

**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**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Основы сканирующей зондовой микроскопии
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики и химии наноструктур
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 45 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 15 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.Н. Решетов, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии наноструктур 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Основы сканирующей зондовой микроскопии" предусматривает изучение физических основ сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), его возможностей и ограничений свойственных СЗМ.

Задачи дисциплины:

- освоение студентами базовых знаний в области физического материаловедения;
- приобретение теоретических знаний в области изучения свойств наноструктур и квантово-механических аспектов измерения на атомных масштабах;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области СЗМ;
- приобретение навыков работы на отечественном наноизмерительном оборудовании.

По результатам освоения дисциплины студент должен знать:

квантовые явления, наблюдаемые при помощи зондовых сканирующих микроскопов и экспериментальные физические методы, разработанные на их базе;  
экспериментальные основы сканирующей зондовой микроскопии.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Исторические аспекты создания высоковакуумного измерительного комплекса НАНОФАБ фирмы NT-MTD
  2. Методы исследования свойств материалов на наноуровне.
  3. Методы обработки изображений, используемые в СЗМ
  4. Принципы работы сканирующих зондовых микроскопов.
  5. Возможности нанотехнологий.
  6. Графен и перспективы его использования в нанoeлектронике
  7. Изучение программ управления атомно-силовым микроскопом и сканирующим нанотвердомером.
  8. Изучение программных средств обработки изображений, получаемых с помощью сканирующих зондовых микроскопов.
  9. Изучение физических характеристик приборов нанолaborатории
  10. Методы формирования наноструктур
  11. Моделирование атомарных структур, кластеров и нанотрубок с помощью сильных магнитов.
  12. Оптика наноструктурированных материалов
  13. Перспективы развития СЗМ.
- 1 Исторические аспекты создания высоковакуумного измерительного комплекса НАНОФАБ фирмы NT-MTD
  - 2 Методы исследования свойств материалов на наноуровне.
  - 3 Методы обработки изображений, используемые в СЗМ
  - 4 Принципы работы сканирующих зондовых микроскопов.
  - 5 Возможности нанотехнологий.
  - 6 Графен и перспективы его использования в нанoeлектронике
  - 7 Изучение программ управления атомно-силовым микроскопом и сканирующим нанотвердомером.
  - 8 Изучение программных средств обработки изображений, получаемых с помощью сканирующих зондовых микроскопов.
  - 9 Изучение физических характеристик приборов нанолaborатории
  - 10 Методы формирования наноструктур
  - 11 Моделирование атомарных структур, кластеров и нанотрубок с помощью сильных магнитов.
  - 12 Оптика наноструктурированных материалов
  - 13 Перспективы развития СЗМ.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение физических основ сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), его возможностей и ограничений свойственных СЗМ.

### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области физического материаловедения;
- приобретение теоретических знаний в области изучения свойств наноструктур и квантово-механических аспектов измерения на атомных масштабах;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области СЗМ;
- приобретение навыков работы на отечественном наноизмерительном оборудовании.

### 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-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	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
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- квантовые явления, наблюдаемые при помощи зондовых сканирующих микроскопов и экспериментальные физические методы, разработанные на их базе;
- экспериментальные основы сканирующей зондовой микроскопии.

уметь:

абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;  
пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;  
делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;  
производить численные оценки по порядку величины;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;  
видеть в технических задачах физическое содержание;  
осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;  
получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценивать степень их достоверности;  
работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;  
эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

навыками освоения большого объема информации;  
навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;  
культурой постановки и моделирования физических задач;  
навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;  
практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;  
навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами микроскопических и наносистем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектрами.

#### 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	Исторические аспекты создания высоковакуумного измерительного комплекса НАНОФАБ фирмы NT-MTD	4			4
2	Методы исследования свойств материалов на наноуровне	10			1
3	Методы обработки изображений, используемые в СЗМ	10			1
4	Принципы работы сканирующих зондовых микроскопов	6			9
5	Возможности нанотехнологий	2			
6	Графен и перспективы его использования в нанoeлектронике	3			
7	Изучение программ управления атомно-силовым микроскопом и сканирующим нанотвердомером			4	2
8	Изучение программных средств обработки изображений, получаемых с помощью сканирующих зондовых микроскопов			4	2
9	Изучение физических характеристик приборов нанолaborатории			4	2
10	Методы формирования наноструктур	3			10

