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

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 01/08-577

от 28.08.2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ НАНОСТРУКТУР

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, час.**	**СРС, час.**	**КСР, час.**	**Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП**
8	2	72	22	22	0		28	0	З
Итого	2	72	22	22	0	0	28	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**

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			
Проведение научных и аналитических исследований по отдельным разделам (этапам, заданиям) темы (проекта) в рамках предметной области по профилю специализации в соответствии с утвержденными планами и методиками	Деятельность по разработке материалов, покрытий, приборов.	ПК-14.2 [1] - Способен проводить научные исследования в области физики конденсированного состояния вещества с целью разработки полупроводниковых, сверхпроводниковых, тонкопленочных и наноструктурированных материалов,	З-ПК-14.2[1] - знать основные современные достижения физики твердого тела и возможности современной экспериментальной техники; основы физической оптики, теорию интерференции,

исследований. участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных компьютерных технологий; 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; участие в создании новых методов и технических средств исследований и новых разработок, участие во внедрении результатов исследований и разработок.		сверхпроводящих устройств и оптоэлектронных приборов; в области оптического приборостроения, оптических материалов и технологий; в области лазерной физики с целью создания новых эталонов, методик ведения измерений и средств измерений с их последующей аттестацией и вводом в реестр средств измерений для нужд нанометрологии *Основание:* Профессиональный стандарт: 25.049	дифракции, основы атомной и молекулярной спектроскопии; способы и методы создания новых эталонов.; У-ПК-14.2[1] - уметь построить математическую модель явления, рассчитать схему эксперимента, провести оценки параметров материалов, выбрать необходимые материалы и методики для решения конкретных задач с учетом дальнейшего применения в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области физики конденсированного состояния вещества и средств измерений.; В-ПК-14.2[1] - владеть основами спектроскопии атомов и молекул, методиками ведения измерений и средств измерений; методами получения, анализа и описания параметров и характеристик процессов в экспериментальных установках физики твердого тела и лазерной физики.

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	**Задачи воспитания (код)**
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной ответственности за научно-

	технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (В17)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (В18)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (В19)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (В22)

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
	8 Семестр						
1	Раздел 1	1-8	14/14/0		25	КИ-8	З-ПК-14.2, У-ПК-14.2, В-ПК-14.2
2	Раздел 2	9-12	8/8/0		25	КИ-12	З-ПК-14.2, У-ПК-14.2, В-ПК-14.2
	Итого за 8 Семестр		22/22/0		50		
	Контрольные мероприятия за 8 Семестр				50	З	З-ПК-14.2, У-ПК-14.2, В-ПК-14.2

* – 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.
	8 Семестр	22	22	0
1-8	**Раздел 1**	14	14	0
1 - 2	**Тема 1. Введение** 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		
		4	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	**Тема 2. 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.	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	**Тема 3. Электрические методы исследования.** Вольт-амперные характеристики. Особенности двух и четырехконтактой схемы измерений. Классический эффект Холла в случае одного и двух типов носителей. Метод Ван-дер-Пау.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
6	**Тема 4 Оптические методы исследования наноструктур.** Понятие люминесценции. Флуоресценция, фосфоресценция, фотолюминесценция, электролюминесценция, радиолюминесценция, хемилюминесценция, кандолюминесценция. Осо-бенности фотолюминесценции. Стоксовые потери. Люминесценция свободных экситонов. Фононные повторения. Экситонно-примесные уровни. Идентификация примесей. Фотолюминесценция квантово-размерных структур.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	**Тема 5. Автоэлектронная и автоионная эмиссия.** Физические основы автоэлектронной эмиссии. Теория Фаулера-Нордгейма. Полевая эмис-сионная микроскопия. Автоэлектронный и автоионный микроскопы. Увеличение и разрешение эмиссионных микроскопов. Требование к игле. Основные направления автоэмиссионных исследований.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-12	**Раздел 2**	8	8	0
9	**Тема 6. Сканирующая зондовая микроскопия нанообъектов.** Принципы зондовой микроскопии. Сканирующий туннельный микроскоп. Режимы обрат-ной связи. Параметры, влияющие на туннельный ток. Принципы атомно-силовой микроскопия. Контактная, полуконтактная, бесконтакная моды.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0

10	**Тема 7. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения.** Принцип работы просвечивающего электронного микроскопа. Реплики. Контраст.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
11	**Тема 8. Нанотрубки.** Свойства и характеристики углеродные нанотрубок. Одностенные и многостенные нанотрубки. Методы получения нанотрубок. Хиральность. Связь диаметра и индексов хиральности. Дефекты нанотрубок.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
12	**Тема 9. Применение наноструктур.** Практическое использование нанотрубок. Применение полупроводниковых наноструктур. Мембраны. Нанодисперсные материалы.	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

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Проводятся занятия в активной и интерактивной форме. Для успешного освоения материала курса рекомендуется посещение научных семинаров, конференций, проводимых в НИЯУ МИФИ и институтах РАН.

