

**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 «02» декабря 2024 г. №  
10

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

Уровень высшего образования  
**Подготовка кадров высшей квалификации**

Научная специальность  
**1.3.11. Физика полупроводников**

Программа подготовки  
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
**Физика полупроводников**

Форма обучения  
**Очная**

Нижегород  
2025 год

## 1. Место и цель дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Нанофотоника» 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              |                           |                            |              |       | Самостоятельная работа обучающегося, часов |
|---|--------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------|-------|--|
|   |              | Контактная работа, 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**

| № 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 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.</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 SiO<sub>2</sub>.</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 | <p>Фотоэлектрические свойства КРС. ФотоЭДС и фототок в p-n переходах и барьерах Шоттки, содержащих квантово-размерные слои, при межзонном фотовозбуждении.</p> <p>Эмиссия фотовозбужденных носителей заряда из квантово-размерных слоев.</p> <p>ФотоЭДС на поверхностном барьере и в контакте полупроводник/электрлит.</p> <p>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.<br>Вертикально-излучающие лазеры на основе квантово-размерных структур.<br>Квантовые каскадные лазеры.<br>Двухчастотные лазеры. Генерация излучения на разностной частоте.                                |        |                                |
| 7 | Нанофотоника 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.<br>Кубиты на основе оптических фотонов. Генерация и детектирование одиночных фотонов при помощи нанофотоэлектронных 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 p-n-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 энергетическим 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. 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. Шукин, 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