

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, СПИНТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ МИКРО- И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО НТС ИНТЭЛ

Протокол № 4

от 23.07.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
ФИЗИКА МИКРО- И НАНОСИСТЕМ (ЧАСТЬ 1)

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

| Семестр | Трудоемкость,<br>кред. | Общий объем<br>курса, час. | Лекции, час. | Практич.<br>занятия, час. | Лаборат. работы,<br>час. | В форме<br>практической<br>подготовки/ В | СРС, час. | КСР, час. | Форма(ы)<br>контроля,<br>экз./зач./КР/КП |
|---------|------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------------|-----------|-----------|------------------------------------------|
| 7       | 3                      | 108                        | 24           | 24                        | 0                        |                                          | 24        | 0         | Э                                        |
| Итого   | 3                      | 108                        | 24           | 24                        | 0                        | 0                                        | 24        | 0         |                                          |

## АННОТАЦИЯ

Учебная задача курса - дать основные представления о физических процессах, происходящих в микро- и наносистемах различной размерности.

Курс состоит из следующих основных частей: квантование энергетических уровней в одномерных потенциальных ямах, эффект размерного квантования, - современные методы получения наноструктур, методы диагностики и характеристики наноструктур, применение наноструктур

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения учебной дисциплины является получение знаний, необходимых для успешной профессиональной деятельности в области исследований, разработок и технологий, направленных на создание функционализированных нано- и микрообъектов, понимание процессов, происходящих в области нанопотоники, физики нанообъектов и конденсированного состояния вещества и управление процессами на наноуровне.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Программа подготовки нацелена на изучение физики микро-и наносистем, включающей физику твердого тела, ядерную физику, нанопотонику, физику органических и биоорганических наносистем, компьютерные методы моделирования наноструктур, специальных аналитических систем детектирования.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

| Код и наименование компетенции | Код и наименование индикатора достижения компетенции |
|--------------------------------|------------------------------------------------------|
|--------------------------------|------------------------------------------------------|

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

| Задача профессиональной деятельности (ЗПД)                                                     | Объект или область знания                                                          | Код и наименование профессиональной компетенции;<br>Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта) | Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| научно-исследовательский                                                                       |                                                                                    |                                                                                                            |                                                                                                               |
| математическое моделирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального | электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, математические | ПК-8.1 [1] - Способен применять методы и концепции экспериментальной физики конденсированного              | З-ПК-8.1[1] - законы и экспериментальные методы физики конденсированного состояния вещества, лазерной физики, |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>назначения на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования; участие в планировании и проведении экспериментов по заданной методике, обработка результатов с применением современных информационных технологий и технических средств; анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования; участие в подготовке и подаче заявок по перспективным проектам, грантам в рамках проводимых открытых конкурсов</p> | <p>модели</p>                                                                                    | <p>состояния вещества, лазерной физики, фотоники, физики микро- и наносистем для решения технических, технологических и функциональных проблем при создании и эксплуатации элементов и устройств, функционирующих на принципах нанoeлектроники и нанофотоники</p> <p><i>Основание:</i><br/>Профессиональный стандарт: 40.011</p> | <p>физики микро- и наносистем, принципы функционирования элементов и устройств фотоники и оптоэлектроники; У-ПК-8.1[1] - анализировать научно-техническую проблему, поставленную задачу в области нанофотоники, физики конденсированного состояния вещества, физики наноструктур, используя отечественный и зарубежный опыт, а также предлагать возможные пути ее решения; В-ПК-8.1[1] - навыками экспериментальной работы на специализированном научном оборудовании и устройствах в области фотоники, физики наноструктур, лазерной физики, опто- и нанoeлектроники, математического моделирования процессов и объектов применительно к поставленной задаче</p> |
| <p>математическое моделирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования; участие в планировании и</p>                                                                                                                                                                                                                                                                    | <p>электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, математические модели</p> | <p>ПК-8.3 [1] - Способен определять условия и границы применения существующего исследовательского и технологического оборудования при разработке устройств нанофотоники, опто- и нанoeлектроники и усовершенствовать действующие методы</p>                                                                                      | <p>3-ПК-8.3[1] - современные технологии и методы физики микро- и наносистем, нанофотоники, нанoeлектроники применительно к разработке новых устройств в предметной области; У-ПК-8.3[1] -</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>проведении экспериментов по заданной методике, обработка результатов с применением современных информационных технологий и технических средств; анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования; участие в подготовке и подаче заявок по перспективным проектам, грантам в рамках проводимых открытых конкурсов</p>                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                            | <p>исследования наноструктур</p> <p><i>Основание:</i><br/>Профессиональный стандарт: 40.104</p>                                                                                                                        | <p>применять теоретические знания, методы и концепции физики конденсированных сред, физики микро- и наносистем, фотоники в части решения задач нанофотоники, нано- и оптоэлектроники; В-ПК-8.3[1] - навыками работы на исследовательском и технологическом оборудовании, применяемом при создании и исследовании параметров приборов на основе принципов фотоники, нанофотоники и оптоэлектроники</p> |
| производственно-технологический                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <p>внедрение результатов исследований и разработок в производство; выполнение работ по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники; проведение технологических процессов производства материалов и изделий электронной техники; контроль за соблюдением технологической дисциплины и приемов энерго- и ресурсосбережения; подготовка документации и участие в работе системы менеджмента качества на предприятии;</p> | <p>материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования, технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, алгоритмы решения типовых задач</p> | <p>ПК-10 [1] - Способен к модернизации существующих и внедрению новых методов и оборудования для измерений параметров наноматериалов и наноструктур</p> <p><i>Основание:</i><br/>Профессиональный стандарт: 29.007</p> | <p>З-ПК-10[1] - Знание физических основ современных микро- и нанотехнологий, технологий гетероструктурной и СВЧ-электроники.; У-ПК-10[1] - Умение творчески применять современное оборудование для измерений параметров наноматериалов и наноструктур; В-ПК-10[1] - Владение методами измерений параметров наноматериалов и наноструктур</p>                                                          |

