

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**

**НАНОФОТОНИКА**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

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
1	5	180	8	16	24	96	0	Э
Итого	5	180	8	16	24	0	96	0

## АННОТАЦИЯ

Учебная задача курса «Нанопотоника» - дать основные физические представления о методах получения, исследования и применения нанопотонных систем.

В курсе «Нанопотоника» рассматриваются физические закономерности взаимодействия электромагнитного излучения с наноструктурами, особое внимание уделяется взаимосвязи симметрии нанобъекта с радиационными процессами

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения учебной дисциплины «Нанопотоника» является получение знаний, необходимых для успешной профессиональной деятельности в области исследований, разработок и технологий, направленных на понимание процессов, происходящих в области нанопотоники; при этом основное внимание уделяется линейному и нелинейному взаимодействию электромагнитного излучения (в основном и оптическом диапазоне) с нанобъектами

### 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
производственно-технологический			
организация и руководство процессом производства приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурных материалов	Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования.	ПК-15 [1] - способен к руководству разработкой и оптимизацией технологии производства приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурных	З-ПК-15[1] - Знать: физико-технологических основы функционирования и производства приборов квантовой электроники и фотоники. ;

	<p>Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и нанoeлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и нанoeлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.</p>	<p>материалов</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.002</p>	<p>У-ПК-15[1] - Уметь: разрабатывать и оптимизировать технологию производства приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурных материалов; В-ПК-15[1] - Владеть: навыками руководства разработкой и оптимизацией технологии производства приборов электроники и нанoeлектроники.</p>
--	--	--	---

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практи. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>1 Семестр</i>						
1	Введение, фундаментальные понятия	1-8	4/8/12		25	КИ-8	З-ПК-15, У-ПК-15
2	Оптические свойства	9-16	4/8/12		25	КИ-16	В-

	фотонных систем						ПК-15
	<i>Итого за 1 Семестр</i>		8/16/24		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 1 Семестр</b>				50	Э	З-ПК-15, У-ПК-15, В-ПК-15

\* – 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>1 Семестр</i>	8	16	24
<b>1-8</b>	<b>Введение, фундаментальные понятия</b>	4	8	12
1 - 2	<b>Тема 1</b> Основы взаимодействия излучения с веществом на основе классической электродинамики. Уравнения Максвелла. Испускание света изолированными атомами в дипольном приближении. Определения фотона и электрона. Распространение в свободном пространстве, в кристаллах, коллективные эффекты. Взаимодействия излучения с веществом с точки зрения квантовой теории (основы квантовой электродинамики). Размерное квантование энергии электронных взаимодействий. Понятие ближнего поля. Ближнепольная оптика. Физические принципы ближнепольной микроскопии и спектроскопии.	Всего аудиторных часов		
		1	2	3
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>Тема 2</b> Сверхрешетки, квантовые нити, квантовые точки. Проявление квантовых эффектов. Плотность состояний. Оптика систем с размерным ограничением. Эффект размерного квантования. Спектры поглощения и фотолюминесценции полупроводниковых наночастиц. Свойства квантовых ям и сверхрешеток. Резонансное отражение и поглощение света в структурах с квантовыми ямами. Квантовые микрорезонаторы. Оптические методы исследования квантовых точек.	Всего аудиторных часов		
		1	2	3
		Онлайн		
		0	0	0

