

ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, СПИНТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ

КАФЕДРА ФИЗИКИ МИКРО- И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО НТС ИНТЭЛ

Протокол № 03/3-21

от 31.08.2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ НАНОСИСТЕМ**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 11.04.04 Электроника и наноэлектроника

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
2	2	72	5	0	25		42	0	3
Итого	2	72	5	0	25	0	42	0	

## АННОТАЦИЯ

Учебная задача курса «Специальный практикум по физике наносистем» дать основные представления о экспериментальных методах физики наноструктур и нанофотоники на примере конкретных лабораторных работ, выполняемых на современном научно-исследовательском оборудовании.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения учебной дисциплины «Специальный практикум по физике наносистем» является получение знаний, необходимых для проведения научных экспериментов в области создания наноструктурированных материалов, усвоение приемов и методов исследования и управления свойствами таких материалов, а также приобретение навыков обработки результатов физического эксперимента

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

Профессиональный модуль, дисциплина по выбору

### 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; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
разработка рабочих планов и программ проведения научных исследований и технических разработок, подготовка отдельных заданий для исполнителей; сбор, обработка, анализ и систематизация научно-технической	материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, математические модели	ПК-4 [1] - способен к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.008	З-ПК-4[1] - Знать: современные экспериментальные методы в области физики конденсированного состояния, электроники и наноэлектроники ; У-ПК-4[1] - Уметь: проводить экспериментальные

<p>информации по теме исследования, выбор методик и средств решения задачи; разработка методики, проведение исследований и измерений параметров и характеристик изделий электронной техники, анализ их результатов; использование физических эффектов при разработке новых методов исследований и изготовлении макетов измерительных систем; разработка физических и математических моделей, компьютерное моделирование исследуемых физических процессов, приборов, схем и устройств, относящихся к профессиональной сфере; подготовка научно-технических отчетов, обзоров, рефератов, публикаций по результатам выполненных исследований, подготовка и представление докладов на научные конференции и семинары; фиксация и защита объектов интеллектуальной собственности</p>			<p>исследования в электронике и нанoeлектронике с применением современных средств и методов.; В-ПК-4[1] - Владеть: компьютерными технологиями в применении к экспериментальным исследованиям в электронике и нанoeлектронике</p>
<p>работа в качестве преподавателя в образовательных</p>	<p>научно-педагогический материалы, компоненты, электронные</p>	<p>ПК-18 [1] - способен проводить лабораторные и</p>	<p>3-ПК-18[1] - Знать: учебные программы, необходимого</p>

<p>учреждениях среднего профессионального и высшего профессионального образования по учебным дисциплинам предметной области данного направления под руководством профессора, доцента или старшего преподавателя; участие в разработке учебно-методических материалов для студентов по дисциплинам предметной области данного направления; участие в модернизации или разработке новых лабораторных практикумов по дисциплинам профессионального цикла</p>	<p>приборы, устройства, установки, методы их исследования, математические модели, алгоритмы решения типовых задач, производственные технологии, нанотехнологии</p>	<p>практические занятия со студентами, руководить курсовым проектированием и выполнением выпускных квалификационных работ бакалавров</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>оборудования и техники безопасности при проведении лабораторных и практических занятий со студентами бакалавриата. ; У-ПК-18[1] - Уметь: руководить курсовым проектированием и выполнением выпускных квалификационных работ бакалавров.; В-ПК-18[1] - Владеть: навыками проведения лабораторных и практических занятий со студентами бакалавриата.</p>
<p>работа в качестве преподавателя в образовательных учреждениях среднего профессионального и высшего профессионального образования по учебным дисциплинам предметной области данного направления под руководством профессора, доцента или старшего преподавателя; участие в разработке учебно-методических материалов для студентов по дисциплинам предметной области</p>	<p>материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, математические модели, алгоритмы решения типовых задач, производственные технологии, нанотехнологии</p>	<p>ПК-19 [1] - способен овладевать навыками разработки учебно-методических материалов для студентов по отдельным видам учебных занятий</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>3-ПК-19[1] - Знать: учебно-методические комплексы отдельных преподаваемых дисциплин ; У-ПК-19[1] - Уметь: выделить необходимый для изучения материал и разработать критерии оценки знаний и умений студентов; В-ПК-19[1] - Владеть: навыками разработки учебно-методических материалов для студентов по отдельным видам учебных занятий</p>