|                                                                                                               |  |  |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
| организация<br>метрологического<br>обеспечения<br>производства<br>материалов и изделий<br>электронной техники |  |  |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

| Направления/цели воспитания | Задачи воспитания (код)                                                                                                                                                                                      | Воспитательный потенциал дисциплин                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (B18)                                                         | Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования у студентов ответственности за свое профессиональное развитие посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (B19) | 1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для:<br>- формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для:<br>- формирования способности отделять настоящие научные |

|                             |                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             |                                                                                                         | <p>исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед;</p> <p>- формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование навыков коммуникации, командной работы и лидерства (B20) | <p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для развития навыков коммуникации, командной работы и лидерства, творческого инженерного мышления, стремления следовать в профессиональной деятельности нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер трудовой деятельности и неслужебного поведения, ответственности за принятые решения через подготовку групповых курсовых работ и практических заданий, решение кейсов, прохождение практик и подготовку ВКР.</p> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для: - формирования производственного коллективизма в ходе совместного решения как модельных, так и практических задач, а также путем подкрепление рационально-технологических навыков взаимодействия в проектной деятельности эмоциональным эффектом успешного взаимодействия, ощущением роста общей эффективности при распределении проектных задач в соответствии с</p> |

|                             |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             |                                                                                                                                                                  | сильными компетентностными и эмоциональными свойствами членов проектной группы.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (B22) | <p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для развития навыков коммуникации, командной работы и лидерства, творческого инженерного мышления, стремления следовать в профессиональной деятельности нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер трудовой деятельности и неслужебного поведения, ответственности за принятые решения через подготовку групповых курсовых работ и практических заданий, решение кейсов, прохождение практик и подготовку ВКР.</p> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для: - формирования производственного коллективизма в ходе совместного решения как модельных, так и практических задач, а также путем подкрепление рационально-технологических навыков взаимодействия в проектной деятельности эмоциональным эффектом успешного взаимодействия, ощущением роста общей эффективности при распределении проектных задач в соответствии с сильными компетентностными и эмоциональными свойствами членов проектной группы.</p> |
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование коммуникативных навыков в области разработки и производства полупроводниковых изделий (B36)                       | <p>1.Использование воспитательного потенциала профильных дисциплин «Введение в специальность», «Введение в технику физического эксперимента», «Измерения в микро- и нанoeлектронике»,</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

