

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан физического факультета
_____ Малышев А.И.

« 31 » _____ августа 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

«Нанопотоника»

Уровень подготовки

аспирантура

Направление подготовки

03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Направленность образовательной программы

01.04.10 «Физика полупроводников»

Квалификация

Исследователь, преподаватель-
исследователь

Форма обучения
очная

Нижний Новгород, 2021

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Нанопотоника» относится к вариативной части ОПОП, является дисциплиной по выбору и изучается на 3 году обучения в 5 семестре.

Цель дисциплины состоит в том, чтобы дать аспирантам знания о фотоэлектронных процессах в квантово-размерных твердотельных наноструктурах, о физических принципах функционирования, принципах конструирования, методах создания и применении различных оптоэлектронных приборов на основе твердотельных наноструктур. Данная дисциплина призвана расширить и развить знания аспирантов в области взаимодействия света с веществом в низкоразмерных системах.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код компетенции, этап формирования)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
ОПК-1 Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	<i>З1 (ОПК-1) Знать</i> основные проблемы в своей предметной области. <i>У1 (ОПК-1) Уметь</i> осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области. <i>В1 (ОПК-1) Владеть</i> современными методами исследований с использованием информационных технологий.
ПК-1 Способность к методически грамотному изложению материала учебных дисциплин при чтении лекций, построении практических занятий, разработке учебных пособий и к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы, получению научных	<i>З1 (ПК-1) Знать</i> базовую информацию в области физики полупроводников. <i>У1 (ПК-1) Уметь</i> самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты. <i>В1 (ПК-1) Владеть</i> способностями анализа, оценки и методами изложения научной информации в области физики полупроводников.
	<i>З2 (ПК-1) Знать</i> физические основы процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния. <i>У2 (ПК-1) Уметь</i> разрабатывать новые модели физических процессов в области физики

результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направлению 01.04.10 «Физика полупроводников»	полупроводников и физики конденсированного состояния. <i>В2 (ПК-1) Владеть</i> навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.
	<i>ЗЗ (ПК-1) Знать</i> физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и структур на их основе. <i>УЗ (ПК-1) Уметь</i> исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур. <i>ВЗ (ПК-1) Владеть</i> навыками работы с исследовательским и контрольно-измерительным оборудованием для изучения оптических свойств полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур, в том числе при практических занятиях

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, всего 72 часа, из которых 37 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, включая 2 часа - мероприятия текущего контроля успеваемости, 1 час - мероприятия промежуточной аттестации), 35 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе				
		Контактная работа, часов				Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Введение	4	2	0	0	2	2
2. Оптические свойства квантово-размерных структур	11	6	0	0	6	5
3. Люминесценция в квантово-размерных структурах	12	6	0	0	6	6
4. Электрооптические свойства квантово-размерных структур	8	4	0	0	4	4
5. Фотоэлектрические свойства квантово-размерных структур	12	6	0	0	6	6

6. Лазеры на основе квантово-размерных структур	12	6	0	0	6	6
7. Нанопотоника и квантовые вычисления	12	6	0	0	6	6
ВСЕГО	71	36	0	0	36	35
В т.ч.текущий контроль	2					
Промежуточная аттестация – зачет, 1 час						

Содержание разделов дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1	Введение	Основные тенденции в развитии твердотельной электроники и оптоэлектроники. Увеличение скорости и объема обработки и передачи информации по каналам оптической связи. Поиски новых материалов и новых принципов конструирования оптоэлектронных приборов. Ограниченность функциональных возможностей традиционных оптоэлектронных приборов. Нанoeлектроника. Нанопотоника как наука о взаимодействии света с веществом в наноразмерных структурах. Оптоэлектронные приборы на основе твердотельных наноструктур. Основные преимущества по сравнению с традиционными оптоэлектронными приборами. Существующие и потенциальные области применения.	лекция	собеседование на лекции, тесты
2	Оптические свойства квантово-размерных структур	Оптические переходы в квантово-размерных структурах (КРС). Межзонные и межподзонные переходы. Межзонное оптическое поглощение в квантово-размерных структурах (КРС). Матричные элементы межзонных оптических переходов в 2-зонной и 8-зонной модели (дипольное приближение). Сила осциллятора межзонных оптических переходов. Коэффициент оптического поглощения квантовых ям (КЯ), систем квантовых нитей (КН) и квантовых точек (КТ). Правила отбора при межзонных оптических переходах в КРС. Правила отбора по квазиимпульсу, моменту импульса, четности. Поляризационные зависимости коэффициента оптического поглощения КРС	лекция	собеседование на лекции, тесты