5 - 6	<b>Тема 3</b> Введение в электродинамику металлов. Теория Друде-Зомерфельда оптических свойств металлов. Оптические свойства реальных металлов. Поверхностные плазмон-поляритоны. Методики наблюдения поверхностных плазмонов. Оптические свойства сферических наночастиц. Локализованные плазмоны в кластерах наночастиц.	Всего аудиторных часов		
		1	2	3
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	<b>Тема 4</b> Наноструктурированные полимерные системы. Нековалентные взаимодействия. Супрамолекулярные структуры. Моно- и мультислойные массивы. Методы синтеза наноструктур (эпитаксиальный рост, лазерная абляция, методы коллоидной химии и др.). Методы исследования наноструктур (рентгеноструктурный анализ, электронная микроскопия, сканирующая зондовая микроскопия).	Всего аудиторных часов		
		1	2	3
		Онлайн		
		0	0	0
9-16	<b>Оптические свойства фотонных систем</b>	4	8	12
9 - 10	<b>Тема 5</b> Диполь-дипольное взаимодействие и вероятность переноса. Приближение Ферстера. Когерентное явления и механизм переноса. Перенос электронного возбуждения с квантовых точек на молекулы, макромолекулы и белки.	Всего аудиторных часов		
		1	2	3
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 12	<b>Тема 6</b> Методы получения тонких пленок наночастиц. Спектральные свойства пленок. Учет ферстеровского переноса возбуждения при формировании спектров люминесценции. Влияние взаимодействия между наночастицами на уширение спектральных линий. Фотопроцессы при воздействии мощного лазерного излучения на пленки наночастиц.	Всего аудиторных часов		
		1	2	3
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 14	<b>Тема 7</b> Использование полупроводниковых наночастиц в качестве биологических флюоресцентных меток. Новые типы лазеров. Фотовольтаические элементы на основе полупроводниковых квантовых точек.	Всего аудиторных часов		
		1	2	3
		Онлайн		
		0	0	0
15 - 16	<b>Тема 8</b> Контроль НМ в продукции наноиндустрии, отходах производства и потребления и объектах окружающей среды. Соблюдение правил лабораторной практики. Системы обеспечения качества проводимых исследований. Основные нормативные документы.	Всего аудиторных часов		
		1	2	3
		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>1 Семестр</i>
1 - 2	<p><b>Тема 1</b></p> <p>Основы взаимодействия излучения с веществом на основе классической электродинамики. Уравнения Максвелла. Испускание света изолированными атомами в дипольном приближении. Определения фотона и электрона. Распространение в свободном пространстве, в кристаллах, коллективные эффекты. Взаимодействия излучения с веществом с точки зрения квантовой теории (основы квантовой электродинамики). Размерное квантование энергии электронных взаимодействий. Понятие ближнего поля. Ближнеполевая оптика. Физические принципы ближнеполевой микроскопии и спектроскопии.</p>
3 - 4	<p><b>Тема 2</b></p> <p>Сверхрешётки, квантовые нити, квантовые точки. Проявление квантовых эффектов. Плотность состояний. Оптика систем с размерным ограничением. Эффект размерного квантования. Спектры поглощения и фотолюминесценции полупроводниковых наночастиц. Свойства квантовых ям и сверхрешеток. Резонансное отражение и поглощение света в структурах с квантовыми ямами. Квантовые микрорезонаторы. Оптические методы исследования квантовых точек.</p>
5 - 6	<p><b>Тема 3</b></p> <p>Введение в электродинамику металлов. Теория Друде-Зомерфельда оптических свойств металлов. Оптические свойства реальных металлов. Поверхностные плазмон-поляритоны. Методики наблюдения поверхностных плазмонов. Оптические свойства сферических наночастиц. Локализованные плазмоны в кластерах наночастиц.</p>
7 - 8	<p><b>Тема 4</b></p> <p>Наноструктурированные полимерные системы. Нековалентные взаимодействия. Супрамолекулярные структуры. Моно- и мультислойные массивы. Методы синтеза наноструктур (эпитаксиальный рост, лазерная абляция, методы коллоидной химии и др.). Методы исследования наноструктур (рентгеноструктурный анализ, электронная микроскопия, сканирующая зондовая микроскопия).</p>
	<p><b>Тема 8</b></p> <p>Контроль НМ в продукции наноиндустрии, отходах производства и потребления и объектах окружающей среды. Соблюдение правил лабораторной практики. Системы обеспечения качества проводимых исследований. Основные нормативные документы.</p>

