

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 Ученого совета ННГУ
протокол № 13 от 30.11.2022 г.

Рабочая программа дисциплины

Нанопотоника

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
03.04.02 - Физика

Направленность образовательной программы
магистерская программа «Физика конденсированного состояния»

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Нанопотоника» относится к дисциплинам вариативной части основной образовательной программы «Физика конденсированного состояния» по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

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

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
ПК-3. Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	<i>ПК-3.1. Знание основных законов физики ПК-3.2. Умение решать научно-инновационные задачи в своей инновационной и проектной деятельности ПК-3.3. Навыки применения результатов научных исследований в инновационной и проектной деятельности и зарубежного опыта</i>	(ПК-3) Знать основные проблемы в своей предметной области, базовую информацию в области физики полупроводников, физические основы процессов в области физики полупроводников, конденсированного состояния, низко-размерных структур, физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и квантово-размерных структур на их основе; (ПК-3) 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	Задания лабораторного практикума, тест	Вопросы к экзамену

		<p>состояния, исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово-размерных гетеронано-структур;</p> <p>(ПК-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 гетеронано-структур.</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):	64
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	-
самостоятельная работа	80
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 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	28	6	0	16	22	6
3. Люминесценция в квантово-размерных структурах	12	6	0	0	6	6
4. Электрооптические свойства квантово-размерных структур	10	4	0	0	4	6
5. Фотоэлектрические свойства квантово-размерных структур	34	6	0	16	22	12
6. Лазеры на основе квантово-размерных структур	10	6	0	0	6	4
7. Нанопотоника и квантовые вычисления	6	2	0	0	2	4
Промежуточный контроль	2	0	0	0	0	2
Промежуточная аттестация – экзамен						

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа включает в себя теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы, и выполнение лабораторных работ:

1. Фотопроводимость в гетеронаноструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs.
2. Исследование гетеронаноструктур с квантовыми точками InAs/GaAs методами спектроскопии конденсаторной фотоЭДС и фотоЭДС в барьере Шоттки.

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

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

При выставлении экзаменационной оценки, т.е. в ходе промежуточной аттестации, применяется семибалльная шкала, которая по окончании обучения (в дипломе магистра) трансформируется в пятибалльную. Обе шкалы привязаны к 100-балльной системе, в которой баллы набираются в ходе текущего контроля при сдаче допусков и отчетов по лабораторным работам и непосредственно на экзамене. По итогам освоения дисциплины сдается экзамен.

Баллы	Оценка	Описание шкалы оценивания
95-100	5	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и

90-94	отлично	дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
85-89		
80-84	4 хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
75-79		
70-74		
67-69	3 удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, но не отвечает на дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
64-66		
60-63		
40-59	2 неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
< 40		
< 40	1 плохо	Уровень знаний ниже порогового или полное отсутствие знаний. Для принятия окончательного решения необходимо назначить комиссию по переекзаменовке.

6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

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

– индивидуальное собеседование.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии: практические контрольные задания. Типы практических контрольных заданий:

– *практические контрольные задания, включающие один или несколько вопросов и тесты.*

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1. *Тестовые задания* для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Вопрос 1: При увеличении ширины квантовой ямы расстояние между соседними электронными подзонами

Варианты ответа:

1. Уменьшается
2. Увеличивается
3. Не изменяется

Шкала оценки:

5 баллов – ответ (1);

0 баллов – ответы (2, 3).

Вопрос 2: Линейном по полю красном смещении и сужению экситонного пика

1. Квадратичном по полю голубом смещении и сужению экситонного пика

2. Линейном по полю голубом смещении и сужению экситонного пика
3. Квадратичном по полю голубом смещении и уширении экситонного пика
4. Квадратичном по полю красном смещении и уширении экситонного пика

Шкала оценки:

5 баллов – ответ (5);

0 баллов – ответы (1, 2, 3, 4).

6.3.2. Вопросы к лабораторной работе:

Вопросы к лабораторной работе «Фотопроводимость в гетеронаноструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs»:

1. Что такое самоорганизованные квантовые точки (КТ)? Почему происходит самоорганизация? Энергетический спектр и плотность состояний в КТ.
2. Получение ГНС 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 экспериментально определить природу наблюдаемой фотопроводимости?
6. Что такое фоточувствительность?
7. Достоинства и недостатки метода спектроскопии фотопроводимости.
8. Опишите экспериментальную установку для измерения фотоэлектрических спектров.

