

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 КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

ОДОБРЕНО  
НТС ИНТЭЛ Протокол №4 от 23.07.2024 г.

### РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

#### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА НАНОСИСТЕМ

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 03.03.01 Прикладные математика и физика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	KCP, час.	Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП
6	2	72	15	30	0		27	0	3
Итого	2	72	15	30	0	10	27	0	

## **АННОТАЦИЯ**

В рамках настоящей дисциплины даются начальные сведения оnanoструктурах различного типа, при этом основное внимание уделяется их электронным характеристикам, поскольку именно уникальные электронные свойства nanoструктур делают их перспективными объектами для применения в наноэлектронике, квантовой информатике и пр.

### **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Цели освоения учебной дисциплины состоят в том, чтобы ввести студентов в круг понятий, представлений и моделей физических основ современной физики наносистем: квантовых ям, квантовых нитей, квантовых точек, углеродных нанотрубок, малых атомных кластеров. Главное внимание при этом уделяется полупроводниковым nanoструктурам: их основным характеристикам и области применения. Излагаются основы квантовых методов обработки информации с использованием nanoструктур.

Задачи дисциплины:

- ознакомление студентов с различными типами nanoструктур, их отличительными характеристиками и возможными областями применения;
- приобретение студентами знаний и навыков по оценке характеристик различных nanoструктур и их практическому использованию;
- получение и закрепление теоретических знаний в области физических явлений и процессов, лежащих в основе применения различных nanoструктур.

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

Изучение дисциплины базируется на компетенциях, сформированных у обучающихся в результате освоения следующих прослушанных ранее курсах: Квантовая механика, Численные методы в решении физических задач, Дифференциальные и интегральные уравнения, Теория функций комплексного переменного, Статистическая физика, Принципы физики конденсированных сред. Основные положения курса должны/могут быть использованы при изучении дисциплин: Физика полупроводников, Физика конденсированного состояния и т.д. Также, знание материалов данной дисциплины необходимо при выполнении курсового и дипломного проектирования, научно-исследовательской работы, а также для практической работы.

### **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	Объект или	Код и наименование	Код и наименование
--------	------------	--------------------	--------------------

<b>профессиональной деятельности (ЗПД)</b>	<b>область знания</b>	<b>профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)</b>	<b>индикатора достижения профессиональной компетенции</b>
<b>научно-исследовательский</b>			
Участие в проведении теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений, в проведении аналитических исследований в предметной области по профилю специализации	Природные и социальные явления и процессы	<p>ПК-4.2 [1] - Способен применять методы математической и теоретической физики, методы математического и компьютерного моделирования процессов в области физики конденсированных сред</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.044</p>	<p>З-ПК-4.2[1] - Знать методы математической и теоретической физики, методы математического и компьютерного моделирования процессов в области физики конденсированных сред;</p> <p>У-ПК-4.2[1] - Уметь применять методы математической и теоретической физики, методы математического и компьютерного моделирования процессов в области физики конденсированных сред;</p> <p>В-ПК-4.2[1] - Владеть методами математической и теоретической физики, методами математического и компьютерного моделирования процессов в области физики конденсированных сред</p>

#### **4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ**

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной ответственности за научно-	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования чувства личной

	технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (В17)	ответственности за достижение лидерства России в ведущих научно-технических секторах и фундаментальных исследованиях, обеспечивающих ее экономическое развитие и внешнюю безопасность, посредством контекстного обучения, обсуждения социальной и практической значимости результатов научных исследований и технологических разработок. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования социальной ответственности ученого за результаты исследований и их последствия, развития исследовательских качеств посредством выполнения учебно-исследовательских заданий, ориентированных на изучение и проверку научных фактов, критический анализ публикаций в профессиональной области, вовлечения в реальные междисциплинарные научно-исследовательские проекты.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (В19)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для: - 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: - формирования способности отделять настоящие научные


исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед;  
- формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытых и теорий.

