

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО НТС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/04-577

от 27.04.2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ НАНОСТРУКТУР**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 14.03.02 Ядерные физика и технологии

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
6	2	72	17	0	0	55	0	3
Итого	2	72	17	0	0	55	0	

## АННОТАЦИЯ

В курсе даются сведения о различных низкоразмерных физических системах. Рассматриваются методы их приготовления и исследования. Основное внимание уделяется технике проведения физических экспериментов с низкоразмерными объектами. Обсуждаются основные области применения наноструктур.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дать студентам базовые знания по свойствам наноразмерных объектов, экспериментальной технике получения, исследования и практического применения наноструктур.

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

Данная дисциплина даёт необходимые знания по физике наноструктур и готовит к проведению НИР и экспериментальной исследовательской работы

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
ОПК-1 [1] – Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	З-ОПК-1 [1] – Знать базовые законы естественнонаучных дисциплин; основные математические законы; основные физические явления, процессы, законы и границы их применимости; сущность основных химических законов и явлений; методы математического моделирования, теоретического и экспериментального исследования У-ОПК-1 [1] – Уметь выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат В-ОПК-1 [1] – Владеть математическим аппаратом для разработки моделей процессов и явлений, решения практических задач профессиональной деятельности; навыками использования основных общефизических законов и принципов

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;	Код и наименование индикатора достижения
--	---------------------------	--	--

		<b>Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)</b>	<b>профессиональной компетенции</b>
организационно-управленческий			
подготовка документации для создания системы менеджмента качества предприятия; подготовка исходных данных для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; участие в разработке и реализации проектов исследовательской и инновационной направленности в команде исполнителей;	исходные данные для проекта, результаты анализа, итоговая документация	ПК-9 [1] - Способен к выполнению работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, оборудования и материалов  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.028	З-ПК-9[1] - Знать номенклатуру работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов; У-ПК-9[1] - Уметь выполнять работы по подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов; В-ПК-9[1] - Владеть основными навыками сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
-----------------------------	-------------------------	------------------------------------

#### 5. 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>6 Семестр</i>						
1	Раздел 1	1-8	9/0/0		25	КИ-8	3-

							ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9
2	Раздел 2	9-15	8/0/0		25	КИ-15	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9
	<i>Итого за 6 Семестр</i>		17/0/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 6 Семестр</b>				50	3	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9

\* – 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:

Обозна	Полное наименование
--------	---------------------

чение	
КИ	Контроль по итогам
3	Зачет

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недел и	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем. , час.	Лаб., час.
	<i>6 Семестр</i>	17	0	0
<b>1-8</b>	<b>Раздел 1</b>	9	0	0
1 - 2	<b>Тема 1. Введение</b> Место наноразмерных объектов в окружающем нас мире. Подходы «снизу в вверх» и «сверху вниз». Манипуляции на квантовом уровне. Низкоразмерные физические системы. Квантовая механика – основа физики наноразмерных структур. Типы и виды наноструктур. Квантовые ямы, проволоки, точки.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>Тема 2. Методы приготовления наноструктур</b> Понятие эпитаксии. Соизмеримость решеток. Лазерное и магнетронное распыление. Принципы молекулярно-лучевой эпитаксии. Особенности МЛЭ. Критическая температура эпитаксии. Оптическая, электронная и рентгеновская литография. Методы изготовления электрических контактов.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	<b>Тема 3. Электрические методы исследования.</b> Вольт-амперные характеристики. Особенности двух и четырехконтактной схемы измерений. Классический эффект Холла в случае одного и двух типов носителей. Метод Ван-дер-Пау.	Всего аудиторных часов		
		1	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
6	<b>Тема 4 Оптические методы исследования наноструктур.</b> Понятие люминесценции. Флуоресценция, фосфоресценция, фотолюминесценция, электролюминесценция, радиолюминесценция, хемиллюминесценция, кандоллюминесценция. Особенности фотолюминесценции. Стоксовы потери. Люминесценция свободных экситонов. Фононные повторения. Экситонно-примесные уровни. Идентификация примесей. Фотолюминесценция квантово-размерных структур.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	<b>Тема 5. Автоэлектронная и автоионная эмиссия.</b> Физические основы автоэлектронной эмиссии. Теория Фаулера-Нордгейма. Полевая эмиссионная микроскопия. Автоэлектронный и автоионный микроскопы. Увеличение и разрешение эмиссионных микроскопов. Требования к игле. Основные направления автоэмиссионных исследований.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
<b>9-15</b>	<b>Раздел 2</b>	8	0	0
9 - 10	<b>Тема 6. Сканирующая зондовая микроскопия нанообъектов.</b> Принципы зондовой микроскопии. Сканирующий	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		