|  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <p>«Информационные технологии в физических исследованиях», «Экспериментальная учебно-исследовательская работа» для:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- формирования навыков безусловного выполнения всех норм безопасности на рабочем месте, соблюдении мер предосторожности при выполнении исследовательских и производственных задач с опасными веществами и на оборудовании полупроводниковой промышленности, а также в помещениях с высоким классом чистоты посредством привлечения действующих специалистов</li> <li>полупроводниковой промышленности к реализации учебных дисциплин и сопровождению проводимых у студентов практических работ в этих организациях, через выполнение студентами практических и лабораторных работ, в том числе с использованием современных САПРов для моделирования компонентной базы электроники, измерительного и технологического оборудования на кафедрах, лабораториях и центрах ИНТЭЛ;</li> </ul> <p>2.Использование воспитательного потенциала профильных дисциплин «Спецпрактикум по физике наносистем», «Спецпрактикум по нанотехнологиям», «Специальный практикум по физике наносистем», «Современные проблемы физики конденсированных сред (спецсеминар)», «Экспериментальные методы исследования наноструктур (спецсеминар)», для: - формирования профессиональной коммуникации в научной среде;</p> |
|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



|  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <p>- формирования<br/>разностороннего мышления и<br/>тренировки готовности к работе<br/>в профессиональной и<br/>социальной средах<br/>полупроводниковой<br/>промышленности -<br/>формирования умений<br/>осуществлять самоанализ,<br/>осмысливать собственные<br/>профессиональные и<br/>личностные возможности для<br/>саморазвития и<br/>самообразования, в целях<br/>постоянного соответствия<br/>требованиям к эффективным и<br/>прогрессивным специалистом<br/>для разработок новых<br/>материалов и устройств по<br/>направлениям, связанным с<br/>СВЧ электроникой, микро- и<br/>нанопроцессорами,<br/>оптическими модуляторами и<br/>применением новых материалов<br/>в нанoeлектронных<br/>компонентах через<br/>организацию практикумов в<br/>организациях по разработке и<br/>производству<br/>полупроводниковых изделий,<br/>использование методов<br/>коллективных форм<br/>познавательной деятельности,<br/>ролевых заданий, командного<br/>выполнения учебных заданий и<br/>защиту их результатов.</p> |
|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

| №<br>п.п | Наименование<br>раздела учебной<br>дисциплины | Недели | Лекции/ Практик.<br>(семинары) /<br>Лабораторные<br>работы, час. | Обязат. текущий<br>контроль (форма*,<br>неделя) | Максимальный<br>балл за раздел** | Аттестация<br>раздела (форма*,<br>неделя) | Индикаторы<br>освоения<br>компетенции |
|----------|-----------------------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|
|----------|-----------------------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|

|   |                                             |      |         |  |    |       |                                                                                                               |
|---|---------------------------------------------|------|---------|--|----|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <i>7 Семестр</i>                            |      |         |  |    |       |                                                                                                               |
| 1 | Раздел 1                                    | 1-8  | 12/12/0 |  | 25 | КИ-8  | 3-ПК-8.1,<br>У-ПК-8.1,<br>В-ПК-8.1,<br>3-ПК-8.3,<br>У-ПК-8.3,<br>В-ПК-8.3                                     |
| 2 | Раздел 2                                    | 9-16 | 12/12/0 |  | 25 | КИ-16 | 3-ПК-10,<br>У-ПК-10,<br>В-ПК-10                                                                               |
|   | <i>Итого за 7 Семестр</i>                   |      | 24/24/0 |  | 50 |       |                                                                                                               |
|   | <b>Контрольные мероприятия за 7 Семестр</b> |      |         |  | 50 | Э     | 3-ПК-8.1,<br>У-ПК-8.1,<br>В-ПК-8.1,<br>3-ПК-8.3,<br>У-ПК-8.3,<br>В-ПК-8.3,<br>3-ПК-10,<br>У-ПК-10,<br>В-ПК-10 |

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

| Обозначение | Полное наименование |
|-------------|---------------------|
| КИ          | Контроль по итогам  |
| Э           | Экзамен             |