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
<i>6 Семестр</i>							
1	Низкоразмерные физические системы. Основные сведения о полупроводниках.	1-8	8/15/0		25	КИ-8	З-ПК-4.2, У-ПК-4.2, В-ПК-4.2
2	Полупроводниковые наноструктуры: характеристики, получение, применение. Атомные кластеры.	9-15	7/15/0		25	КИ-15	З-ПК-4.2, У-ПК-4.2, В-ПК-4.2
<i>Итого за 6 Семестр</i>							
	<b>Контрольные мероприятия за 6 Семестр</b>		15/30/0		50	3	З-ПК-4.2, У-ПК-4.2, В-ПК-4.2

\* – 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
З	Зачет

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>6 Семестр</i>	15	30	0
<b>1-8</b>	<b>Низкоразмерные физические системы. Основные сведения о полупроводниках.</b>	8	15	0
1	<b>Введение. Низкоразмерные физические системы</b> Особенности электронных свойств одномерных систем. Особенности электронных свойств двумерных систем. Плотность состояний, поверхность Ферми и химический потенциал одномерного и двумерного свободного электронного газа.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	1 0	0
2	<b>Классификация твердых тел по электрической проводимости</b> Модель Друде для электрической проводимости твердых тел. Классификация твердых тел по проводимости. Металлы, полупроводники, диэлектрики.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	2 0	0
3	<b>Основные сведения о полупроводниках</b> Электронное строение полупроводников. Собственные и несобственные полупроводники. Химический потенциал полупроводников. Зависимость концентрации носителей от температуры в собственном полупроводнике. Собственная и примесная проводимость полупроводников.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	4 0	0
4 - 5	<b>Электронные состояния в полупроводниковыхnanoструктурах</b> Методы описания электронных состояний в nanoструктурах. Метод эффективной массы. Метод огибающих. Границные условия на границе раздела двух полупроводников.	Всего аудиторных часов 2 Онлайн 0	2 0	0
6 - 7	<b>Квантовые ямы</b> Энергетическая диаграмма полупроводниковой квантовой ямы. Энергетический спектр квантовой ямы. Зоны размерного квантования. Резонансно-туннельные диоды. Основные методы изготовления квантовых ям и области их применения.	Всего аудиторных часов 2 Онлайн 0	2 0	0
8	<b>Двумерный электронный газ</b> Потенциальная энергия электронов в двумерном электронном газе. Критерии существования двумерного электронного газа. Способы изготовления nanoструктур с двумерным электронным газом. Модуляционное легирование.	Всего аудиторных часов 1 Онлайн 0	4 0	0
<b>9-15</b>	<b>Полупроводниковые nanoструктуры: характеристики, получение, применение. Атомные кластеры.</b>	7	15	0
9 - 10	<b>Квантовые нити</b> Энергетический спектр полупроводниковой квантовой нити. Зоны размерного квантования. Баллистическая	Всего аудиторных часов 2 Онлайн	3 0	0

	проводимость квантовых нитей. Основные методы изготовления квантовых нитей и области их применения.	0	0	0
11 - 12	<b>Квантовые точки</b> Энергетический спектр квантовой точки. Кулоновское взаимодействие в квантовых точках. Основные методы изготовления квантовых точек и области их применения. Искусственные молекулы.	Всего аудиторных часов		
		2	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
13	<b>Углеродные нанотрубки</b> Структура и электрические свойства углеродных нанотрубок. Индексы хиральности. Практическое использование нанотрубок.	Всего аудиторных часов		
		1	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
14	<b>Атомные кластеры</b> Малые атомные кластеры. Метастабильные и неравновесные кластеры. Углеродные кластеры. Фуллерены.	Всего аудиторных часов		
		1	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
15	<b>Наноструктуры в квантовой информатике</b> Квантовые биты. Квантовые компьютеры на основе твердотельных наноструктур. Квантовые вычисления в системе туннельно-связанных квантовых точек. Однокубитные и двухкубитные операции. Квантовый параллелизм.	Всего аудиторных часов		
		1	3	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>6 Семестр</i>
1	<b>Расчет зависимости энергии Ферми от концентрации электронов, в одномерном и двумерном электронном газе</b> Расчет зависимости энергии Ферми от концентрации электронов, в одномерном и двумерном электронном газе
2	<b>Расчет зависимости удельной электрической проводимости от плотности электронных состояний на уровне Ферми</b> Расчет зависимости удельной электрической проводимости от плотности электронных состояний на уровне Ферми
3	<b>Вычисление химического потенциала примесного полупроводника</b> Вычисление химического потенциала примесного полупроводника
4	<b>Расчет температурной зависимости проводимости примесного полупроводника</b> Расчет температурной зависимости проводимости примесного полупроводника

