

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 № 7 от 28.06.2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Нанопотоника

---

Уровень высшего образования  
Магистратура

---

Направление подготовки / специальность  
11.04.04 - Электроника и наноэлектроника

---

Направленность образовательной программы  
Новые полупроводниковые технологии

---

Форма обучения  
очная

---

г. Нижний Новгород

2023 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,  ОПК ОС-5.2: знать физические основы технологии выращивания полупроводниковых материалов и квантово-размерных структур на их основе.  ОПК ОС-5.3: 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 состояния,	Допуск к лабораторной работе Тест Задания	Экзамен: Контрольные вопросы

		<p>исследовать оптоэлектронные свойства полупроводниковых квантово- размерных гетеронаноструктур 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
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>4</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>144</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	2
<b>самостоятельная работа</b>	<b>42</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b>
	<b>Экзамен</b>

#### 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/ лабора торные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
1. Введение	4	2		2	2
2. Оптические свойства квантово-размерных структур	30	6	16	22	8
3. Люминесценция в квантово-размерных структурах	12	6		6	6
4. Электрооптические свойства квантово-размерных структур	10	4		4	6
5. Фотоэлектрические свойства квантово-размерных структур	34	6	16	22	12
6. Лазеры на основе квантово-размерных структур	10	6		6	4
7. Нанофотоника и квантовые вычисления	6	2		2	4
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	144	32	32	66	42

### Содержание разделов и тем дисциплины

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. Нанофотоника 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.

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 –функция Дирака. Гауссово (структурное) уширение. Лоренцево (термическое) уширение. Форма края межзонного поглощения в сверхрешетках (СР). Экситонное поглощение в КРС. Матричные элементы Ванье. Межподзонные переходы в КРС. Матричный элемент межподзонных переходов. Переходы из размерно- квантованных состояний в непрерывный спектр (фотоионизация). Спектральная зависимость коэффициента поглощения КЯ и СР. Правила отбора при межподзонных оптических переходах. Поляризационные зависимости

коэффициента поглощения. 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.

3 Люминесценция в квантово-размерных структурах 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. Катоделюминесценция в КРС. Спектроскопия катоделюминесценции в одиночных квантовых точках. Полупроводниковые лазеры с возбуждением электронным пучком. Светоизлучающие структуры на основе кремния. ФЛ в нано-островках 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.

4 Электрооптические свойства квантово-размерных структур Эффект Штарка в КРС. Электрооптические модуляторы на основе КРС.

5 Фотоэлектрические свойства квантово-размерных структур Фотоэлектрические свойства КРС. Фото ЭДС 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/электролит. Фотопроводимость КРС при межподзонном фотовозбуждении. Детекторы ИК-излучения на основе КРС.

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.

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 нанопотонных 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.

В процессе изучения дисциплины "Нанопотоника" используются следующие образовательные технологии: на лекциях – диалоговая форма проведения лекций; на лабораторных занятиях – проблемный метод изложения материала и непосредственное выполнение физических экспериментов. Самостоятельная работа студентов связана с обработкой полученных экспериментальных данных, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий.

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

#### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе) для оценки сформированности компетенции ОПК ОС-5:**

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 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.

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 кон- такте 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.

**Критерии оценивания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе)**

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Успешное выполнение практических заданий, выданных преподавателем, владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить точки активного роста нового знания.
не зачтено	Невыполнение практических заданий, выданных преподавателем, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации.

**5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ОПК ОС-5:**

*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).

### Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Успешное выполнение практических заданий, выданных преподавателем, владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить точки активного роста нового знания.
не зачтено	Невыполнение практических заданий, выданных преподавателем, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации.

### 5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Задания) для оценки сформированности компетенции ОПК ОС-5:

Лабораторная работа «Фотопроводимость в гетеронаноструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs»

- 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
- 3) собственного поглощения GaAs ( $h\nu=1.5$  эВ) от интенсивности постоянной подсветки и построить зависимость  $V\Phi(J_0)$  в двойном логарифмическом масштабе.
- 4) Измерить спектр фотопроводимости. При переходе в спектральную область с низкой фоточувствительностью для повышения уровня сигнала сетку убрать.
- 5) Сделать вывод о природе наблюдаемой фотопроводимости. Определить энергию основного и возбужденных переходов в КТ
- 6) Оценить точность измерений спектра.

Лабораторная работа «Исследование энергетического спектра гетеронаноструктур с квантовыми точками InAs/GaAs методами спектроскопии фототока в барьере Шоттки и конденсаторной фотоэдс»

- 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  $V\Phi(J_0)$  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

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Успешное выполнение практических заданий, выданных преподавателем, владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить точки активного роста нового знания.
не зачтено	Невыполнение практических заданий, выданных преподавателем, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации.

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

#### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			

<b>(индикатор достижения)</b>							
<u><b>Знания</b></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><b>Умения</b></u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u><b>Навыки</b></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 некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
<b>зачтено</b>	<b>превосходно</b>	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
	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»

	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	<b>удовлетворительно</b>	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»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	<b>плохо</b>	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 - Контрольные вопросы) 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
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 In-GaAs/GaAs. Связь спектра ФЛ со спектром поглощения.
19. Электролюминесценция КРС. в *pin*-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.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
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», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «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»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

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

Основная литература:

1. Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника / Игнатов А. Н. - 4-е изд., стер. - Санкт-

Петербург : Лань, 2020. - 596 с. - Библиогр.: доступна в карточке книги, на сайте ЭБС Лань. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-5149-4.,

<https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=707934&idb=0>.

2. 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.

3. Щука А. А. Нанoeлектроника : учебник / А. А. Щука ; под общей редакцией А. С. Сигова. - Москва : Юрайт, 2023. - 297 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-9916-8280-0. - Текст : электронный // ЭБС "Юрайт"., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=847604&idb=0>.

#### Дополнительная литература:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

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

1. 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.

2. 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.

3. 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 (модуля)**

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, специализированным оборудованием: Учебно-лабораторные интерактивные комплексы «Схемотехника радиофотоники» (рук. Бобров А.И., г. Н. Новгород, пр-кт Гагарина, д.23 корп.3, ауд. 121, ауд.226, ауд. 228, ауд. 339, ауд.534) и «Технологии интегральных схем» (рук. Дорохин М.В., г. Н. Новгород, пр-кт Гагарина, д.23 корп.3, ауд.412а, ауд.437) для проведения занятий со студентами с использованием современного технологического оборудования, современных условий производства (чистых зон), современных методов измерений характеристик изделий микроэлектроники, предусмотренных программой, оснащенный

- чистой зоной (ISO-7) для обеспечения технологического процесса и ознакомления студентов с правилами работы в чистых помещениях;
- высокотехнологичным оборудованием;
- фемтосекундный лазер FX200 – для исследования динамических эффектов в элементах оптоэлектроники, развития методической базы и привлечения студентов к современным методам измерений характеристик оптоэлектронных компонент;
- пикосекундный лазер PX110 – для исследования динамических эффектов в элементах оптоэлектроники, элемент технологического цикла оптоэлектроники, разработка новой технологической линейки с использованием методов лазерного отжига, обучение студентов современным технологическим процессам;
- установка микросварки RM-BW – технологический компонент для присоединения контактов к полупроводниковым компонентам, обучение студентов практическим навыкам работы на автоматизированном монтажном оборудовании.

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): Дорохин Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент.

Заведующий кафедрой: Нохрин Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 20.05.2023, протокол № б/н.