9 - 11	<b>Тема 5</b> Наноструктурированные полимерные системы. Нековалентные взаимодействия. Супрамолекулярные структуры. Моно- и мультислойные массивы. Методы синтеза наноструктур (эпитаксиальный рост, лазерная абляция, методы коллоидной химии и др.). Методы исследования наноструктур (рентгеноструктурный анализ, электронная микроскопия, сканирующая зондовая микроскопия).
12 - 13	<b>Тема 6</b> Методы получения тонких пленок наночастиц. Спектральные свойства пленок. Учет ферстеровского переноса возбуждения при формировании спектров люминесценции. Влияние взаимодействия между наночастицами на уширение спектральных линий. Фотопроцессы при воздействии мощного лазерного излучения на пленки наночастиц.
14 - 15	<b>Тема 7</b> Использование полупроводниковых наночастиц в качестве биологических флуоресцентных меток. Новые типы лазеров. Фотовольтаические элементы на основе полупроводниковых квантовых точек.

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Используются современные предметно- и личностно-ориентированные образовательные технологии

## 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-15	З-ПК-15	Э, КИ-8
	У-ПК-15	Э, КИ-8
	В-ПК-15	Э, КИ-16

## 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.

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

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ X58 Synthesis and Optimization of Chalcogenides Quantum Dots Thermoelectric Materials : , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016
2. ЭИ И 26 Оптоэлектроника и нанофотоника : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2020
3. ЭИ М31 Введение в физику наноструктур : учебное пособие для вузов, М. М. Маслов, Л. А. Опенев, Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:



1. ЭИ К 49 Наноплазмоника : , Москва: Физматлит, 2010
2. 535 С16 Оптика и фотоника. Принципы и применения Т.1 , Долгопрудный: Интеллект, 2012
3. 535 С16 Оптика и фотоника. Принципы и применения Т.2 , Долгопрудный: Интеллект, 2012
4. 535 Л25 Когерентная фотоника : , А. И. Ларкин, Ф. Т.С. Юу, Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2012

#### 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. Демонстрационный проектор

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

При составлении программы учебной дисциплины “Наноплазмоника” предполагалось, что студент изучил основные разделы курсов «Квантовая механика», «Оптика», «Электродинамика», «Физика твердого тела», а также знает и умеет пользоваться следующими понятиями, методами, законами и уравнениями квантовой механики: энергетические уровни, длина волны Де Бройля, физики конденсированного состояния вещества (кристаллические структуры, фононы, дефекты, плотность состояний), теории металлов: зонная структура, квазичастицы (электроны и дырки проводимости, экситоны, поверхностные состояния).

В результате освоения данной дисциплины студент должен знать основные экспериментальные факты и базовые теоретические модели, используемые в оптике и физике конденсированного состояния вещества, их основные применения в промышленности и физическом эксперименте.

Типичные задачи для семинарских занятий с методическими указаниями для их решения представлены в следующих учебниках и учебных пособиях:

1. Федоров А.В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.
2. Сойфер В.А. Дифракционная наноплазмоника. М.: Физматлит, 2011.
3. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и наноплазмоника. Учебное пособие. М.: Лань, 2011.
4. Климов В.В. Наноплазмоника, М, ФИЗМАТЛИТ, 2010 г.
5. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. Оптические свойства наноконструктов на основе пористых систем. УФН, 2007, Т. 177, № 6.

Данными книгами рекомендуется пользоваться при самостоятельной проработке заданных разделов курса.

Как хороший источник информации по современным достижениям в нанофотонике рекомендуется бюллетень «ПЕРСТ» (Перспективные технологии, <http://perst.issph.kiae.ru>). Хорошие обзоры можно найти в журнале «Успехи физических наук» (<http://ufn.ru>). Учитывая возможность неполноты и недостоверности, для расширения научного кругозора можно использовать статьи из Википедии ([www.wikipedia.ru](http://www.wikipedia.ru)), и ресурс [www.membrana.ru](http://www.membrana.ru)

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

Лекционный курс «Нанофотоника» строится по следующему плану: на вводной лекции излагаются основные факты из нанофотоники, экспериментальные и технологические достижения, демонстрируется важность исследования явлений, обусловленных оптическими свойствами систем нанометрового размера.