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

| Недели     | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                                          | Лек., час.             | Пр./сем., час. | Лаб., час. |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------|------------|
|            | <i>7 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                   | 24                     | 24             | 0          |
| <b>1-8</b> | <b>Раздел 1</b>                                                                                                                                                                                                                                                    | 12                     | 12             | 0          |
| 1          | <b>Тема 1</b><br>Длина волны Де Бройля. Эффект размерного квантования, классификация наноструктур. Основные понятия физики твердого тела. Кристаллическая структура, элементарная ячейка, понятие об обратной решетке.                                             | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                    | 2                      | 2              | 0          |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                    | Онлайн                 |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0                      | 0              | 0          |
| 2          | <b>Тема 2</b><br>Основные понятия физики твердого тела. Уравнение Шредингера в одноэлектронном приближении. Теорема Блоха. Энергетические зоны в кристалле и классификация веществ по типу проводимости (металл, полупроводник, диэлектрик). Модель сильной связи. | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                    | 2                      | 2              | 0          |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                    | Онлайн                 |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0                      | 0              | 0          |
| 3          | <b>Тема 3</b><br>Основные понятия физики твердого тела. Понятие дырки. Эффективная масса. Физический смысл эффективной                                                                                                                                             | Всего аудиторных часов |                |            |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                    | 2                      | 2              | 0          |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                    | Онлайн                 |                |            |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                        |    |   |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----|---|
|      | массы. Уравнение движения электрона во внешнем электрическом поле. Основные понятия физики твердого тела. Заполнение энергетических зон. Функция распределения и плотность состояний и функции распределения в 3D случае. Уровень ферми в металле и полупроводнике. Собственные и примесные полупроводники.                                             | 0                      | 0  | 0 |
| 4    | <b>Тема 4</b><br>Гетеропереход. Понятие гетероперехода, типы гетеропереходов. Условия сшивки волновой функции на гетерогранице. Уравнение для огибающей волновой функции. Искажение зонной структуры вблизи гетерограниц. Область объемного заряда, ее масштаб. Энергетический спектр электронов прямоугольной потенциальной ямы различной размерности. | Всего аудиторных часов |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3                      | 3  | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Онлайн                 |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0                      | 0  | 0 |
| 5    | <b>Тема 5</b><br>Энергетический спектр в цилиндрической и сферической потенциальных ямах. Экситоны в наноструктурах. Плотность состояний в системах пониженной размерности (2D, 1D, 0D случаи).                                                                                                                                                         | Всего аудиторных часов |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3                      | 3  | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Онлайн                 |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0                      | 0  | 0 |
| 9-16 | <b>Раздел 2</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 12                     | 12 | 0 |
| 6    | <b>Тема 6</b><br>Сверхрешетки. Особенности энергетического спектра. Метод сильной связи. Задача Кронига-Пенни. Некоторые методы исследования наноструктур. Электронная и атомно-силовая микроскопия. Основы технологии создания наноструктур. Молекулярно-лучевая эпитаксия, газофазная эпитаксия, литография.                                          | Всего аудиторных часов |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2                      | 2  | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Онлайн                 |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0                      | 0  | 0 |
| 7    | <b>Тема 7</b><br>Поглощение и испускание света полупроводниками. Прямозонные и непрямозонные полупроводники.                                                                                                                                                                                                                                            | Всего аудиторных часов |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2                      | 2  | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Онлайн                 |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0                      | 0  | 0 |
| 8    | <b>Тема 8</b><br>Использование гетероструктур в технологии полупроводниковых лазеров.                                                                                                                                                                                                                                                                   | Всего аудиторных часов |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2                      | 2  | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Онлайн                 |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0                      | 0  | 0 |
| 9    | <b>Тема 9</b><br>Применение полупроводниковых наноструктур микроэлектронике. Использование гетероструктур в технологии фотодетекторов. Фотодетекторы ИК диапазона на множественных квантовых ямах.                                                                                                                                                      | Всего аудиторных часов |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2                      | 2  | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Онлайн                 |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0                      | 0  | 0 |
| 10   | <b>Тема 10</b><br>Применение полупроводниковых наноструктур микроэлектронике. Резонансное туннелирование.                                                                                                                                                                                                                                               | Всего аудиторных часов |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2                      | 2  | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Онлайн                 |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0                      | 0  | 0 |
| 11   | <b>Тема 11</b><br>Применение полупроводниковых наноструктур микроэлектронике. Полевые транзисторы. Транзистор с плавающим затвором.                                                                                                                                                                                                                     | Всего аудиторных часов |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2                      | 2  | 0 |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Онлайн                 |    |   |
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0                      | 0  | 0 |