		<p>при возбуждении линейно- и циркулярно-поляризованным светом. Эффект Рашба. Уширение края межзонного оптического поглощения. Обобщенная δ-функция Дирака. Гауссово (структурное) уширение. Лоренцево (термическое) уширение. Форма края межзонного поглощения в сверхрешетках (СР).</p> <p>Экситонное поглощение в КРС. Матричные элементы Ванье.</p> <p>Межподзонные переходы в КРС. Матричный элемент межподзонных переходов.</p> <p>Переходы из размерно-квантованных состояний в непрерывный спектр (фотоионизация). Спектральная зависимость коэффициента поглощения КЯ и СР.</p> <p>Правила отбора при межподзонных оптических переходах. Поляризационные зависимости коэффициента поглощения.</p> <p>Нелинейные оптические эффекты в твердотельных наноструктурах. Генерация второй и третьей гармоники. Эффект индуцированной прозрачности. Оптически активные среды на основе наноструктурированных материалов, их применение в оптику и оптоэлектронике.</p>		
3	Люминесценция в квантово-размерных структурах	<p>Фотолюминесценция (ФЛ). Описание сильно взаимодействующих электронной и фотонной подсистем в рамках квантовой электродинамики. Матрица Вигнера.</p> <p>Кинетическое уравнение для фотонов.</p> <p>Приближение слабого взаимодействия.</p> <p>Форма спектра ФЛ в КРС. Флуктуационно-диссипационная теорема. Влияние шероховатости границ КЯ на спектр ФЛ.</p> <p>Катодолюминесценция в КРС.</p> <p>Спектроскопия катодолюминесценции в одиночных квантовых точках.</p> <p>Полупроводниковые лазеры с возбуждением электронным пучком.</p> <p>Светоизлучающие структуры на основе кремния. ФЛ в наноструктурах Ge/Si.</p> <p>Нанокластеры Si в SiO₂.</p> <p>Нанокристаллический кремний. Фото- и электролюминесценция ионов редкоземельных элементов в кремнии.</p> <p>Механизмы передачи возбуждения.</p> <p>Люминесцентные свойства нитридов элементов III группы и КРС на их основе.</p> <p>Светодиоды на основе нитридов, излучающие в голубой части видимого диапазона и в УФ диапазоне.</p>	лекция	собеседование на лекции, тесты

4	Электрооптические свойства квантово-размерных структур	Эффект Штарка в КРС. Электрооптические модуляторы на основе КРС.	лекция	собеседование на лекции, тесты
5	Фотоэлектрические свойства квантово-размерных структур	Фотоэлектрические свойства КРС. ФотоЭДС и фототок в р-п переходах и барьерах Шоттки, содержащих квантово-размерные слои, при межзонном фотовозбуждении. Эмиссия фотовозбужденных носителей заряда из квантово-размерных слоев. ФотоЭДС на поверхностном барьере и в контакте полупроводник/электрлит. Фотопроводимость КРС при межподзонном фотовозбуждении. Детекторы ИК-излучения на основе КРС.	лекция	собеседование на лекции, тесты
6	Лазеры на основе квантово-размерных структур	Полупроводниковые лазеры на основе КРС. Температурная зависимость порогового тока. Инжекционные лазеры на основе массивов квантовых точек. Зависимость порогового тока и к.п.д. лазера от однородности массивов КТ. Вертикально-излучающие лазеры на основе квантово-размерных структур. Квантовые каскадные лазеры. Двухчастотные лазеры. Генерация излучения на разностной частоте.	лекция	собеседование на лекции, тесты
7	Нанопотоника и квантовые вычисления	Квантовые вычисления на основе твердотельных наноструктур. Кубиты на основе спинов электронов, локализованных в КТ. Приготовление спин-поляризованных состояний при помощи поляризованного фотовозбуждения. Кубиты на основе оптических фотонов. Генерация и детектирование одиночных фотонов при помощи нанопотозлектронных устройств.	лекция	собеседование на лекции, тесты

4. Образовательные технологии

В процессе изучения дисциплины "Нанопотоника" используются следующие образовательные технологии: на лекциях – диалоговая форма проведения лекций, проблемный метод изложения материала. Самостоятельная работа аспирантов связана с обработкой данных, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Осуществляется подготовка к зачету по вопросам

1. Физико-химические условия получения качественных классических и квантово-размерных полупроводниковых гетеропереходов (ГП) и гетероструктур. ГП. Влияние несоответствия кристаллических решеток на свойства гетероструктур (**ОПК 1**).
2. Построение энергетических диаграмм ГП по модели Шокли-Андерсена (**ОПК 1**).

