микроскопом
- работать со сканирующим туннельным микроскопом
- работать со сканирующим ближнепольным оптическим микроскопом
- работать со сканирующим рамановским микроскопом
- работать с растровым электронным микроскопом
- работать с фотолюминесцентным микроскопом
- работать с просвечивающей электронной микроскопией
- работать с растровым электронным микроскопом
- работать с химическими растворами, определять химический состав растворов.
- работать с Ван-дер-ваальсовыми материалами. Определять состав, свойства, качество, и количество слоев.
- планировать эксперимент для решения научной задачи с использованием оптических методов.
- собирать, обрабатывать и представлять результаты эксперимента, учитывая возможные ошибки и погрешности

### владеть:

- методами анализа и обработки экспериментальных данных.
- навыками представления экспериментальных данных.
- навыками характеристики изготовленных образцов с использованием атомно-силовой микроскопии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии.
- навыками решения научных задач экспериментальными оптическими методами (Комбинационное рассеяние, гигантское Комбинационное рассеяние, спектрофотометрия, ближнепольная микроскопия, эллипсометрии, фотолюминесцентной микроскопии)

## 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 прошлого занятия.

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

Перечень контрольных вопросов:

Первый семестр

1. Что такое метаматериалы, метаповерхности, фотонные кристаллы. Что такое гиперболические метаматериалы и Ван-дер-ваальсовы гетероструктуры? Какие бывают методы изготовления искусственных наноматериалов?
2. Какие двумерные материалы вы знаете. Каким способом можно получить графен? Какие двумерные материалы можно переносить на другие подложки и какая методика переноса?
3. Какие вы знаете методы исследования наноматериалов? Какие оптические свойства объемного вещества? Классические теории оптических постоянных. Модель Лоренца. Многоосцилляторная модель. Модель анизотропных осцилляторов. Модель Друде. Оптические характеристики вещества. Оптические свойства частиц. Экстинкция, поглощение, рассеяние.
4. Современная микроскопическая техника. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия. Мультифотонная конфокальная микроскопия. Количественная флуоресцентная микроскопия. Методы сверхразрешения. Специальные оптические методы.
5. Какие вы знаете спектроскопические методы? Спектральный анализ. Фотоколориметрия. Спектрофотометрия. ФотOLUMИнесцентная спектроскопия. Что такое фотOLUMИнесценция и в чем отличие этого процесса от комбинационного рассеяния света.? Нарисовать схему энергетических переходов Яблонского.
6. Какой принцип работы спектрофотометра? Закон Бугера-Ламберта-Бера.
7. Терагерцовая спектроскопия непрерывного действия на лампах обратной волны (ЛОБ). Импульсная терагерцовая спектроскопия с временным разрешением. Инфракрасная Фурье-спектроскопия.
8. В чем сущность эффекта комбинационного рассеяния? Что такое стоксово и антистоксово рассеяние? Типы комбинационного рассеяния света, отличающиеся механизмами взаимодействия света с веществом. Классическая теория. Квантовая теория. Эмпирические законы комбинационного рассеяния света. Вынужденное комбинационное рассеяние. Методики рамановской спектроскопии. Какой принцип работы Романовского микроскопа?
9. Что такое гигантское комбинационное рассеяние (SESR)? С какими концентрациями позволяет оно работать? Экспериментальные методики получения спектров гигантского комбинационного рассеяния. Основные характеристики и механизмы эффекта гигантского комбинационного рассеяния. Применение гигантского комбинационного рассеяния к изучению биологических молекул. Возможности и перспективы развития метода спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния.
10. Что такое поверхностные электромагнитные волны. Поверхностный плазмонный резонанс. Спектроскопия поверхностного плазмонного резонанса. Чувствительность и ограничения метода. Компактные схемы. Биосенсоры на основе спектроскопии поверхностного плазмонного резонанса.
11. Какой принцип действия эллипсометра. Какая схема измерения и получение данных?
12. Что такое матрица Мюллера?
13. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (апертурная): Дифракционный предел. Введение в сканирующую ближнепольную оптическую микроскопию. Разрешение сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. Принципиальные схемы сканирующей ближнепольной оптической микроскопии.
14. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (безапертурная): Введение в рассеивающую сканирующую ближнепольную оптическую микроскопию. Разрешение рассеивающей сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. Схема. Плазмоны в двумерных материалах.
15. Четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления. Удельное сопротивление и удельное поверхностное сопротивление. Измерение поверхностного сопротивления относительно тонких полупроводниковых пластин и тонких проводящих (полупроводниковых и металлических) слоев, изолированных от проводящих подложек. Двухслойные структуры. Метод самокомпенсации геометрических эффектов. Современные установки измерения поверхностного сопротивления.