Сокращенные наименования онлайн опций:

| Обозначение | Полное наименование              |
|-------------|----------------------------------|
| ЭК          | Электронный курс                 |
| ПМ          | Полнотекстовый материал          |
| ПЛ          | Полнотекстовые лекции            |
| ВМ          | Видео-материалы                  |
| АМ          | Аудио-материалы                  |
| Прз         | Презентации                      |
| Т           | Тесты                            |
| ЭСМ         | Электронные справочные материалы |
| ИС          | Интерактивный сайт               |

## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

| Недели | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | <i>7 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|        | <b>Тема1</b><br>Длина волны Де Бройля. Эффект размерного квантования, классификация наноструктур. Основные понятия физики твердого тела. Кристаллическая структура, элементарная ячейка, понятие об обратной решетке.                                                                                                                                                                                                             |
|        | <b>Тема2</b><br>Основные понятия физики твердого тела. Уравнение Шредингера в одноэлектронном приближении. Теорема Блоха. Энергетические зоны в кристалле и классификация веществ по типу проводимости (металл, полупроводник, диэлектрик). Модель сильной связи.                                                                                                                                                                 |
|        | <b>Тема3</b><br>Основные понятия физики твердого тела. Понятие дырки. Эффективная масса. Физический смысл эффективной массы. Уравнение движения электрона во внешнем электрическом поле. Основные понятия физики твердого тела. Заполнение энергетических зон. Функция распределения и плотность состояний и функции распределения в 3D случае. Уровень ферми в металле и полупроводнике. Собственные и примесные полупроводники. |
|        | <b>Тема4</b><br>Гетеропереход. Понятие гетероперехода, типы гетеропереходов. Условия сшивки волновой функции на гетерогранице. Уравнение для огибающей волновой функции. Искажение зонной структуры вблизи гетерограниц. Область объемного заряда, ее масштаб. Энергетический спектр электронов прямоугольной потенциальной ямы различной размерности.                                                                            |
|        | <b>Тема5</b><br>Энергетический спектр в цилиндрической и сферической потенциальных ямах. Экситоны в наноструктурах. Плотность состояний в системах пониженной размерности (2D, 1D, 0D случаи).                                                                                                                                                                                                                                    |
|        | <b>Тема6</b><br>Сверхрешетки. Особенности энергетического спектра. Метод сильной связи. Задача Кронига-Пенни. Некоторые методы исследования наноструктур. Электронная и атомно-силовая микроскопия. Основы технологии создания наноструктур. Молекулярно-лучевая эпитаксия, газофазная эпитаксия, литография.                                                                                                                     |
|        | <b>Тема7</b><br>Поглощение и испускание света полупроводниками. Прямозонные и непрямозонные полупроводники.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|        | <b>Тема8</b><br>Использование гетероструктур в технологии полупроводниковых лазеров.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

|  |                                                                                                                                                                                                   |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <b>Тема9</b><br>Применение полупроводниковых наноструктур микроэлектронике. Использование гетероструктур в технологии фотодетекторов. Фотодетекторы ИК диапазона на множественных квантовых ямах. |
|  | <b>Тема10</b><br>Применение полупроводниковых наноструктур микроэлектронике. Резонансное туннелированные.                                                                                         |
|  | <b>Тема11</b><br>Применение полупроводниковых наноструктур микроэлектронике. Полевые транзисторы. Транзистор с плавающим затвором.                                                                |