	туннельный микроскоп. Режимы обратной связи. Параметры, влияющие на туннельный ток. Принципы атомно-силовой микроскопии. Контактная, полуконтактная, бесконтактная моды.	0	0	0
11 - 12	<b>Тема 7. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения.</b> Принцип работы просвечивающего электронного микроскопа. Реплики. Контраст.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 14	<b>Тема 8. Нанотрубки.</b> Свойства и характеристики углеродные нанотрубок. Одностенные и многостенные нанотрубки. Методы получения нанотрубок. Хиральность. Связь диаметра и индексов хиральности. Дефекты нанотрубок.	Всего аудиторных часов		
		2	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
15	<b>Тема 9. Применение наноструктур.</b> Практическое использование нанотрубок. Применение полупроводниковых наноструктур. Мембраны. Нанодисперсные материалы.	Всего аудиторных часов		
		2	0	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

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Для успешного освоения материала курса рекомендуется посещение научных семинаров, конференций, проводимых в НИЯУ МИФИ и институтах РАН, популярных лекций приглашенных ученых

## 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)
ОПК-1	3-ОПК-1	3, КИ-8, КИ-15

	У-ОПК-1	3, КИ-8, КИ-15
	В-ОПК-1	3, КИ-8, КИ-15
ПК-9	3-ПК-9	3, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-9	3, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-9	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 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 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. ЭИ Н99 Solid-State Physics : An Introduction to Principles of Materials Science, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009
2. ЭИ S98 Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers : Accelerator Physics, Instrumentation and Science Applications, Cham: Springer International Publishing, 2016
3. ЭИ Ф50 Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2014
4. 620 Г87 Материаловедение для микро- и нанoeлектроники : учебное пособие для вузов, Д. В. Громов , А. А. Краснюк , Москва: МИФИ, 2008
5. ЭИ М31 Введение в физику наноструктур : учебное пособие для вузов, М. М. Маслов, Л. А. Опенов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. 621.38 Р25 Методы получения эпитаксиальных гетерокомпозиций : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
2. 620 Н25 Наноматериалы и нанотехнологии : учебник для вузов, Запорожье: Мотор Сич, 2014
3. 621.3 М29 Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники : , Москва: Техносфера, 2007
4. 539.2 С89 Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов : , Москва: Либроком, 2013
5. 530 Л22 Теоретическая физика Т.3 Квантовая механика. Нерелятивистская теория, , : Физматлит, 2004
6. 621.38 Н40 Зондовые нанотехнологии в электронике : , В. К. Неволин, М.: Техносфера, 2005
7. 539.2 К55 Введение в нанотехнологию : , Н. Кобаяси, М.: Бином, Лаборатория знаний, 2008
8. 539.2 К55 Введение в нанотехнологию : , Н. Кобаяси, Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2005
9. 539.2 Х21 Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века : , Харрис П., М.: Техносфера, 2003