Второй семестр

1. Какой принцип работы и конструкция атомно-силового микроскопа? Назовите особенности работы. Современное состояние и развитие сканирующей зондовой микроскопии.
2. Какой принцип работы и конструкция сканирующего туннельного микроскопа? Особенности работы? Современное состояние и развитие сканирующей туннельной микроскопии.
3. Принцип работы растрового электронного микроскопа. Конструкция и основные составляющие растрового электронного микроскопа. Особенности работы
4. Принцип работы просвечивающего электронного микроскопа. Конструкция и основные составляющие просвечивающего электронного микроскопа. Особенности работы.
5. Что такое оптическая литография (фотолитография)? Опишите пошагово процесс фотолитографии.
6. Что такое электронная литография? Процесс электронной литографии. Разрешение в электронной литографии. Принципы записи рисунка на образце.
7. Расскажите теоретические основы метода Рентгеновская дифрактометрии. Рентгеноструктурный анализ. Рентгенодифрактометрический метод. Идентификация и количественное определение фаз (фазовый анализ).
8. Что такое двухфотонная полимеризация? Принцип действия. Полимеры. Изготовление двумерных и трехмерных структур. Разрешающая способность в типичных экспериментах по лазерной нанополимеризации.
9. Фотолюминесцентная микроскопия при комнатной температуре и картирование. Фотолюминесцентная абсорбционная микроскопия при комнатной температуре. Низкотемпературная фотолюминесцентная микроскопия.
10. Оптическая рефлектометрия: теоретические основы метода. Модели для анализа.
11. Рассеяние наночастиц. Темнопольная микроскопия. Разрешение метода. Применения. Гибридные наноструктуры. Практические измерения. Теория Ми.
12. Физика ван-дер-ваальсовых материалов. Сборка ван-дер-ваальсовых гетероструктур. Методы изучения ван-дер-ваальсовых гетероструктур. Двуслойные структуры и муар.
13. Обзор технологий синтеза и методов исследований наноматериалов.

Примеры контрольных заданий (2 семестр):

1. Критерий пространственного разрешения фотолитографического метода создания наноструктур?
2. В какой элементарной квантовой наноструктуре энергетический спектр электронов дискретный?
3. Как изменяется энергия размерного квантования с увеличением размера наноструктуры?
4. Сколько и какие элементарные процессы, протекающие в зоне роста, включает в себя метод молекулярно-лучевой эпитаксии?
5. Основные методы характеристики фотонных кристаллов?

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Принципы работы атомно-силовой микроскопии. Разрешение.
2. Методы характеристики двумерных материалов.

Билет 2.

1. Принципы работы просвечивающей электронной микроскопии. Пробоподготовка. Разрешение.
2. Методы определения оптических свойств материалов.

Билет 3.

1. Принципы работы сканирующей электронной микроскопии. Разрешение.
2. Измерение проводимости двумерных материалов.

Билет 4.

1. Принципы спектральной эллипсометрии. Возможности метода.
2. Электронная литография. Принцип работы. Процесс электронной литографии. Разрешение в электронной литографии.

Билет 5.

1. Электрофизические методы исследования наноматериалов.



## 2. Комбинационное рассеяние света (эффект Рамана). Классическая теория. Квантовая теория.

### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Оценивание знаний происходит в форме дифференцированного зачета (9-й семестр) и экзамена (10-й семестр). Дифференцированный зачет и экзамен проводятся по билетам. Никакие вспомогательные средства не допускаются. Студент представляет свое решение поставленной задачи и ответ на вопрос билета экзаменатору. Затем экзаменатор задает студенту несколько вопросов, которые равномерно охватывают содержание курса. Итоговая оценка выставляется на основе качества ответов и продемонстрированного уровня понимания.