Далее повторяются основные понятия и положения квантовой механики, оптики и физики конденсированного состояния: волновые функции, квантование энергии, дифракционный предел, плотность состояний.

На примере фотонных кристаллов, фотонно-кристаллических волокон, плазмоники, использования линейных и нелинейных оптических явлений демонстрируются возможности преодоления дифракционного предела и улучшения характеристик приборов и систем. В учебном процессе используются учебные фильмы, лекции и презентации ведущих мировых ученых.

При изучении данной темы необходимо обратить внимание, что нанофотоника охватывает широкий спектр вопросов, связанных с взаимодействием света с веществом в нанометровом масштабе расстояний и является междисциплинарной наукой. Нанофотоника делится на три больших раздела: локализация света в областях нанометрового размера; взаимодействие света с наноструктурированными материалами; фотопроцессы на нанометровых расстояниях, применение света в качестве инструмента нанотехнологий. Таким образом, план работы по нанофотонике состоит из трех частей.

Первая часть посвящена изучению локализации света в пространстве. Приводится классификация типов нанолокализации света. Рассмотрен вопрос о затухающих волнах, возникающих в областях, где распространение света энергетически запрещено. В качестве примера следует рассмотреть эффект полного внутреннего отражения. Наличие затухающих волн является одним из ключевых моментов всей темы и активно используется в дальнейшем. Изучение нанолокализации света в пространстве продолжается рассмотрение поверхностных плазмонов, представляющих собой поверхностные волны (коллективные движения электронов проводимости металла) распространяющиеся вдоль границы металл-диэлектрик.

Процесс передачи энергии оптической волны в подсистему поверхностных плазмонов называется поверхностным плазмонным резонансом. Следует отметить, что прямая генерация поверхностных плазмонов за счет оптического излучения невозможна, т.к. свет с необходимыми длинами волн не может распространяться ни в одном из контактирующих материалов. Поэтому для наблюдения эффектов, связанных с поверхностными плазмонами применяются специальные конфигурации эксперимента, использующие наличие затухающих волн.

Третий тип нанолокализации света связан с наличием области ближнего поля вблизи неоднородностей вещества нанометрового размера. Различается апертурная и безапертурная

локализация света. В связи с данной темой упоминается сканирующий оптический микроскоп ближнего поля, который подробнее рассмотрен в части, посвященной методикам.

Вторая часть темы посвящена оптическим наноматериалам, то есть веществам, в которых наличие неоднородностей наноразмера приводит к существенному изменению оптических свойств. Рассматривается квантовая локализация электронов и оптические свойства нанометровых квантовых структур, металлические наночастицы и их оптические свойства (плазмоника). Рассмотрено понятие фотонного кристалла, приведены природные примеры фотонных кристаллов и их классификация. Основной оптической особенностью фотонных кристаллов является наличие запрещенных частот и направлений распространения света, что является прямой аналогией с электронной структурой полупроводников и оправдывает название «фотонные кристаллы». Кратко рассмотрены методы создания фотонных кристаллов и их возможные применения. Среди нанокомпозитов выделяется два принципиально отличающихся типа: нанокомпозиты с размерами включений и расстояний между ними существенно меньше длины волны, и нанокомпозиты, в которых эти размеры сравнимы с длиной волны. Нанокомпозиты первого типа являются средами с эффективным показателем преломления и практически не рассеивают свет, в то время, как нанокомпозиты второго типа являются эффективными рассеивающими средами с некоторыми аномальными свойствами.

С целью выработки профессиональных компетенций студентов на лекциях и семинарских занятиях используется интерактивная форма проведения лекционных (75%) и семинарских занятий (25%). Часть аналитических выкладок переносится с лекций на семинары и выводится совместно со студентами. На семинарах проводятся численные оценки обсуждающихся величин. Используются простые задачи для демонстрации понятий, необходимых далее на лекциях

Автор(ы):

Мартынов Игорь Леонидович, к.ф.-м.н.