11	Моделирование атомарных структур, кластеров и нанотрубок с помощью сильных магнитов			3	2
12	Оптика наноструктурированных материалов	3			4
13	Перспективы развития СЗМ	4			8
Итого часов		45		15	45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 7 (Осенний)

##### 1. Исторические аспекты создания высоковакуумного измерительного комплекса НАНОФАБ фирмы NT-MTD

Достижения и ограничения классической оптической микроскопии. Круг задач успешно решаемых с помощью оптических наблюдений. Просвечивающие и сканирующие электронные микроскопы. История развития и современные возможности Ионный микроскоп Эдвина Мюллера и его модификации. Рентгеновские дифрактометрия и структурный анализ.

Акустический сканирующий микроскоп. Компьютерная томография и экспресс диагностика состояния организма человека. Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ): метрологические ограничения и технологические возможности. Зонд, как средство измерения. Поиски эффектов чувствительных к изменению расстояния. Основные принципы и потенциальные возможности сканирующей зондовой микроскопии. За что Герд Бинниг и Генрих Рорер получили Нобелевскую премию и как СЗМ помогают развивать нанoeлектронику.

##### 2. Методы исследования свойств материалов на наноуровне

Исследование атомарной структуры поверхности и манипулирование отдельными атомами и молекулами с помощью СТМ. Трудности, возникающие при работе туннельных микроскопов в условиях нормальной атмосферы. Альтернативные методы измерения проводимости подложки и тока растекания. Специфика работы с непроводящими поверхностями и различные режимы работы классических АСМ. Измерение локальной емкости, сил электростатического и магнитного взаимодействия. Исследования элементов микроэлектронных схем. Исследование доменной структуры сегнетоэлектриков и ферромагнетиков, изучение полупроводников и гетероструктур. Определение таких механических свойств материалов, как модуль Юнга и твердость с помощью АСМ.

Различные способы реализации режимов наноиндентирования и склерометрии на манометровых масштабах. Исследования тонких пленок и покрытий с помощью СЗМ.

Исследование доменной структуры сегнетоэлектриков и ферромагнетиков, изучение полупроводников и гетероструктур. Спектрометрические измерения с помощью СЗМ, включая использование эффекта гигантского комбинационного рассеяния, называемого также зондово-усиленной Рамановской спектроскопией. Томографические трехмерные исследования образцов с помощью СЗМ и ПЭМ. Особенности использования СЗМ в биологии. Мягкость и липкость биосистем, как факторы, ограничивающие достижимое разрешение.

Жидкостные и термостатированные ячейки для исследования клеточных препаратов методами АСМ.

##### 3. Методы обработки изображений, используемые в СЗМ

Методы визуализации и обработки изображений получаемых на СЗМ. Способы представления исследуемых объектов, работа с двумерными картинками и измерения на них. 3D-изображения и влияние характера освещения на заметность исследуемых структур. Методы фильтрации, повышения контраста и решения задачи деконволюции формы иглы. Особенности создания образцовых мер длины, высоты, упругости, твердости, электропроводности и других для калибровки СЗМ.

#### 4. Принципы работы сканирующих зондовых микроскопов

Зонд, как средство измерения, вместо волн излучения. Поиски эффектов чувствительных к изменению расстояния. Пьезокерамические сканеры и манипуляторы, используемые в СЗМ. Туннельный эффект и возможности Сканирующего Туннельного Микроскопа. Силы взаимодействия между твердыми телами и Атомно Силовой Микроскоп. Ближнепольный оптический сканирующий микроскоп. Кремневый кантилевер и лазерный дефлектор, как основа целого класса СЗМ. Использование пьезорезонансных датчиков в СЗМ.

Многофункциональные СЗМ, технологического назначения. Пьезокерамические сканеры и манипуляторы, используемые в СЗМ. Специфика конструктивных решений, используемых в СЗМ NanoScan. Изучение типичных конструктивных решений, используемых в СЗМ. Особенности систем управления сканирующими зондовыми микроскопами.

Многофункциональные СЗМ, технологического назначения. Знакомство с семейством микроскопов NTEGRA российской фирмы НТ-МДТ. Обзор основных зарубежных производителей СЗМ и их специализации.

