

**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>	Физика наноразмерных объектов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики департамент химии
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	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: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: А.В. Николаев, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании департамента химии 29.05.2020

## **Аннотация**

Курс "Физика наноразмерных объектов" предусматривает изучение общих представлений о наноструктурных материалах: фуллереах, нанотрубках, графене, слоистых гетероструктур, коллоидных квантовых точках и т.д.

### **Задачи курса**

- дать классификацию наноситруктурированных материалов;
- обосновать связь между электронным строением и физическими (физико-химическими) свойствами веществ;
- познакомить с современными наноструктурными материалами и методами их получения;
- познакомить с областью применения наноситруктурированных материалов.

По результатам освоения курса студент должен:

#### **Знать:**

- виды и классификацию наноструктурированных материалов;
- связь между электронным строением и магнитными эффектами;
- типы полупроводниковых сверхрешеток.

#### **Уметь:**

- определять тип кристаллической решетки.

#### **Владеть:**

- знаниями о слоистых полупроводниках, гетероструктурах.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Виды и классификация наноструктурных материалов
2. Спинтроника и магнитные эффекты в наноструктурных материалах
3. Структурные формы углерода
4. Экспериментальные методы получения и диагностика фуллеренов
5. Графен
6. Экспериментальные методы получения и диагностика графена
7. Углеродные трубчатые материалы
8. Экспериментальные методы получения и диагностика нанотрубок
9. Технологические применения углеродных нанотрубок и графена
10. Слоистые полупроводники, гетероструктуры и полупроводниковые сверхрешетки
11. Полупроводниковые лазеры
12. Коллоидные квантовые точки

## **1. Цели и задачи**

### **Цель дисциплины**

- дать общие представления о наноструктурных материалах: фуллереах, нанотрубках, графене, слоистых гетероструктур, коллоидных квантовых точках и т.д.

### **Задачи дисциплины**

- дать классификацию наноситруктурированных материалов;
- обосновать связь между электронным строением и физическими (физико-химическими) свойствами веществ;
- познакомить с современными наноструктурными материалами и методами их получения;
- познакомить с областью применения наноситруктурированных материалов.

## **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

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- виды и классификацию наноструктурированных материалов;
- связь между электронным строением и магнитными эффектами;
- типы полупроводниковых сверхрешеток.

уметь:

- определять тип кристаллической решетки.

владеть:

- знаниями о слоистых полупроводниках, гетероструктурах.

### 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	Виды и классификация наноструктурных материалов	4			1
2	Спинтроника и магнитные эффекты в наноструктурных материалах	2			1
3	Структурные формы углерода	4			1
4	Фуллерены	2			1
5	Графен	2			1
6	Экспериментальные методы получения и диагностика графена	2			1
7	Углеродные трубчатые материалы	2			1
8	Экспериментальные методы получения и диагностика нанотрубок	4			1
9	Применение производных графена	2			1
10	Слоистые полупроводники, гетероструктуры и полупроводниковые сверхрешетки	2			1
11	Полупроводниковые лазеры	2			2
12	Коллоидные квантовые точки	2			3
Итого часов		30			15
Подготовка к экзамену		0 час.			

Общая трудоёмкость	45 час., 1 зач.ед.
--------------------	--------------------

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

Семестр: 7 (Осенний)

##### 1. Виды и классификация наноструктурных материалов

Виды и классификация наноструктурных материалов. Наноструктурные объекты различной размерности и химическая связь. Роль квантовых эффектов электронного обмена. Краткий обзор методов расчета электронной структуры молекул. Адиабатическое приближение. Краткое введение в теорию электронного строения кристаллов. Обзор методов расчета электронной зонной структуры. Метод сильной связи и его применение для углеродных структур.

##### 2. Спинтроника и магнитные эффекты в наноструктурных материалах

Связь между электронным строением и магнитными эффектами (диамагнетизмом, парамагнетизмом и магнитное упорядочением). Гамильтониан Гейзенберга-Дирака-Ван Флека. Парамагнетизм Паули и Ван-Флэка, диамагнетизм Ландау. Механизмы магнитного упорядочения.

##### 3. Структурные формы углерода

Углерод и его аллотропные формы (графит и алмаз). Углеродные наноструктурные материалы: фуллерены, углеродные нанотрубки, наноалмазы, графен. Электронные оболочки углерода и основные формы химической связи ( $sp^2$  и  $sp^3$  гибридизация атомных орбиталей). Метод Хюккеля для углеродных структур ( $\sigma$  и  $\pi$  молекулярные орбитали). Молекулы фуллеренов  $C_{60}$  и  $C_{70}$  и особенности их электронного строения. Фуллерен  $C_{60}$  как псевдоатом икосаэдрической симметрии. Фуллериты и фуллериды. Фазовые переходы, полимеризация, сверхпроводимость и переход металл-изолятор. Пиподы и эндофуллерены.