### **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:**

Специальное программное обеспечение не требуется

### **LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:**



1. Nanonewsnet (<http://www.nanonewsnet.ru>)

2. Nanomarket (<http://www.nanomarket.ru/>)

3. Nanotech (<http://www.nanotech.ru/>)

<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**

После изучения курса студент должен твердо знать типы и виды наноструктур. Квантовые ямы, проволоки, точки. Понятие гетеропереходов. Свойства германия и кремния. Свойства полупроводниковых соединений типа АПВВ. Характеристики Твердые растворы (тройные сплавы) на основе соединений АПВВ. Мелкие доноры и мелкие акцепторы. Дельта-легирование. Понятие эпитаксии. Принципы молекулярно-лучевой эпитаксии. Особенности МЛЭ. Критическая температура эпитаксии. Оптическая, электронная и рентгеновская литография. Методы изготовления электрических контактов. Особенности двух и четырехконтактной схемы измерений. Классический эффект Холла в случае одного и двух типов носителей. Метод Ван-дер-Пау. Измерение и применение вольтфарадных характеристик. Принципы резонансного туннелирования. Вольт-амперные характеристики двух- и трехбарьерного резонансно-туннельного диода. Генерация микроволнового излучения в квантово-размерных диодных резонансно-туннельных структурах. Понятие двумерного электронного газа. Целочисленный и дробный квантовый эффект Холла. Осцилляции Шубникова де Гааза. Понятие люминесценции. Особенности фотолюминесценции. Люминесценция свободных экситонов. Идентификация примесей. Фотолюминесценция квантово-размерных структур. Физические основы автоэлектронной эмиссии. Теория Фаулера-Нордгейма. Полевая эмиссионная микроскопия. Автоэлектронный и автоионный микроскопы. Принципы зондовой микроскопии. Сканирующий туннельный микроскоп. Режимы обратной связи. Параметры, влияющие на туннельный ток. Принципы атомно-силовой микроскопии. Контактная, полуконтактная, бесконтактная моды. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения. Свойства и характеристики углеродные нанотрубок. Хиральность. Методы получения нанотрубок. Практическое использование нанотрубок. Применение наноструктур.

Студент должен уметь применять фундаментальные законы в области физики наноструктур для самостоятельного комбинирования и синтеза реальных идей, применять теоретические и компьютерные методы исследований в области физики наноструктур, производить поиск нужной информации в специальной научно-технической и патентной литературе по тематике исследований и разработок, применять экспериментальные методы электрофизических, оптических и структурных исследования наноструктур, а также владеть

методами измерения вольтамперных, вольфарадных, магнитных, оптических и структурных характеристик нанобъектов.

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

При чтении курса следует придерживаться следующей последовательности изложения. Сначала рассматриваются общие вводные понятия. Место наноразмерных объектов в окружающем нас мире. Подходы «снизу в вверх» и «сверху вниз». Манипуляции на квантовом уровне. Низкоразмерные физические системы. Квантовая механика – основа физики наноразмерных структур. Типы и виды наноструктур. Квантовые ямы, проволоки, точки. Дается понятие гетеропереходов. Гетеропереходы на основе полупроводников. Свойства германия и кремния. Свойства полупроводниковых соединений типа АПВВ. Твердые растворы (тройные сплавы) на основе соединений АПВВ. Мелкие доноры и мелкие акцепторы. Дельта-легирование. Затем обсуждаются методы приготовления наноструктур. Понятие эпитаксии. Соизмеримость решеток. Лазерное и магнетронное распыление. Принципы молекулярно-лучевой эпитаксии. Особенности МЛЭ. Критическая температура эпитаксии. Оптическая, электронная и рентгеновская литография. Методы изготовления электрических контактов. Рассматриваются электрические методы исследования. Вольт-амперные характеристики. Особенности двух- и четырехконтактной схемы измерений. Классический эффект Холла в случае одного и двух типов носителей. Метод Ван-дер-Пау. Подробно изучается резонансно-туннельный диод. Принципы резонансного туннелирования. Вольт-амперные характеристики двух- и трехбарьерного резонансно-туннельного диода. Влияние температуры на свойства РТД. Генерация микроволнового излучения в квантово-размерных диодных резонансно-туннельных структурах. Вольфарадные характеристики структур с квантовыми ямами. После этого переходят к теме, связанной с квантовыми явлениями в двумерном электронном газе. Понятие двумерного электронного газа. Целочисленный и дробный квантовый эффект Холла. Осцилляции Шубникова де Гааза. Экспериментальное изучение квантового эффекта Холла в двумерном электронном газе. После электрических свойств изучаются оптические методы исследования наноструктур. Дается понятие люминесценции. Флуоресценция, фосфоресценция, фотолюминесценция, электролюминесценция, радиолюминесценция, хемилюминесценция, кандолюминесценция. Особенности фотолюминесценции. Стоксовые потери. Люминесценция свободных экситонов. Фононные повторения. Экситонно-примесные уровни. Идентификация примесей. Фотолюминесценция квантово-размерных структур. Из структурных методом исследований изучаются автоэлектронная и автоионная эмиссия, сканирующая зондовая микроскопия нанобъектов, просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения. Заканчивается курс обсуждением свойств нанотрубок и применением наноструктур.

Во время проведения лекций желательно использовать проекционную технику, а также инициировать обсуждение материала методом «вопросов в аудиторию».

Автор(ы):

Руднев Игорь Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент

Покровский Сергей Владимирович