Семестр: 8 (Весенний)

#### 5. Возможности нанотехнологий

Этапы становления: от просто электроники к микро- и нанoeлектронике. Классическое и квантовое поведение рабочих элементов. Основные типы современных полупроводниковых элементов. Планарная технология и трехмерные микросхемы. Принцип работы полевого транзистора и предельные возможности в плане уменьшения размеров и повышения быстродействия современных логических элементов. Производить можно только то, что умеешь измерять. Основные методы контроля полупроводниковых структур. Электрические измерения. Оптические методы контроля. От исследования отдельных нанoeлектронных элементов к интегральным схемам нового поколения. Физические эффекты и технологические прорывы на пути к новой электронике. Обзор основных эффектов и разработанных устройств для нанoeлектроники. От одноэлектронных транзисторов до проволоочных лазеров. Квантовый компьютер: физика явления и математические достоинства. Связанные состояния и квантовая криптография. Одноэлектронный транзистор, эффект Джозевсона, квантовый эффект Холла и другие микроскопические явления с макроследствиями. Квантовый пересмотр международной системы единиц и замыкание всех измерений на физические воспроизводимые константы. Молекулярная электроника и органические полупроводники. Квантовые точки и провода. Методы создания, исследования и перспективы применения.

#### 6. Графен и перспективы его использования в нанoeлектронике

Новая форма кристаллического углерода «графен» и перспективы его использования в нанoeлектронике. Свойства графитовых нанотрубок и их реальные применения. Алмазная электроника и альтернативные варианты широкозонных полупроводников. Полупроводниковые сверхрешетки и другие перспективы освоения терагерцового диапазона частот. Нобелевская премия по физике 2007 года, гигантское магнетосопротивление и нанотехнологические применения этого замечательного эффекта.

#### 7. Изучение программ управления атомно-силовым микроскопом и сканирующим нанотвердомером

Лабораторная работа. Знакомство с программами управления и обработки данных СЗМ ИНТЕГРА (NTEGRA) и НаноСкан (NanoScan).

8. Изучение программных средств обработки изображений, получаемых с помощью сканирующих зондовых микроскопов

Лабораторная работа. Методы обработки изображений, используемые в сканирующей зондовой микроскопии.

9. Изучение физических характеристик приборов нанолaborатории

Лабораторная работа. Исследование метрологических характеристик прибора NanoScan Compact 2.

Лабораторная работа. Реализация режима измерительного динамического индентирования на NanoScan 3D 2.

Лабораторная работа. Изучение метрологических характеристик СЗМ ИНТЕГРА 2.

10. Методы формирования наноструктур

Методы формирования наноструктур: электронно-лучевая и ионная литография.

Самоорганизация и иерархическое устройство – ключ к построению новых нанoeлектронных устройств. Соединение в рамках одного нанoeустройства сенсорной, аналитической и исполнительной функции. Отменяют ли нанотехнологические и нанoeлектронные достижения традиционные производства? Возможна ли не белковая форма существования жизни или когда роботы станут умнее людей?

11. Моделирование атомарных структур, кластеров и нанотрубок с помощью сильных магнитов

Лабораторная работа. Моделирование атомарных структур с помощью магнитных шариков.

12. Оптика наноструктурированных материалов

Оптика наноструктурированных материалов и фотонных кристаллов. Среды с отрицательным показателем преломления и сильно нелинейные материалы. Сверхпроводящие нанопроволоки - элементы однофотонных квантовых детекторов.

13. Перспективы развития СЗМ

Актуальные задачи современного микроскопостроения и способы соединения в рамках одного технологического цикла различных технологических процедур. Современные нанотехнологические комплексы на базе нанофабрик и центров синхротронного излучения.

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

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

Сканирующий зондовый микроскоп и вспомогательное оборудование к нему.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. В.Л. Миронов, “Основы сканирующей зондовой микроскопии”. Техносфера (2005).
2. D.Sarid. “Exploring scanning probe microscopy with “Mathematica”. John Wiley&Sons, Inc., New York, (1997).

