

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**федеральное государственное автономное**  
**образовательное учреждение высшего образования**  
**«Национальный исследовательский**  
**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

**УТВЕРЖДЕНО**  
решением Ученого совета ННГУ  
протокол от "30" ноября 2023 г. №13

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Нанопотоника»**

Уровень высшего образования  
**Подготовка научных и научно-педагогических кадров**

Программа аспирантуры  
**1.3.11. Физика полупроводников**

Научная специальность  
**03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ**

Форма обучения  
**Очная**

Нижний Новгород  
2023 год

## 1. Место и цель дисциплины в структуре ПА

Дисциплина «Нанопотоника» относится к числу *элективных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 2 году обучения в 3 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

Выпускник, освоивший программу, должен

### Знать:

- базовую информацию в области физики полупроводников.
- физические основы процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.

### Уметь:

- разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния.
- исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеронаноструктур.

### Владеть:

- способностями анализа, оценки и методами изложения научной информации в области физики полупроводников.
- навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния

## 3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

**Таблица 2**

**Структура 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	Консультации	Всего	
1. Введение	4	2				2	2
2. Оптические свойства квантово-размерных структур	12	6				6	6
3. Люминесценция в квантово-размерных структурах	12	6				6	6
4. Электрооптические свойства квантово-размерных структур	8	4				4	4
5. Фотоэлектрические свойства квантово-размерных структур	12	6				6	6

6. Лазеры на основе квантово-размерных структур	12	6				6	6
7. Нанопотоника и квантовые вычисления	12	6				6	6
<b>Промежуточная аттестация:</b>	зачет						
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>36</b>				<b>36</b>	<b>36</b>

**Таблица 3**

**Содержание дисциплины**

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование раздела дисциплины</b>	<b>Содержание раздела</b>	<b>Форма проведения занятия</b>	<b>Форма текущего контроля*</b>
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 при возбуждении линейно- и циркулярно-поляризованным светом. Эффект Рашба. Уширение края межзонного оптического поглощения. Обобщенная $\delta$ -функция Дирака. Гауссово (структурное) уширение. Лоренцево (термическое) уширение. Форма края межзонного поглощения в сверхрешетках (СР). Экситонное поглощение в КРС. Матричные элементы Ванье.	лекция	собеседование на лекции, тесты

		<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. Кинетическое уравнение для фотонов. Приближение слабого взаимодействия. Форма спектра ФЛ в КРС. Флуктуационно-диссипационная теорема. Влияние шероховатости границ КЯ на спектр ФЛ. Катодолюминесценция в КРС. Спектроскопия катодолюминесценции в одиночных квантовых точках. Полупроводниковые лазеры с возбуждением электронным пучком. Светоизлучающие структуры на основе кремния. ФЛ в наноструктурах Ge/Si. Нанокластеры Si в SiO<sub>2</sub>. Нанокристаллический кремний. Фото- и электролюминесценция ионов редкоземельных элементов в кремнии. Механизмы передачи возбуждения. Люминесцентные свойства нитридов элементов III группы и КРС на их основе. 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	<p>Фотоэлектрические свойства КРС. ФотоЭДС и фототок в p-n 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.</p>	лекция	собеседование на лекции, тесты
6	Лазеры на основе квантово-размерных структур	Полупроводниковые лазеры на основе КРС. Температурная зависимость порогового тока.	лекция	собеседование на лекции, тесты

		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.		
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. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа аспирантов связана с обработкой данных, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий.

*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.
2. Построение энергетических диаграмм ГП по модели Шокли-Андерсена.
3. Построение энергетических диаграмм ГП по Кремеру.
4. Типы гетеропереходов.
5. Специфические физические свойства ГП: односторонняя инжекция, электронное и оптическое ограничение, эффект широкозонного окна и др.
6. Краткая характеристика кристаллической и электронной структуры ГП на основе элементов А4 (Si и SGe).
7. Краткая характеристика кристаллической и электронной структуры ГП на основе соединений АЗВ5 и их твердых растворов.
8. Краткая характеристика основных методов получения ГП.
9. Основные технические применения классических ГП и ГС.
10. Квантово-размерные ГС (КРС). Размерное квантование электронного газа и условия его проявления. Основные типы КРС.
11. Энергетический спектр, плотность состояний и концентрация электронов в квантовых ямах.
12. Энергетический спектр, плотность состояний и концентрация электронов в квантовых точках.
13. Примесные и экситонные состояния в КЯ.
14. Экситонное поглощение КРС.
15. Получение и некоторые свойства ГКЯ и ГКТ на основе соединений АЗВ5. Основные их применения.
16. Теория межзонной излучательной рекомбинации в трехмерных полупроводниках и КЯ.

17. Общая характеристика люминесценции, ее видов, механизмов и методов исследования.
18. Общая характеристика фотолюминесценции ГКЯ спектров ФЛ ГКЯ типа InGaAs/GaAs. Связь спектра ФЛ со спектром поглощения.
19. Электролюминесценция КРС. в рin-диодах. ЭЛ в барьерах Шоттки.
20. Влияние неоднородности КЯ, электрического поля и температуры на спектр ФЛ.
21. Спектроскопия ФЛ как метод диагностики ГКЯ. Спектроскопия возбуждения ФЛ.
22. Стимулированное излучение КРС. Инжекционные полупроводниковые лазеры (достоинства и недостатки).
23. Преимущества лазеров на КРС. Структура лазеров на КРС. Пороговая плотность тока.
24. Коэффициент оптического поглощения и методика его определения.
25. Связь коэффициента межзонного поглощения с энергетическом спектром КРС.
26. Эффект Штарка в ГКЯ. Оптические модуляторы.
27. Механизм возникновения фотовольтаического эффекта в КРС на основе GaAs при межзонном поглощении излучения в размерно-квантованных слоях.
28. Барьерная фотопроводимость полупроводников и КРС на основе GaAs.
29. Сравнение методических возможностей спектроскопии ФЛ и фотоэффектов.
30. Применение фотоэлектрической спектроскопии для исследования низкотемпературного дефектообразования в КРС.
31. Влияние толщины и состава тонкого двойного покровного слоя GaAs/InGaAs на энергетический спектр квантовых точек InAs/GaAs.

## **5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине**

### ***5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.***

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

**Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета**

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой</b>
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

**5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине**

*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.  $E_{||} < E_{\perp}$
3.  $E_{||} = E_{\perp}$

*Шкала оценки:*

зачет – ответ (2);

незачет – ответы (1, 3).

**6. 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. Шука 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.

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;

- материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;

- лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
- обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

ресурсам.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Автор:

к.ф.-мат. наук,

\_\_\_\_\_ А.П. Горшков

Рецензент:



д.ф.-м.н. профессор

\_\_\_\_\_ Е.С. Демидов

Заведующий кафедрой

д.ф.-м.н. профессор

\_\_\_\_\_ Д. А. Павлов

**Программа одобрена** на заседании методической комиссии физического факультета от  
\_\_\_\_\_ 2022 года, протокол № б/н