данного направления; участие в модернизации или разработке новых лабораторных практикумов по дисциплинам профессионального цикла			
--	--	--	--

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практик. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>2 Семестр</i>						
1	Первый раздел	1-8	3/0/13		25	КИ-8	З-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, З-ПК-18, У-ПК-18, В-ПК-18
2	Второй раздел	9-15	2/0/12		25	КИ-15	З-ПК-19, У-ПК-19, В-ПК-19
	<i>Итого за 2 Семестр</i>		5/0/25		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 2 Семестр</b>				50	3	З-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, З-ПК-

							18, У- ПК- 18, В- ПК- 18, 3-ПК- 19, У- ПК- 19, В- ПК- 19
--	--	--	--	--	--	--	--

\* – 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

Неделя	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>2 Семестр</i>	5	0	25
<b>1-8</b>	<b>Первый раздел</b>	3	0	13
1	<b>Тема 1</b> Длина волны Де Бройля. Эффект размерного квантования, классификация наноструктур. Основные понятия физики твердого тела. Кристаллическая структура, элементарная ячейка, понятие об обратной решетке. Уравнение Шредингера в одноэлектронном приближении. Теорема Блоха. Энергетические зоны в кристалле и классификация веществ по типу проводимости (металл, полу-проводник, диэлектрик). Модель сильной связи.	Всего аудиторных часов		
		1	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Тема 2</b> Понятие дырки. Эффективная масса. Физический смысл эффективной массы. Уравнение движения электрона во внешнем электрическом поле. Заполнение энергетических зон. Функция распределения и плотность состояний и функции распределения в 3D случае. Уровень ферми в металле и полупроводнике. Собственные и примесные полупроводники. Гетеропереход. Понятие гетероперехода, типы гетеропереходов. Условия сшивки волновой функции	Всего аудиторных часов		
		1	0	5
		Онлайн		
		0	0	0

	на гетерогранице. Уравнение для огибающей волновой функции. Искажение зонной структуры вблизи гетерограниц. Область объемного заряда, ее масштаб. Энергетический спектр электронов прямоугольной потенциальной яме различной размерности.			
3 - 4	<b>Тема 3</b> Энергетический спектр в цилиндрической и сферической потенциальных ямах. Экситоны в наноструктурах. Плотность состояний в системах пониженной размерности (2D, 1D, 0D случаи).	Всего аудиторных часов		
		1	0	4
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	<b>Второй раздел</b>	2	0	12
9	<b>Тема 4</b> 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. Поглощение и испускание света полупроводниками. Прямозонные и непрямоzonные полупроводники. Использование гетероструктур в технологии полупроводниковых лазеров.	Всего аудиторных часов		
		1	0	6
		Онлайн		
		0	0	0
10	<b>Тема 5</b> Применение полупроводниковых наноструктур микроэлектронике. Использование гетероструктур в технологии фотодетекторов. Фотодетекторы ИК диапазона на множественных квантовых ямах. Применение полупроводниковых наноструктур микроэлектронике. Резонансные туннелированные. Полевые транзисторы. Транзистор с плавающим затвором.	Всего аудиторных часов		
		1	0	6
		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 ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Недели	Темы занятий / Содержание
	2 Семестр
1	<b>Работа 1</b> Энергетические зоны в кристалле и классификация веществ по типу проводимости (металл, полу-проводник,