##### 4. Фуллерены

Экспериментальные методы получения и диагностика фуллеренов.

##### 5. Графен

Графен как фундаментальная углеродная структура, обладающая двумерной трансляционной симметрией. Однолистный графен: зонная структура, циклотронная масса, плотность состояний, дираковские фермионы и хиральное туннелирование. Двулистный и многолистный графен, «стопки» графеновых плоскостей.

##### 6. Экспериментальные методы получения и диагностика графена

Экспериментальные методы получения и диагностика графена. Поверхностные состояния в графене. Макромолекулы из графена. Край графена (типа «зигзаг» и «кресло»). Спектр полосок графена, эффект спин-орбитального взаимодействия. Графен в магнитном поле: диамагнетизм и эффект Холла.

##### 7. Углеродные трубчатые материалы

Углеродные трубчатые материалы (углеродные нанотрубки, УНТ). Однослойные и многослойные трубки. Получение электронного спектра однослойных нанотрубок из электронного спектра графена. Одностенные УНТ типа «зигзаг» и «кресло». Хиральные УНТ. Металлические и полупроводниковые УНТ. Минищели в электронном спектре.

#### 8. Экспериментальные методы получения и диагностика нанотрубок

Экспериментальные методы получения и диагностика нанотрубок. Электронные уровни в коротких нанотрубках – квантовых точках. Металлический нанопровод внутри УНТ – наностержень. Гетероатомные нанотрубки – боразотные (BN), и другие (SiC/BN, BC<sub>2</sub>N, GaAs, AlN). Модификация электронных свойств нанотрубки путем изменения ее геометрии (изгиб, Y- и T-образы соединения УНТ) и методом ее легирования азотом, бором и кислородом. Нанотрубки для электроники (диод, транзистор). Энергии оптических переходов металлических нанотрубок. Нанопровода и наностержни (ZnO).

#### 9. Применение производных графена

Технологические применения углеродных нанотрубок и графена.

#### 10. Слоистые полупроводники, гетероструктуры и полупроводниковые сверхрешетки

Слоистые полупроводники, гетероструктуры и полупроводниковые сверхрешетки. Классические гетероструктуры. Фундаментальные физические явления в гетероструктурах. Квантовые ямы и квантовый конфаймент. Типы полупроводниковых сверхрешеток. Гетероструктуры с квантовыми точками и сверхрешетками. Гетероструктуры с квантовыми проволоками и квантовыми точками.

#### 11. Полупроводниковые лазеры

Полупроводниковые лазеры и квантовый каскадный лазер ККЛ (QCL). Инверсная заселенность в ККЛ и каскадные процессы. Области инжекции электронов и активные зоны. Особенности конструкций ККЛ, использование гребневых волноводов. Основные типы ККЛ: лазер Фабри-Перо, лазер с распределенной обратной связью РОС (DFB – distributed feedback laser), лазер с внешним резонатором. Терагерцовые ККЛ. Основные достоинства и применение ККЛ.

#### 12. Коллоидные квантовые точки

Коллоидные квантовые точки как новый класс люминофоров. Квантово-размерный эффект. Многоэкситонная генерация. Эффект мерцания люминесценции. Химические методы синтеза квантовых точек. Применение квантовых точек в солнечных батареях, фотодетекторах, светодиодах, лазерах и хемосенсорах.

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

аудитория, снабженная доской, проектором и экраном.

### 6.Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Механика и молекулярная физика [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Л. Д. Ландау, А. И. Ахиезер, Е. М. Лифшиц .— 4-е изд. — Долгопрудный : Интеллект, 2014 .— 400 с.

#### Дополнительная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 10 : Физическая кинетика : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 2-е изд., испр. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2007 .— 536 с.

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

Не используются

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

не предусмотрены.

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

Студент, прослушавший курс, должен овладеть теоретической базой квантовой химии. Успешное освоение курса требует самостоятельной работы студента до 5 часов в неделю.

Самостоятельная работа включает в себя:

- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе);
- чтение и конспектирование дополнительной литературы;
- подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях;
- подготовку к дифференцированному зачету.

Руководство и контроль самостоятельной работы студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

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

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики департамент химии
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	А.В. Николаев, д-р 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-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика наноразмерных объектов» обучающийся должен:

### знать:

- виды и классификацию наноструктурированных материалов;
- связь между электронным строением и магнитными эффектами;
- типы полупроводниковых сверхрешеток.