### **Дополнительная литература**

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

1. [www.nanoworld.org](http://www.nanoworld.org)
2. [www.nanotube.ru](http://www.nanotube.ru)
3. [www.ntmdt.ru](http://www.ntmdt.ru)
4. [www.nanoscan.info](http://www.nanoscan.info)
5. [www.nanotech-now.com](http://www.nanotech-now.com)
6. [www.nanoscopy.net](http://www.nanoscopy.net)
7. [www.nanorf.ru](http://www.nanorf.ru)
8. [www.nanonewsnet.ru](http://www.nanonewsnet.ru)
9. [www.nanotechnology.net](http://www.nanotechnology.net)

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

программы управления NTEGRA и NanoScan, программные продукты gwyddion.net, SPIP с, imagemet.co.

**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 дисциплины, 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 текущей и 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>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики и химии наноструктур
<b>курс:</b>	<u>4</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
7 (осенний) - Дифференцированный зачет	
8 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	В.Н. Решетов, канд. физ.-мат. наук, доцент

## 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-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	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
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Основы сканирующей зондовой микроскопии» обучающийся должен:

### знать:

квантовые явления, наблюдаемые при помощи зондовых сканирующих микроскопов и экспериментальные физические методы, разработанные на их базе;  
экспериментальные основы сканирующей зондовой микроскопии.

### уметь:

абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;  
пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;  
делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;  
производить численные оценки по порядку величины;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;  
видеть в технических задачах физическое содержание;  
осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;  
получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценивать степень их достоверности;  
работать на современном, в том числе и уникальном экспериментальном оборудовании;  
эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

### владеть:

навыками освоения большого объема информации;  
навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;  
культурой постановки и моделирования физических задач;  
навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;  
практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;  
навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами микроскопических и наносистем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектрами.

### **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**

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачета:

1. Этапы становления: от просто электроники к микро- и нанoeлектронике. Классическое и квантовое поведение рабочих элементов.
2. Вольтамперная характеристика диода, коллекторная биполярного и стоковая полевого транзистора. Эффект кулоновская блокада при протекании тока через квантовую точку расположенную между двумя проводниками.
3. Основные типы современных полупроводниковых элементов. Планарная технология и трехмерные микросхемы.
4. Аналоговая и цифровая техника. Фотолитография, травление, напыление, диффузия, эпитаксия, окисление.
5. Принцип работы полевого транзистора и предельные возможности в плане уменьшения размеров и повышения быстродействия современных логических элементов.
6. Оценит подзатворную емкость и сопротивление канала и определить постоянную времени переключения одним транзистором другого. Оценить токи, текущие в одном из 47 миллионов транзисторов процессора АТОМ.
7. Производить можно только то, что умеешь измерять. Основные методы контроля полупроводниковых структур. Электрические измерения. Оптические методы контроля. Электронная микроскопия. Рентгеновские методы исследования.
8. Что измеряет каждый из перечисленных методов.
9. Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ): метрологические ограничения и технологические возможности. Зонд, как средство измерения. Поиски эффектов чувствительных к изменению расстояния.
10. Что такое пьезосканер, кантилевер и какие бывают иглы у СЗМ. Почему СТМ плохо работает на воздухе. Возможно ли атомарное разрешение в АСМ. Почему СЗМ помещают в вакуум.
11. Основные принципы и потенциальные возможности сканирующей зондовой микроскопии. За что Герд Бинниг и Генрих Рорер получили Нобелевскую премию и как СЗМ помогают развивать нанoeлектронику.
12. Туннельный эффект и возможности Сканирующего Туннельного Микроскопа. Силы взаимодействия между твердыми телами и Атомно Силовой Микроскоп.
13. Оцените радиус кривизны швейной иглы и сравните его с типичным размером кантилевера и зондового острия. Во сколько раз отличаются силы притяжения между атомами в алмазе и литии или калии, свинце, железе, золоте, любом мягком материале и пластике.
14. Достижения и ограничения классической оптической микроскопии. Ближне-польный оптический сканирующий микроскоп.
15. Как в оптике получают разрешение по глубине порядка нескольких десятком нм. Можно ли получить тем же методом горизонтальное разрешение лучше 100 нм.
16. Кремневый кантилевер и лазерный дефлектор, как основа целого класса СЗМ. Использование пьезорезонансных датчиков в СЗМ.