3. Построение энергетических диаграмм ГП по Кремеру (ОПК 1).
4. Типы гетеропереходов (ОПК 1).
5. Специфические физические свойства ГП: односторонняя инжекция, электронное и оптическое ограничение, эффект широкозонного окна и др. (ПК 1).
6. Краткая характеристика кристаллической и электронной структуры ГП на основе элементов А4 (Si и SGe) (ОПК 1).
7. Краткая характеристика кристаллической и электронной структуры ГП на основе соединений АЗВ5 и их твердых растворов (ОПК 1).
8. Краткая характеристика основных методов получения ГП (ОПК 1).
9. Основные технические применения классических ГП и ГС (ПК 1).
10. Квантово-размерные ГС (КРС). Размерное квантование электронного газа и условия его проявления. Основные типы КРС (ОПК 1).
11. Энергетический спектр, плотность состояний и концентрация электронов в квантовых ямах (ОПК 1).
12. Энергетический спектр, плотность состояний и концентрация электронов в квантовых точках (ОПК 1).
13. Примесные и экситонные состояния в КЯ (ОПК 1).
14. Экситонное поглощение КРС (ОПК 1).
15. Получение и некоторые свойства ГКЯ и ГКТ на основе соединений АЗВ5. Основные их применения (ОПК 1).
16. Теория межзонной излучательной рекомбинации в трехмерных полупроводниках и КЯ (ОПК 1).
17. Общая характеристика люминесценции, ее видов, механизмов и методов исследования (ПК 1).
18. Общая характеристика фотолюминесценции ГКЯ спектров ФЛ ГКЯ типа InGaAs/GaAs. Связь спектра ФЛ со спектром поглощения (ОПК 1).
19. Электролюминесценция КРС. в рin-диодах. ЭЛ в барьерах Шоттки (ОПК 1).
20. Влияние неоднородности КЯ, электрического поля и температуры на спектр ФЛ (ОПК 1).
21. Спектроскопия ФЛ как метод диагностики ГКЯ. Спектроскопия возбуждения ФЛ (ПК 1).
22. Стимулированное излучение КРС. Инжекционные полупроводниковые лазеры (достоинства и недостатки) (ПК 1).
23. Преимущества лазеров на КРС. Структура лазеров на КРС. Пороговая плотность тока (ПК 1).
24. Коэффициент оптического поглощения и методика его определения (ПК 1).
25. Связь коэффициента межзонного поглощения с энергетическим спектром КРС (ОПК 1).
26. Эффект Штарка в ГКЯ. Оптические модуляторы (ПК 1).
27. Механизм возникновения фотовольтаического эффекта в КРС на основе GaAs при межзонном поглощении излучения в размерно-квантованных слоях (ОПК 1).
28. Барьерная фотопроводимость полупроводников и КРС на основе GaAs (ОПК 1).
29. Сравнение методических возможностей спектроскопии ФЛ и фотоэффектов (ПК 1).
30. Применение фотоэлектрической спектроскопии для исследования низкотемпературного дефектообразования в КРС (ПК 1).

31. Влияние толщины и состава тонкого двойного покровного слоя GaAs/InGaAs на энергетический спектр квантовых точек InAs/GaAs (ОПК 1).

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине
включающий:

6.1. *Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования.*

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1.

6.2. *Описание шкал оценивания*

«Зачтено» – владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, наличие хотя бы фрагментарных знаний по каждому из основных вопросов, способность критически анализировать и сравнивать получаемые научные результаты.

«Незачтено» – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией.

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование,
- тестирование.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии:

- практические контрольные задания, включающие одну или несколько задач (вопросов) в виде краткой формулировки действий (комплекса действий), которые следует выполнить, или описание результата, который нужно получить.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций.

Вопрос 1: Величина фототока, измеряемого при 77 К, возникающего при межзонном оптическом поглощении квантовых точек InAs/GaAs, встроенных в низколегированную область p-i-n диода, при подаче на диод обратного смещения

Варианты ответа:

1. Уменьшается
2. Увеличивается
3. Не изменяется

Шкала оценки:

зачет – ответ (2);

незачет – ответы (1, 3).

Вопрос 2: Сравните напряженности электрического поля направленного вдоль ($E_{||}$) поперек (E_{\perp}) квантовой ямы, необходимого для исчезновения экситонного пика в спектре поглощения.