5	<b>Решение уравнения Шредингера для системы из двух полупроводников с разными эффективными массами в приближении огибающей функции</b> Решение уравнения Шредингера для системы из двух полупроводников с разными эффективными массами в приближении огибающей функции
6 - 7	<b>Построение энергетической диаграммы полупроводниковой квантовой ямы</b> Построение энергетической диаграммы полупроводниковой квантовой ямы
8	<b>Расчет проводимости квантовой нити в баллистическом режиме</b> Расчет проводимости квантовой нити в баллистическом режиме
9 - 10	<b>Вычисление энергетического спектра квантовой точки с учетом межэлектронного взаимодействия</b> Вычисление энергетического спектра квантовой точки с учетом межэлектронного взаимодействия
11 - 12	<b>Расчет плотности состояний углеродных нанотрубок с разными индексами хиральности</b> Расчет плотности состояний углеродных нанотрубок с разными индексами хиральности
13 - 14	<b>Вычисление энергий связи атомов углерода в фуллеренах</b> Вычисление энергий связи атомов углерода в фуллеренах
15	<b>Построение таблиц истинности спиновых логических вентилей на основе квантовых точек</b> Построение таблиц истинности спиновых логических вентилей на основе квантовых точек
16	<b>Исследование эволюции двухкубитных состояний</b> Исследование эволюции двухкубитных состояний

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации программы дисциплины используются в обучении активные и интерактивные формы в виде лекций (с применением компьютерного проектора для иллюстраций сложных математических выкладок и графиков) и практических (семинарских) занятий.

Самостоятельная работа студентов подразумевает под собой проработку лекционного материала с использованием рекомендуемой литературы для подготовки к тестам.

При обсуждении тем лекционных и практических занятий используются: круглый стол (дискуссия), мозговой штурм (“брейнсторм”), case-study (ситуационный анализ).

При этом применяется презентативная форма подачи материала, обсуждаются последние научные достижения/публикации, в игровой форме рассказывается о работе с научной литературой.

## 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-4.2	З-ПК-4.2	3, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-4.2	3, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-4.2	3, КИ-8, КИ-15

### 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 иочно 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 твердо 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. 536 Д53 Введение в нанотеплофизику : , Дмитриев А.С., Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2015

2. ЭИ Л 72 Нанотехнологии в электронике. Введение в специальность : учебное пособие, Лозовский С. В., Лозовский В. Н., Санкт-Петербург: Лань, 2022

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

#### 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**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

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

Следует уделять больше внимания самостоятельной работе. В случае затруднений, возникающих при решении тех или иных из заданных на дом задач, рекомендуется обратиться к учебникам и задачникам, приведенным в списке литературы, и изучить данную тему более подробно. При подготовке к каждому занятию нужно обязательно повторить материал предыдущих лекций. Кроме того, весьма желательно повторить соответствующий материал из изученных ранее курсов.

Перед лекцией об одномерном и двумерном свободном электронном газе рекомендуется повторить раздел дисциплины «Принципы физики конденсированного состояния» о характеристиках трехмерного свободного электронного газа (плотность состояний, температурная зависимость химического потенциала и т.д.).