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При проведении лекций используются наглядные формы демонстрации учебного материала в виде презентаций, а также выступление ученых, занимающихся исследованиями в области физики микро- и наносистем. Студенты в обязательном порядке посещают лекции ведущих мировых ученых на тему физики наносистем. Проведение семинаров предусматривает проведение дискуссий и выступления студентов с докладами на темы, связанные с физикой и технологией наносистем.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

| Компетенция | Индикаторы освоения | Аттестационное мероприятие (КП 1) |
|-------------|---------------------|-----------------------------------|
| ПК-10       | З-ПК-10             | Э, КИ-16                          |
|             | У-ПК-10             | Э, КИ-16                          |
|             | В-ПК-10             | Э, КИ-16                          |
| ПК-8.1      | З-ПК-8.1            | Э, КИ-8                           |
|             | У-ПК-8.1            | Э, КИ-8                           |
|             | В-ПК-8.1            | Э, КИ-8                           |
| ПК-8.3      | З-ПК-8.3            | Э, КИ-8                           |
|             | У-ПК-8.3            | Э, КИ-8                           |
|             | В-ПК-8.3            | Э, КИ-8                           |

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

| Сумма баллов | Оценка по 4-ех балльной шкале | Оценка ECTS | Требования к уровню освоению учебной дисциплины                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 90-100       | 5 – «отлично»                 | A           | Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.                                     |
| 85-89        | 4 – «хорошо»                  | B           | Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.                                                                                                                                         |
| 75-84        |                               | C           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 70-74        |                               | D           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 65-69        | 3 – «удовлетворительно»       | E           | Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.                                        |
| 60-64        |                               |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Ниже 60      | 2 – «неудовлетворительно»     | F           | Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине. |

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ П 85 Наноматериалы и нанотехнологии : учебное пособие, Ганзуленко О. Ю. [и др.], Санкт-Петербург: Лань, 2022
2. ЭИ К 49 Наноплазмоника : учебное пособие, Климов В. В., Москва: Физматлит, 2010
3. 537 3-43 Принципы лазеров : , Звелто О., Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2008
4. 620 Д93 Углеродные нанотрубки : строение, свойства, применения, Дьячков П.Н., Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2006
5. ЭИ Ш 18 Физика полупроводников : учебное пособие, Шалимова К. В., Санкт-Петербург: Лань, 2022
6. ЭИ П 49 Физико-химические основы нанотехнологий : учебник, Поленов Ю. В., Егорова Е. В., Санкт-Петербург: Лань, 2022

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Киттель Ч., М.: МедиаСтар, 2006
2. 541.5 Т88 Молекулярная фотохимия : , Турро Н., Москва: Мир, 1967

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

### **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

1. Образцы фотонных кристаллов (Э-205)
2. Образцы пористого кремния (Э-205)
3. Образцы полупроводниковых коллоидных квантовых точек (Э-205)
4. Демонстрационный проектор

### **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

При изучении курса студент должен освоить основные знания о строении, энергетической структуре и оптических свойствах полупроводниковых, органических и металлических нано- и микроструктур, а также иметь представление о методах создания наноструктур и областях их практического применения.

Курс рассчитан на два семестра. Темы первого семестра в основной своей массе посвящены изучению общих сведений о строении и энергетической структуре нано- и микро систем. Темы второго семестра более подробно знакомят студентов с конкретными классами нанообъектов и специфическими свойствами.

При изучении тем 1-5 студент должен познакомиться с классом углеродных наноструктур. Иметь четкое представление о структуре УНТ, фуллеренов и графена, методах их получения и областях практического применения. Знать определение молекулярной орбитали и основных приближений положенных в основу метода ЛКАО. Овладеть основами расчета энергетической структуры УНТ различной хиральности. В качестве самостоятельной работы - решать задачи предложенные преподавателем.

В результате изучения темы 6 студент должен познакомиться с понятием пористых наноструктур в частности с пористым кремнием (ПК). Студенту следует усвоить основные свойства ПК, иметь четкое представление о методах его изготовления и природе его люминесценции. В качестве самостоятельной работы - решать задачи предложенные преподавателем.

При изучении тем 7-9 студент должен четко усвоить понятия фотонного кристалла, Брэгговской решетки и микрорезонатора. Также следует обратить особое внимание на понимание таких понятий как запрещенная фотонная зона и плотность фотонных состояний. С практической точки зрения студент должен освоить методы расчета отражения и пропускания многослойной структуры с использованием метода матрицы передачи. В качестве самостоятельной работы - решать задачи предложенные преподавателем.