17. Оценить скорость перемещения солнечного зайчика по поверхности Луны, если на Земле зеркало двигает человек своей собственной силой. Оценить минимально регистрируемое звуковое давление, если микрофон ловит зайчик, отраженный от оконного стекла с расстояния 1 км.
18. Пьезокерамические сканеры и манипуляторы, используемые в СЗМ. Специфика конструктивных решений, используемых в СЗМ NanoScan.
19. Что такое пьезорезонансный датчик и почему частоту мерить легче, чем амплитуду. Зачем в пьезосканеры встраивают емкостные датчики перемещения.
20. Изучение типичных конструктивных решений, используемых в СЗМ. Особенности систем управления сканирующими зондовыми микроскопами.
21. Что такое обратная связь по перемещению и почему быстродействие всех узлов СЗМ пытаются сделать как можно выше.
22. Многофункциональные СЗМ, технологического назначения. Знакомство с семейством микроскопов NTEGRA российской фирмы НТ-МДТ. Обзор основных зарубежных производителей СЗМ и их специализации.

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена:

1. Исследование атомарной структуры поверхности и манипулирование отдельными атомами и молекулами с помощью СТМ. Специфика работы с непроводящими поверхностями и различные режимы работы классических АСМ. Измерение локальной емкости, сил электростатического и магнитного взаимодействия. Исследования элементов микроэлектронных схем. Определение таких механических свойств материалов, как модуль Юнга и твердость с помощью АСМ. Различные способы реализации режимов нано-индентирования и склерометрии на манометровых масштабах.
2. Оцените электростатическое притяжение /отталкивание кантилевера от поверхности и сравните с Ван-дер-Вальсом, для некоторой конфигурации и уровня напряжений и дистанций. Что такое твердость и почему ее величина зависит от способа измерения. Сравнить величину локальной емкости непосредственно под острием токопроводящей иглы с паразитными конструктивными емкостями.
3. Исследования тонких пленок и покрытий с помощью СЗМ. Исследование доменной структуры сегнетоэлектриков и ферромагнетиков, изучение полупроводников и гетероструктур. Спектрометрические измерения с помощью СЗМ, включая использование эффекта гигантского комбинационного рассеяния, называемого также зондово-усиленной Рамановской спектроскопией. Томографические трехмерные исследования образцов с помощью СЗМ и ПЭМ. Особенности использования СЗМ в биологии. Мягкость и липкость биосистем, как факторы, ограничивающие достижимое разрешение.
4. Сравните магнитные/электрические и механические силы для типичного кантилевера и ферромагнетика/сегнетоэлектрика. Силовая спектрометрия и кривые подвода/отвода – связанные с процессом физические явления и извлекаемая информация.
5. Методы визуализации и обработки изображений получаемых на СЗМ. Способы представления исследуемых объектов, работа с двумерными картинками и измерения на них. 3D-изображения и влияние характера освещения на заметность, исследуемых структур. Методы фильтрации, повышения контраста и решения задачи деконволюции формы иглы. Особенности создания образцовых мер длины, высоты, упругости, твердости, электропроводности и других для калибровки СЗМ.
6. Как в Фотошопе получить из фотографии трехмерное изображение и почему это порой бессмысленно в жизни и широко применяется в микроскопии. Основные методы пространственной фильтрации и повышения контраста АСМ изображений.
7. Актуальные задачи современного микроскопостроения и способы соединения в рамках одного технологического цикла различных технологических процедур. Современные нанотехнологические комплексы на базе нанофабрик и центров синхротронного излучения.
8. От исследования отдельных нанoeлектронных элементов к интегральным схемам нового поколения. Физические эффекты и технологические прорывы на пути к новой электронике.
9. Обзор основных эффектов и разработанных устройств для нанoeлектроники. От одноэлектронных транзисторов до проволоочных лазеров.
10. Какие физические эффекты используются в классической микроэлектронике? Что и почему из «классики» перестает работать на наноуровне, какие новые возможности открываются?