В разделе о двумерном электронном газе рекомендуется попытаться самостоятельно получить зависимость потенциальной энергии электрона от координаты в направлении оси роста полупроводниковой гетероструктуры. При этом нужно воспользоваться уравнениями электростатики для электрического потенциала и решить задачу о поле двойного заряженного слоя.

При изучении вольт-амперной характеристики резонансно-туннельного диода в разделе о квантовых нитях обратите внимание, что увеличение тока как функции напряжения происходит из-за того, что увеличивается количество электронов, для которых выполняется условие резонансного туннелирования.

В разделе о баллистической проводимости следует различать малое «измерительное» напряжение на квантовой нити и большое напряжение, прикладываемое к ней с целью

изменения положения подзон размерного квантования относительно энергии Ферми в контактах.

Перед лекцией об электронных состояниях в квантовых нитях, выращенных методом заращивания поверхности скола нужно освежить в памяти метод линейной комбинации атомных орбиталей.

В разделе об углеродных нанотрубках обратите внимание, что классификацию нанотрубок по типу хиральности можно дать различным образом – в зависимости от ориентации монослоя графена.

В разделе о квантовой информатике нужно уяснить, что квантовые объекты (например, электроны в квантовых точках) могут использоваться как для классических, так и для квантовых вычислений, то есть играть роль как битов, так и кубитов (квантовых битов).

При проведении на лекциях и семинарах текущего контроля в форме тестирования нужно особое внимание уделить темам, на вопросы по которым были даны неверные ответы: вернуться к ним и разобраться с непонятными местами. Если научно-исследовательская работа студента связана с направлением, для которого материала курса недостаточно, то рекомендуется изучить соответствующие темы по учебникам, приведенным в списке литературы по курсу.

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

Дисциплина рассчитана на студентов, предварительно изучивших дисциплины «Квантовая механика», «Статистическая физика» и «Физика твердого тела». Однако, как показывает практика преподавания, многие студенты усваивают упомянутые курсы не в полном объеме. Поэтому при изложении ключевых вопросов физикиnanoструктур имеет смысл напомнить студентам основные положения этих курсов.

В разделе об одномерном и двумерном электронном газе полезно сначала суммировать основные сведения об обычном трехмерном электронном газе (закон дисперсии, плотность состояний и т.д.).

Приступая к теме о полупроводниковых nanoструктурах нужно напомнить, что в электронном спектре кристаллов имеются разрешенные и запрещенные зоны, и что в полупроводниках отсутствует частично заполненная электронами зона.

В разделе о квантовых ямах полезно провести аналогию с одномерной квантовой ямой, рассмотренной в курсе квантовой механики.

В разделе о квантовых точках следует особо обратить внимание студентов на то, что эффект кулоновского отталкивания электронов сильнее проявляется не в маленьких, а в больших квантовых точках – вопреки интуитивному ожиданию.

В разделе об атомных кластерах нелишне отметить отсутствие общепринятой классификации кластеров по размерам (малые, средние, большие).

Рассказывая о нанотрубках, имеет смысл «на пальцах» продемонстрировать энергетическую выгодность образования нанотрубки при сворачивании слоя графена из-за образования новых ковалентных связей.

В разделе о квантовой информатике можно подробно рассказать об алгоритме Дойча.

Некоторые разделы курса можно несколько сократить, отдавая предпочтение физическому содержанию в ущерб математической строгости. Это касается, в частности, темы о двумерном электронном газе на границе раздела двух разных полупроводников.

Для ключевых терминов и понятий желательно на лекциях приводить английские термины (квантовые нити – quantum wires, квантовые точки – quantum dots, квантовые ямы – quantum wells и т.д.). Это в дальнейшем облегчит студентам самостоятельную работу с англоязычной научной литературой.

Автор(ы):

Катин Константин Петрович, к.ф.-м.н.

Маслов Михаил Михайлович, к.ф.-м.н.