Варианты ответа:

1. $E_{||} > E_{\perp}$

2. $E_{\parallel} < E_{\perp}$

3. $E_{\parallel} = E_{\perp}$

Шкала оценки:

зачет – ответ (2);

незачет – ответы (1, 3).

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания приведены в фонде оценочных средств.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 544 с. <http://e.lanbook.com> - доступ с компьютеров ФБ ННГУ.
2. И.А.Карпович, Д.О.Филатов. Фотоэлектрическая диагностика квантово-размерных гетероструктур. Учебное пособие. Н.Новгород: Изд. ННГУ, 1999.
3. Щука А. А. Нанoeлектроника. М.: Физматкнига. 2007. - 464 с.
4. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур //ФТП.-1998.- Т.32, №1.- с.3-18. <http://journals.ioffe.ru/ftp/>- доступ с компьютеров ННГУ.

б) дополнительная литература:

1. Л.Е. Воробьев, Е.Л. Ивченко, Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин. Оптические свойства наноструктур. С.-Пб, Наука, 2001.
2. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника, Техносфера, 2006. 588 с.
3. Х. Кейси, М.Паниш. Лазеры на гетероструктурах, т.1 и 2, М., Сов. радио, 1981.
4. Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры //ФТП, т.32, №4, с.385 (1998). <http://journals.ioffe.ru/ftp/>- доступ с компьютеров ННГУ.
5. О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов., А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства // ФТП, т. 34, № 11, с. 1281 (2000). <http://journals.ioffe.ru/ftp/>- доступ с компьютеров ННГУ.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории, наличием соответствующего спектрального (решеточный монохроматор Acton SpectraPro-558) и электроизмерительного оборудования (Lock-In Amplifier Stanford Research Systems SR510). Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ (уровень подготовки кадров высшей квалификации).

Автор:

к.ф.-мат. наук, доцент кафедры

физики полупроводников и оптоэлектроники

_____ А.П. Горшков

Рецензент:

заведующий кафедрой

электроники твердого тела

д.ф.-м.н. профессор

_____ Е.С. Демидов

Заведующий кафедрой

физики полупроводников и оптоэлектроники

д.ф.-м.н. профессор

_____ Д. А. Павлов

Программа рекомендована на заседании кафедры физики полупроводников и оптоэлектроники от _____ года, протокол № _____

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от _____ года, протокол № _____

ОПК-1 Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения	
	Не зачтено	Зачтено
Владеть современными методами исследований с использованием информационных технологий	Не владеет современными методами исследований с использованием информационных технологий	Владеет современными методами исследований с использованием информационных технологий
Знать основные проблемы в своей предметной области	Не знает основные проблемы в своей предметной области	Знает основные проблемы в своей предметной области
Уметь осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области	Не умеет осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области	Умеет осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области

ПК-1 Способность к методически грамотному изложению материала учебных дисциплин при чтении лекций, построении практических занятий, разработке учебных пособий и к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы, получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников»

Планируемые результаты обучения*(показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения	
	Не зачтено	Зачтено
31 (ПК-1) Знать базовую информацию в области физики полупроводников.	Не знает базовую информацию в области физики полупроводников	Знает базовую информацию в области физики полупроводников.

32 (ПК-1) Знать физические основы процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.	Не знает физические основы процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния	Знает физические основы процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния
33 (ПК-1) Знать физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и структур на их основе.	Не знает физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и структур на их основе	Знает физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и структур на их основе.
У1 Уметь самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты.	Не умеет самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты	Умеет самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты.
У2 (ПК-1) Уметь разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.	Не умеет разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния	Умеет разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.
У3 (ПК-1) Уметь исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур.	Не умеет исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур	Умеет исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур.
В1 Владеть способностями анализа, оценки и методами изложения научной информации в области физики полупроводников.	Не владеет способностями анализа, оценки и методами изложения научной информации в области физики полупроводников	Владеет способностями анализа, оценки и методами изложения научной информации в области физики полупроводников.
В2 (ПК-1) Владеть навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.	Не владеет навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния	Владеет навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.
В3 (ПК-1) Владеть навыками работы с исследовательским и контрольно-измерительным оборудованием для изучения оптических свойств полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур, в том числе при практических занятиях	Не владеет навыками работы с исследовательским и контрольно-измерительным оборудованием для изучения оптических свойств полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур, в том числе при практических занятиях	Владеет навыками работы с исследовательским и контрольно-измерительным оборудованием для изучения оптических свойств полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур, в том числе при практических занятиях