

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

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Нанопотоника

Уровень высшего образования

Магистратура

Направление подготовки / специальность

11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника

Направленность образовательной программы

Твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.03 Нанопотоника относится к обязательной части образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК ОС-5: Способность проводить инновационную научно-исследовательскую деятельность с применением фундаментальных знаний о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учетом современных тенденций развития нанотехнологий	ОПК ОС-5.1: Знает фундаментальные основы нанотехнологий, физические свойства систем с пониженной размерностью ОПК ОС-5.2: Знает современные тенденции развития нанотехнологий и умеет учитывать их в своей профессиональной деятельности ОПК ОС-5.3: Способен проводить инновационную научно-исследовательскую деятельность с применением фундаментальных знаний о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учетом современных тенденций развития нанотехнологий	ОПК ОС-5.1: знать: основные проблемы в своей предметной области, базовую информацию в области физики полупроводников, физические основы процессов в области физики полупроводников, конденсированного состояния, низкоразмерных структур, физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и квантово-размерных структур на их основе. ОПК ОС-5.2: уметь: осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области, самостоятельно планировать и проводить физические эксперименты в области полупроводников и полупроводниковых наноструктур и анализировать их результаты, разрабатывать новые модели физических процессов в области физики полупроводников и физики конденсированного состояния,	Отчет по лабораторным работам	Экзамен: Задания

		<p>исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово- размерных гетеронаноструктур</p> <p>ОПК ОС-5.3: владеть: современными методами исследований с использованием информационных технологий, способностями анализа и оценки научной информации в области физики полупроводников, конденсированного состояния, низкоразмерных структур, навыками моделирования физических процессов в области физики полупроводников, конденсированного состояния, низкоразмерных структур, навыками работы с исследовательским и контрольно-измерительным оборудованием для изучения оптических свойств полупроводниковых квантово- размерных гетеронаноструктур.</p>		
--	--	--	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	4
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	2
самостоятельная работа	42
Промежуточная аттестация	36
	Экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Введение	4	2	0	2	2
Оптические свойства квантово-размерных структур	28	6	16	22	6
Люминесценция в квантово-размерных структурах	12	6	0	6	6
Электрооптические свойства квантово-размерных структур	10	4	0	4	6
Фотоэлектрические свойства квантово-размерных структур	34	6	16	22	12
Лазеры на основе квантово-размерных структур	10	6	0	6	4
Нанопотоника и квантовые вычисления	6	2	0	2	4
Промежуточный контроль	2			0	2
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	144	32	32	66	42

Содержание разделов и тем дисциплины

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. Наноэлектроника. Нанопотоника как наука о взаимодействии света с веществом в наноразмерных структурах. Оптоэлектронные приборы на основе твердо-тельных наноструктур. Основные преимущества по сравнению с традиционными оптоэлектронными прибора-ми. Существующие и потенциальные области применения.

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 меж-зонных оптических переходов. Коэффициент оптического поглощения квантовых ям (КЯ), систем квантовых нитей (КН) и квантовых точек (КТ).

Люминесценция в квантово-размерных структурах: Фотолюминесценция (ФЛ). Описание сильно взаимодействующих электронной и фотонной подсистем в рамках кватовой 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. Католюминесценция 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 SiO₂. 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.

Электрооптические 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/электролит.

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 одно-родности массивов КТ.

Вертикально-излучающие лазеры на основе квантово-размерных структур. Квантовые каскадные лазеры. Двухчастотные лазеры. Генерация излучения на разностной частоте.

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 нанопотенциальных устройств.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Карпович И. А. Фотоэлектрическая диагностика квантово-размерных гетероструктур : учеб. пособие / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. - Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 1999. - 80 с. - 12.00.

Горшков А.П. Исследование энергетического спектра гетеронаноструктур с квантовыми точками InAs/GaAs методами спектроскопии фототока в барьере Шоттки и конденсаторной фотоэдс / ННГУ 2008, 16 с.

Волкова Н.С. ОБЪЕМНАЯ И БАРЬЕРНАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2022. – 23 с.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ОПК ОС-5:

1. Что такое самоорганизованные квантовые точки (КТ) ? Почему происходит самоорганизация? Энергетический спектр и плотность состояний в КТ.