	диэлектрик). Модель сильной связи.
2	<b>Работа 2</b> Уравнение движения электрона во внешнем электрическом поле. Заполнение энергетических зон. Функция распределения и плотность состояний и функции распределения в 3D случае. Уровень ферми в металле и полупроводнике. Собственные и примесные полупроводники.
3 - 4	<b>Работа 3</b> Гетеропереход. Понятие гетероперехода, типы гетеропереходов. Условия сшивки волновой функции на гетерогранице. Уравнение для огибающей волновой функции. Искажение зонной структуры вблизи гетерограниц.
5 - 6	<b>Работа 4</b> Область объемного заряда, ее масштаб. Энергетический спектр электронов прямоугольной потенциальной яме различной размерности.
7 - 8	<b>Работа 5</b> Энергетический спектр в цилиндрической и сферической потенциальных ямах. Экситоны в наноструктурах. Плотность состояний в системах пониженной размерности (2D, 1D, 0D случаи).
9	<b>Работа 6</b> Сверхрешетки. Особенности энергетического спектра. Метод сильной связи. Задача Кронига-Пенни.
10	<b>Работа 7</b> Методы исследования наноструктур. Электронная и атомно-силовая микроскопия.
11	<b>Работа 8</b> Молекулярно-лучевая эпитаксия, газофазная эпитаксия, литография. Поглощение и испускание света полупроводниками. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Использование гетероструктур в технологии полупроводниковых лазеров.
12 - 13	<b>Работа 9</b> Применение полупроводниковых наноструктур микроэлектронике. Использование гетероструктур в технологии фотодетекторов. Фотодетекторы ИК диапазона на множественных квантовых ямах
14 - 15	<b>Работа 10</b> Применение полупроводниковых наноструктур микроэлектронике. Резонансное туннелирование. Полевые транзисторы. Транзистор с плавающим затвором.

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Для выполнения лабораторных работ студенты разбиваются на бригады по два (в порядке исключения по три) человека.

На первом занятии происходит инструктаж по технике безопасности, ознакомление с перечнем работ, которые необходимо выполнить в течение семестра, и ознакомление с порядком допуска, выполнения и сдачи работ. На первом же занятии происходит распределение студентов по бригадами (подгруппам), составляется график.

Допуск к выполнению работы предусматривает собеседование со всеми студентами, образующими бригаду, и определяет степень готовности каждого из них к выполнению работы. Собеседование проводится в пределах программы того курса, по которому выполняются работы. Для ориентации направления собеседования в описании к каждой лабораторной работе содержится перечень контрольных вопросов и список рекомендованной литературы. Во время допуска к работе студентам разрешается пользоваться только своим рабочим журналом. Для собеседования по допуску к работам отводятся первые два часа начала занятий. В том случае, если отвечающие студенты не проявили удовлетворительного понимания темы лабораторной работы, они к выполнению работы не допускаются. (В оставшееся до конца занятия время они могут изучить необходимую литературу и в конце занятия повторно пройти собеседование.) В начале выполнения лабораторной работы студенты совместно с преподавателем подробно изучают установку и затем проводят предусмотренные заданием измерения. Полученные результаты заносятся в лабораторный журнал. Перед тем как выключить установку после проведения всех измерений необходимо результаты показать преподавателю.

Для получения зачета по работе студенты обязаны предъявить отчет, один на всю бригаду. В отчете должны быть представлены: схема установки, таблицы измеренных величин, необходимые расчеты, графики полученных зависимостей, ошибки измерений, заключение по работе, содержащее объяснение полученных результатов и сопоставление этих результатов с теоретическими закономерностями.

Зачет по работе проставляется после заключительного собеседования, на котором уточняются детали теоретического собеседования, выясняется понимание проводимых исследований и полученных результатов, определяется знание характеристик и возможностей лабораторной установки. Прием зачета производится в конце занятия.

Студенты выполнившие, но не сдавшие более одной лабораторной работы к дальнейшим работам не допускаются. Отчеты по лабораторным работам хранятся на кафедре до конца семестра.

## 6. 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-18	З-ПК-18	З, КИ-8
	У-ПК-18	З, КИ-8
	В-ПК-18	З, КИ-8
ПК-19	З-ПК-19	З, КИ-15
	У-ПК-19	З, КИ-15
	В-ПК-19	З, КИ-15

ПК-4	З-ПК-4	З, КИ-8
	У-ПК-4	З, КИ-8
	В-ПК-4	З, 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 – <i>«отлично»</i>	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 – <i>«хорошо»</i>	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 – <i>«удовлетворительно»</i>	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 – <i>«неудовлетворительно»</i>	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.