11. Квантовый компьютер: физика явления и математические достоинства. Связанные состояния и квантовая криптография.
12. Чем кубит отличается от обычного бита. Что такое ЭПР корреляция и запутанные состояния. Теорема Белла и проблема локальных скрытых параметров. Круг задач требующих для своего решения квантовых компьютеров.
13. Одноэлектронный транзистор, эффект Джозефсона, квантовый эффект Холла и другие микроскопические явления с макропоследствиями.
14. Что такое одноэлектронный транзистор, эффект Джозефсона, квантовый эффект Холла. Явление сверхпроводимости и особенности кольцевых токов в сверхпроводниках.
15. СКВИДы и проблема измерения сверхмалых магнитных полей.
16. Квантовый пересмотр международной системы единиц и замыкание всех измерений на физические воспроизводимые константы.
17. Основные мировые константы, значение которых мы постулируем, как точно равные чему-то. Что такое метр, как можно создать квантовый эталон Ома, Ампера, Вольта? Какие методические трудности возникают при создании эталона массы.
18. Молекулярная электроника и органические полупроводники.
19. В чем органичность OLED дисплеев и почему молекулярная электроника может оказаться дешевле кремневой. Фотостойкость и долговечность органических полупроводниковых структур.
20. Квантовые точки и провода. Методы создания, исследования и перспективы применения.
21. Специфика трехмерных, двухмерных, одномерных и нульмерных квантовых объектов. Возможно ли создание квантовых объектов большей «размерности»? Типы интерфейсов между квантовыми и макроскопическими структурами и величинами. Проблема измерений в квантовом мире и понятие реальности применительно к квантовым объектам.
22. Новая форма кристаллического углерода графен и перспективы его использования в наноэлектронике.
23. В чем был прав и неправ Ландау, доказавший, что двумерных кристаллов быть не может. Как происходит транспорт электронов по двумерному кристаллу и почему этот процесс так чувствителен к внешним полям и адсорбции на графен инородных атомов.
24. Свойства графитовых нанотрубок и их реальные применения.
25. Полупроводниковые и металлические трубки, «квантование» величины сопротивления нанотрубки и как можно померить проводимость одной единственной трубки. Полевой транзистор на углеродной нанотрубке.
26. Алмазная электроника и альтернативные варианты широкозонных полупроводников.
27. Основные способы легирования алмаза донорными и акцепторными примесями. Диоды Шотки, датчики температуры и фотоприемники на основе алмаза.
28. Полупроводниковые сверхрешетки и другие перспективы освоения терагерцового диапазона частот.
29. Почему свет нельзя регистрировать таким же способом, как радиоволны. Электроника для терагерцового диапазона и болометрические приемники для ИК-диапазона. В чем состоит специфика сверхрешеток и почему они «сверх»?
30. Особенности протекания тока в слоистых структурах. Связанные состояния электронов, гетероструктура из магнитных и немагнитных материалов. Магнитная головка современного винчестера.
31. Оптика наноструктурированных материалов и фотонных кристаллов. Среды с отрицательным показателем преломления и сильно нелинейные материалы. Сверхпроводящие нанопроволоки – элементы однофотонных квантовых детекторов.
32. Влияние структур с размером меньше и порядка длины волны на оптические характеристики среды. Резонансные явления в метоматериалах, поляризаторы для ИК-диапазона на основе мелко расчерченных металлических пленок. Квантовый придел для обнаружения отдельных квантов света, фиксация факта наличия фотона в полости без его уничтожения, квантовые неразрушающие измерения. Квантовая телепортация.
33. Методы формирования наноструктур: электронно-лучевая и ионная литография.
34. Приделы фокусировки электронных и ионных пучков, технология многократной экспозиции, примененная Интел для изготовления структур на порядок меньших длины волны используемого УФ излучения.
35. Самоорганизация и иерархическое устройств – ключ к построению новых наноэлектронных устройств.

36. Волшебство синергетики и реальные проблемы создания условий для правильной самоорганизации. Проблема управляемого синтеза и нереальность использование разного рода наноассемблеров для сборки массовых изделий.

37. Соединение в рамках одного наноустройства сенсорной, аналитической и исполнительной функции.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. СКВИДы и проблема измерения сверхмалых магнитных полей.
2. Квантовый пересмотр международной системы единиц и замыкание всех измерений на физические воспроизводимые константы.

Пример 2.

1. Особенности протекания тока в слоистых структурах. Связанные состояния электронов, гетероструктура из магнитных и немагнитных материалов. Магнитная головка современного винчестера.
2. Оптика наноструктурированных материалов и фотонных кристаллов. Среды с отрицательным показателем преломления и сильно нелинейные материалы. Сверхпроводящие нанопроволоки – элементы однофотонных квантовых детекторов.

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 бала - 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 бала - 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 бала - 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 бал - 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**

При проведении устного дифференцированного зачета и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном дифференцированном зачете и экзамене не должен превышать одного астрономического часа.