2. Получение гетеронаноструктур с КТ.
3. Свойства приповерхностной области GaAs и n-s- перехода.
4. Механизм возникновения объемной и барьерной фотопроводимости в области межзонного поглощения матрицы и квантово-размерного слоя.
5. Как в экспериментально определить природу наблюдаемой фотопроводимости?
6. Что такое фоточувствительность?
7. Достоинства и недостатки метода спектроскопии фотопроводимости.
8. Опишите экспериментальную установку для измерения фотоэлектрических спектров.
9. Получение КТ.
10. Что такое барьер Шоттки? Свойства приповерхностной области GaAs на контакте с металлом и на свободной поверхности.
11. Механизм возникновения фотовольтаического эффекта на барьерах в в области межзонного поглощения матрицы и квантово-размерного слоя.
12. Способы линеаризации фотоэдс в барьере Шоттки и конденсаторной фотоэдс.
13. Что такое фоточувствительность?
14. При каких условиях спектр фоточувствительности КТ повторяет спектр оптического поглощения?
15. Достоинства и недостатки разных методов фотоэлектрической спектроскопии.

Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Выполнены все лабораторные работы
не зачтено	Лабораторные работы не выполнены

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие	При решении	Продемонс	Продемонс	Продемонс	Продемонс	Продемонстр

	минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	трированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	трированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	трированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	трированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	трированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ОПК ОС-5

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

30. Применение фотоэлектрической спектроскопии для исследования низкотемпературного дефектообразования в КРС. (ОПК ОС-5)

31. Влияние толщины и состава тонкого двойного покровного слоя GaAs/InGaAs на энергетический спектр квантовых точек InAs/GaAs. (ОПК ОС-5)

Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Превосходная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу, творческое мышление и знание современных научных работ по теме предмета.
отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
очень хорошо	Очень хорошая подготовка. Студент показывает очень хороший уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, но не отвечает на дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
плохо	Уровень знаний ниже порогового или полное отсутствие знаний. Для принятия окончательного решения необходимо назначить комиссию по переэкзаменовке.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Карпович И. А. Фотоэлектрическая диагностика квантово-размерных гетероструктур : учеб. пособие / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. - Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 1999. - 80 с. - 12.00., 2 экз.
2. Шука Александр Александрович. Нанoeлектроника : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки "Прикладные математика и физика" / под общ. ред. Ю.

В. Гуляева. - М. : Физматкнига, 2007. - 464 с. - (Электроника / МФТИ). - ISBN 978-5-89155-163-3 : 203.20., 12 экз.

3. Розеншер Э. Оптоэлектроника / пер. с фр. ; под ред. О. Н. Ермакова. - М. : Техносфера, 2006. - 592 с. - (Мир электроники ; 7 - 04). - ISBN 5-94836-031-8 : 325-00., 2 экз.

Дополнительная литература:

1. Кейси Х. Лазеры на гетероструктурах : в 2 т. [Т.] 1. Основные принципы / пер. с англ. А. Е. Дракина ; под ред. П. Г. Елисеева. - М. : Мир, 1981. - 299 с. : ил. - 2.80., 2 экз.

2. Кейси Х. Лазеры на гетероструктурах : в 2 т. [Т.] 2. Материалы. Рабочие характеристики / пер. с англ. Б. Н. Свердлова ; под ред. П. Г. Елисеева. - М. : Мир, 1981. - 364 с. : ил. - 3.60., 3 экз.

3. Оптические свойства наноструктур : учеб. пособие для вузов / под общ. ред. В. И. Ильина, А. Я. Шика. - СПб. : Наука, 2001. - 188 с. : ил. - (Новые разделы физики полупроводников). - Федер. целевая программа "Гос. поддержка интеграции высш. образования и фундам. науки на 1997-2000 гг.". - ISBN 5-02-024 : 28.00., 10 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, специализированным оборудованием: Установка для измерения фотоэлектрических спектров

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 11.04.04 - Электроника и наноэлектроника.

Автор(ы): Горшков Алексей Павлович, кандидат физико-математических наук, доцент.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 09.01.2024, протокол № б/н.