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

#### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 620 Л33 Введение в самоорганизацию и самосборку ансамблей наночастиц : монография, Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
2. ЭИ К 49 Наноплазмоника : , Москва: Физматлит, 2010
3. 620 М29 Нанотехнологии - Ударный вводный курс : учебное пособие, Долгопрудный: Интеллект, 2014
4. ЭИ Ш 18 Физика полупроводников : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022
5. ЭИ М31 Введение в физику наноструктур : учебное пособие для вузов, М. М. Маслов, Л. А. Опенев, Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 620 Н25 Наноматериалы и нанотехнологии : учебник для вузов, Запорожье: Мотор Сич, 2014
2. 543 П78 Проблемы аналитической химии Т.20 Нанообъекты и нанотехнологии в химическом анализе, Москва: Наука, 2015

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

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

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

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

1. Специализированный стенд для электрохимического формирования пористого кремния (Э-308)
2. Установка для получения углеродных нанотрубок методом газофазного осаждения (г.Железнодорожный, ФГКУ "В/ч 35533")
3. Установка для получения структурированных оксидов золь-гель технологией (г.Железнодорожный, ФГКУ "В/ч 35533")
4. Растровый электронный микроскоп (г.Железнодорожный, ФГКУ "В/ч 35533")
5. Установка для получения пленок методом ЛЭНГМИОР-БЛОДЖЕТТ (г.Железнодорожный, ФГКУ "В/ч35533")
6. Установка для молекулярной химической сборки (г.Железнодорожный, ФГКУ "В/ч 35533")

7. Атомно-силовой микроскоп (г.Железнодорожный, ФГКУ "В/ч 35533")
8. Микрофлюидическая установка для анализа ДНК (г.Железнодорожный, ФГКУ "В/ч 35533")
9. Установка для проведения эллипсометрических измерений (г.Железнодорожный, ФГКУ "В/ч 35533")
10. Лазерная люминесцентная установка (Э-205)

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

Цель методических рекомендаций для студента – облегчение и ускорение процесса изучения дисциплины "Специальный практикум по физике наносистем".

Материалы учебно-методического комплекса предоставляются студентам в виде соответствующей литературы и электронном виде. Эти материалы являются описанием лабораторных учебно- исследовательских работ, с включением дополнительного материала. Студенты должны активно пользоваться предоставленными материалами при подготовке к получению допуска, выполнению и защите лабораторной работы.

Процесс занятий в лаборатории строится следующим образом. Студенты разбиваются на пары. Для получения допуска к работе студенту необходимо изучить соответствующие методические указания и описание лабораторной работы.

После получения допуска студенты могут приступать к выполнению работы под контролем преподавателя. Результаты выполнения работы оформляются в виде отчета, состоящего из краткого изложения принципов работы установки, цели выполнения работы, полученных экспериментальных данных, результатов обработки и выводов.

Последний этап работы – защита результатов работы у преподавателя. Особое внимание следует уделить вопросу обработки и представления результатов. Представленные зависимости должны быть физически обоснованы и иметь проставленные погрешности (доверительные интервалы).

Для целей эффективного усваивания и использования полученных знаний рекомендуется ознакомиться с интернет – ресурсами и литературой. В рекомендованной литературе, особенно дополнительной, отдельные изучаемые вопросы рассматриваются более глубоко, их изучение повышает квалификацию будущего специалиста. Следует также при работе с материалом пользоваться интернет – ресурсами, часть из которых приводится ниже:

- <http://www.nanometer.ru/>
- <http://www.nanoworld.org/russian/library.html>
- <http://www.ntmdt.ru>
- <http://www.nanoobr.ru/>
- <http://www.rusnanoforum.ru/>
- <http://nano-info.ru/>
- <http://www.portalnano.ru/>
- <http://www.nanonewsnet.ru/>
- <http://www.rosnano.ru/>
- <http://e-learning.nanoobr.ru/>

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

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.

Автор(ы):

Мартынов Игорь Леонидович, к.ф.-м.н.