Задания

1. Измерить зависимость фотопроводимости в области собственного поглощения GaAs ($h\nu=1.5$ эВ) от интенсивности модулированного освещения и построить зависимость $V\Phi(J_0)$ в двойном логарифмическом и полулогарифмическом масштабах. Для изменения интенсивности использовать калиброванные металлические сетки. Определить границу линейного участка характеристики. Установкой соответствующей сетки выбрать начальный уровень фотовозбуждения для измерения спектра в области высокой фоточувствительности (при $h\nu=1.5$ эВ) в линейном режиме.
2. Измерить зависимость фотопроводимости в области собственного поглощения GaAs ($h\nu=1.5$ эВ) от интенсивности постоянной подсветки и построить зависимость $V\Phi(J_0)$ в двойном логарифмическом масштабе.
3. Измерить спектр фотопроводимости. При переходе в спектральную область с низкой фоточувствительностью для повышения уровня сигнала сетку убрать.
4. Сделать вывод о природе наблюдаемой фотопроводимости. Определить энергию основного и возбужденных переходов в КТ
5. Оценить точность измерений спектра.

Вопросы к лабораторной работе «Исследование гетеронаноструктур с квантовыми точками InAs/GaAs методами спектроскопии конденсаторной фотоЭДС и фотоЭДС в барьере Шоттки»:

1. Что такое самоорганизованные квантовые точки? Почему происходит самоорганизация. Энергетический спектр и плотность состояний в КТ.
2. Получение ГНС с КТ.
3. Что такое барьер Шоттки? Свойства приповерхностной области GaAs на контакте с металлом и на свободной поверхности.
4. Механизм возникновения фотовольтаического эффекта на барьерах в области межзонного поглощения матрицы и квантово-размерного слоя.
5. Способы линеаризации фотоЭДС в барьере Шоттки и конденсаторной фотоЭДС.
6. Что такое фоточувствительность?
7. При каких условиях спектр фоточувствительности КТ повторяет спектр оптического поглощения?

8. Достоинства и недостатки методов фотоэлектрической спектроскопии ФБШ и КФЭ.
9. Опишите экспериментальную установку для измерения фотоэлектрических спектров.

Задания

1. Измерить зависимость фотоэдс в барьере Шоттки в области собственного поглощения GaAs ($h\nu=1.5$ эВ) от интенсивности модулированного освещения в режиме автоподсветки и построить зависимость $V_F(J_0)$ в двойном логарифмическом масштабе. Для изменения интенсивности использовать калиброванные металлические сетки. Определить верхнюю границу линейного участка характеристики. Установкой соответствующей сетки выбрать начальный уровень фотовозбуждения для измерения спектра в области высокой фоточувствительности (при $h\nu=1.5$ эВ) в линейном режиме.
2. Измерить спектр ФБШ. При переходе в спектральную область с низкой фоточувствительностью для повышения уровня сигнала сетку убрать. Измерить спектры фотоэдс в линейном и для сравнения в нелинейных режимах.
3. Измерить зависимость фотосигнала при $h\nu=1.5$ эВ от сопротивления нагрузки. Определить допустимое максимальное сопротивление нагрузки, при котором реализуется токовый режим измерений (фотосигнал линейно уменьшается при уменьшении сопротивления нагрузки). В режиме фототока убедиться в линейной зависимости фотосигнала от интенсивности освещения при максимальной интенсивности. Измерить спектр фототока в барьере Шоттки.
4. Выполнить задания 1) и 2) для КФЭ.
5. Провести анализ полученных фотоэлектрических спектров:
6. Определить пороговые энергии оптических переходов в GaAs, квантовой яме смачивающего слоя InAs и в КТ исследованных ГНС. Для GaAs и смачивающего слоя их определять по значению энергии фотонов $h\nu_{0.5}$, при которой фоточувствительность в соответствующей полосе уменьшается в два раза от максимального значения.
7. Определить значения нормированной фоточувствительности и оценить значения коэффициента оптического поглощения в смачивающем слое и в КТ, оценить по формуле (5) поверхностную концентрацию КТ. Ширину пика основного перехода в КТ принять равной его удвоенной полуширине на половине высоты.
8. Выяснить, в чем проявляется влияние нелинейности фотосигнала на фотоэлектрических спектрах.

6.3.3. Экзаменационные вопросы:

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 A4 (Si и SGe).
7. Краткая характеристика кристаллической и электронной структуры ГП на основе соединений A3B5 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 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.

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утверждённое приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,
Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения.

Автоматизированная установка для исследования фотоэлектрических спектров полупроводниковых гетеронаноструктур.

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 федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

доцент кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники к.ф.-м.н., доцент, А.П. Горшков.

Рецензент(ы):

заведующий кафедрой физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники, д.ф.-м.н. профессор, Д.А. Павлов.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 17.11.2022, протокол № б/н.