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-14.2	З-ПК-14.2	З, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-14.2	З, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-14.2	З, КИ-8, КИ-12

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:

<table>
<tr><th>Сумма баллов</th><th>Оценка по 4-х балльной шкале</th><th>Отметка о зачете</th><th>Оценка ECTS</th></tr>
<tr><td>90-100</td><td>5 – «отлично»</td><td rowspan="7">«зачтено»</td><td>A</td></tr>
<tr><td>85-89</td><td rowspan="3">4 – «хорошо»</td><td>B</td></tr>
<tr><td>75-84</td><td>C</td></tr>
<tr><td>70-74</td><td rowspan="2">D</td></tr>
<tr><td>65-69</td><td rowspan="2">3 – «удовлетворительно»</td></tr>
<tr><td>60-64</td><td>E</td></tr>
<tr><td>ниже 60</td><td>2 – «неудовлетворительно»</td><td>«не зачтено»</td><td>F</td></tr>
</table>

Оценка «отлично» соответствует глубокому и прочному освоению материала программы обучающимся, который последовательно, четко и логически стройно излагает свои ответы, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответах материалы монографической литературы.

Оценка «хорошо» соответствует твердым знаниям материала обучающимся, который грамотно и, по существу, излагает свои ответы, не допуская существенных неточностей.

Оценка «удовлетворительно» соответствует базовому уровню освоения материала обучающимся, при котором освоен основной материал, но не усвоены его детали, в ответах присутствуют неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности.

Отметка «зачтено» соответствует, как минимум, базовому уровню освоения материала программы, при котором обучающийся владеет необходимыми знаниями, умениями и навыками, умеет применять теоретические положения для решения типовых практических задач.

Оценку «неудовлетворительно» / отметку «не зачтено» получает обучающийся, который не знает значительной части материала программы, допускает в ответах существенные ошибки, не выполнил все обязательные задания, предусмотренные программой. Как правило, такие обучающиеся не могут продолжить обучение без дополнительных занятий.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ H99 Solid-State Physics : An Introduction to Principles of Materials Science, Luth, Hans. , Ibach, Harald. , 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 М31 Введение в физику наноструктур : учебное пособие для вузов, Опенов Л.А., Маслов М.М., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

4. 620 Г87 Материаловедение для микро- и наноэлектроники : учебное пособие для вузов, Краснюк А.А., Громов Д.В., Москва: МИФИ, 2008

5. ЭИ Ф50 Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела : учебное пособие для вузов, Троян В.И. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2014

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 539.2 К55 Введение в нанотехнологию : , Кобаяси Н., М.: Бином, Лаборатория знаний, 2008

2. 539.2 К55 Введение в нанотехнологию : , Кобаяси Н., Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2005

3. 621.38 Н40 Зондовые нанотехнологии в электронике : , Неволин В.К., М.: Техносфера, 2005

4. 621.38 Р25 Методы получения эпитаксиальных гетерокомпозиций : учебное пособие для вузов, Ратушный В.И., Ермолаева Н.В., Смолин А.Ю., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012

5. 620 Н25 Наноматериалы и нанотехнологии : учебник для вузов, Калинин В.Т. [и др.], Запорожье: Мотор Сич, 2014

6. 621.3 М29 Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники : , Мартин-Палма Р.Дж., Агулло-Руеда Ф., Мартинес-Дуарт Дж.М., Москва: Техносфера, 2007

7. 539.2 С89 Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов : , Суздалев И.П., Москва: Либроком, 2013

8. 530 Л22 Теоретическая физика Т.3 Квантовая механика. Нерелятивистская теория, Ландау Л.Д., : Физматлит, 2004

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 AIIIBV. Характеристики Твердые растворы (тройные сплавы) на основе соединений AIIIBV. Мелкие доноры и мелкие акцепторы. Дельта-легирование. Понятие эпитаксии. Принципы молекулярно-лучевой эпитаксии. Особенности МЛЭ. Критическая температура эпитакии. Оптическая, электронная и рентгеновская литография. Методы изготовления электрических контактов. Особенности двух и четырехконтактой 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, бесконтакная 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 нанообъектов.

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 AIIIBV. Твердые растворы (тройные сплавы) на основе соединений AIIIBV. 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 эпитакии. Оптическая, электронная и рентгеновская литография. Методы изготовления электрических контактов. Рассматриваются электрические методы исследования. Вольт-амперные характеристики. Особенности двух и четырехконтактой 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. Вольтфарадные 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 нанообъектов, просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения. Заканчивается курс обсуждением свойств нанотрубок и применением применение 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