Тема 10 посвящена процессам переноса энергии на наномасштабе. При ее изучении студент должен усвоить понятия излучательного и безызлучательного переноса энергии. Понимать природу и условия протекания механизмов переноса энергии по Ферстеру и по Декстеру. Знать примеры практического использования перечисленных явлений. В качестве самостоятельной работы - решать задачи предложенные преподавателем.

В результате изучения темы 11 студент должен иметь четкое представление о методах получения коллоидных полупроводниковых квантовых точек (КТ) их структуре и энергетическом спектре. Уметь оценивать длину волны излучения КТ, зная их размер и вещество из которого они синтезированы. Знать примеры практического применения КТ. В качестве самостоятельной работы - решать задачи предложенные преподавателем.

В результате изучения темы 12 студент должен иметь четкое представление о явлении плазмонного резонанса. Знать классификацию плазмонов и иметь четкое представление об оптических свойствах металлических нанокристаллов. В качестве самостоятельной работы - решать задачи предложенные преподавателем.

## **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

При изложении первого раздела необходимо учитывать, что основные принципы квантовой механики студентами 3-го курса усваиваются обычно достаточно формально. Поэтому необходимо повторение в общих чертах принципов квантовой механики: операторов физических величин, принципа неопределенности, уравнения Шредингера. С методами решения уравнения Шредингера для одномерных потенциальных ям студенты знакомы достаточно хорошо. Поэтому этот раздел можно дать для самостоятельной проработки или в форме задач. Основное внимание нужно уделить физическим выводам из решения квантовомеханических уравнений. При этом важным является вопрос: при каких размерах наноструктур и температурах экспериментально проявляется эффект размерного квантования. Этот вопрос можно оформить в виде задачи, но нужно помнить, что ее решение возможно только с помощью преподавателя. Часть занятия интересно посвятить сферической потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Это – модель полупроводниковой сферической квантовой точки. Полномерное решение уравнения Шредингера для этого случая на 3-м курсе – невозможно, поскольку студенты не знакомы со специальными функциями. Решение возможно лишь для частного случая. Однако полезно познакомить студента с поведением частицы в центральном поле, где сохраняется момент количества движения, рассмотреть уравнения для квадрата момента, закон квантования момента и его проекции на произвольную ось.

Второй раздел посвящен изложению современных методов получения наноструктур. Здесь необходимо рассмотреть методы коллоидной химии, молекулярно-лучевой эпитаксии и др. Однако, с методической точки зрения особое место занимает метод термического напыления. Действительно, изложение этого метода позволяет вспомнить и существенно дополнить знания студента по вакуумной технике. Знания по молекулярной физике в объеме



курса общей физики позволяет студентам решать задачи, которые достаточно глубоко проясняют сущность метода и позволяют провести практически важные оценки и расчеты. Здесь уместно познакомить студентов с методом лазерного напыления, который активно развивается в современной науке. Отдельного рассмотрения требуют методы получения наночастиц со свойствами плазмонного резонанса. Эффекты плазмонного резонанса можно изложить на основании элементарной теории дисперсии для плазмы.

Методы диагностики и характеристики наноструктур. Этот раздел дает возможность познакомить студентов с современной микроскопией, - электронной и атомно-силовой. При изложении метода интерференционной микроскопии полезно вспомнить общие принципы оптической интерферометрии, устройства наиболее популярных интерферометров. В этом разделе следует изложить пьезоэффект, который не рассматривается достаточно подробно ни в курсе общей физики, ни в физике твердого тела. На основе этих знаний можно излагать технику микроподач в интерферометрии, атомно-силовой микроскопии, лазерной техники.

Последний раздел курса – применение наноструктур. Рекомендуется его тесно увязать с другими курсами, которые читаются на кафедре. Например, можно подробно изложить применения полупроводниковых квантовых точек в современной органической оптоэлектронике, при разработке фотовольтаических элементов и светодиодов, а также в медицинской диагностике. Важно также рассмотреть применения наноструктур в современных методах анализа, при разработке сенсоров и т.п.

Самостоятельная работа студентов включает решение задач, предложенных преподавателем на лекциях.

Автор(ы):

Мартынов Игорь Леонидович, к.ф.-м.н.