### уметь:

- определять тип кристаллической решетки.

### владеть:

- знаниями о слоистых полупроводниках, гетероструктурах.

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

С целью текущего контроля успеваемости предусмотрен краткий опрос по теме предыдущих занятий.

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

1. Виды и классификация наноструктурных материалов.
2. Наноструктурные объекты различной размерности и химическая связь.
3. Роль квантовых эффектов электронного обмена.
4. Метод сильной связи и его применение для углеродных структур.
5. Спинтроника и магнитные эффекты в наноструктурных материалах.
6. Связь между электронным строением и магнитными эффектами (диамагнетизмом, парамагнетизмом и магнитное упорядочением).
7. Гамильтониан Гейзенберга-Дирака-Ван Флека.
8. Парамагнетизм Паули и Ван-Флэка, диамагнетизм Ландау.
9. Механизмы магнитного упорядочения.
10. Углерод и его аллотропные формы (графит и алмаз).
11. Углеродные наноструктурные материалы: фуллерены, углеродные нанотрубки, наноалмазы, графен.
12. Электронные оболочки углерода и основные формы химической связи ( $sp^2$  и  $sp^3$  гибридизация атомных орбиталей).
13. Метод Хюккеля для углеродных структур.
14. Молекулы фуллеренов  $C_{60}$  и  $C_{70}$  и особенности их электронного строения. Фуллерен  $C_{60}$  как псевдоатом икосаэдрической симметрии.
15. Фуллериты и фуллериды.
16. Фазовые переходы, полимеризация, сверхпроводимость и переход металл-изолятор. Пиподы и эндофуллерены.



17. Экспериментальные методы получения и диагностика фуллеренов.
18. Графен как фундаментальная углеродная структура, обладающая двумерной трансляционной симметрией.
19. Однолистный графен: зонная структура, циклотронная масса, плотность состояний, дираковские фермионы и хиральное туннелирование.
20. Двухлистный и многolistный графен, «стопки» графеновых плоскостей.
21. Экспериментальные методы получения и диагностика графена.
22. Поверхностные состояния в графене. Макромолекулы из графена. Край графена (типа «зигзаг» и «кресло»).
23. Спектр полосок графена, эффект спин-орбитального взаимодействия. Графен в магнитном поле: диамагнетизм и эффект Холла.
24. Углеродные трубчатые материалы (углеродные нанотрубки, УНТ). Однослойные и многослойные трубки. Получение электронного спектра однослойных нанотрубок из электронного спектра графена.
25. Одностенные УНТ типа «зигзаг» и «кресло». Хиральные УНТ. Металлические и полупроводниковые УНТ. Минищели в электронном спектре.
26. Экспериментальные методы получения и диагностика нанотрубок.
27. Электронные уровни в коротких нанотрубках – квантовых точках. Металлический нанопровод внутри УНТ – наностержень.
28. Гетероатомные нанотрубки – боразотные (BN), и другие (SiC/BN, BC<sub>2</sub>N, GaAs, AlN). Модификация электронных свойств нанотрубки путем изменения ее геометрии (изгиб, Y- и T-образы соединения УНТ) и методом ее легирования азотом, бором и кислородом.
29. Нанотрубки для электроники (диод, транзистор). Энергии оптических переходов металлических нанотрубок. Нанопровода и наностержни (ZnO).
30. Технологические применения углеродных нанотрубок и графена.
31. Слоистые полупроводники, гетероструктуры и полупроводниковые сверхрешетки. Классические гетероструктуры. Фундаментальные физические явления в гетероструктурах. Квантовые ямы и квантовый конфаймент. Типы полупроводниковых сверхрешеток.
32. Гетероструктуры с квантовыми точками и сверхрешетками. Гетероструктуры с квантовыми проволоками и квантовыми точками.
33. Полупроводниковые лазеры и квантовый каскадный лазер ККЛ (QCL). Инверсная заселенность в ККЛ и каскадные процессы. Области инжекции электронов и активные зоны.
34. Особенности конструкций ККЛ, использование гребневых волноводов. Основные типы ККЛ: лазер Фабри-Перо, лазер с распределенной обратной связью РОС (DFB – distributed feedback laser), лазер с внешним резонатором. Терагерцовые ККЛ. Основные достоинства и применение ККЛ.
35. Коллоидные квантовые точки как новый класс люминофоров. Квантово-размерный эффект. Многоэкситонная генерация. Эффект мерцания люминесценции.
36. Химические методы синтеза квантовых точек. Применение квантовых точек в солнечных батареях, фотодетекторах, светодиодах, лазерах и хемосенсорах.

#### 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**

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