

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования_
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Физико-технологические модели полупроводниковых лазерных
излучателей

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
02.04.02 - Фундаментальная информатика и информационные технологии

Направленность образовательной программы
Автоматизация научных исследований

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.05.02 Физико-технологические модели полупроводниковых лазерных излучателей относится к части, формируемой участниками образовательных отношений 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
ПК-1: Способен руководить научными исследованиями и опытно-конструкторскими разработками, в области информатики и информационных технологий (ФИИТ), и формировать их новые направления в области профессиональной деятельности	ПК-1.1: Знает проблематику и методы научных исследований и опытно-конструкторских разработок в области ФИИТ применительно к профессиональной деятельности ПК-1.2: Имеет навыки выполнения научных исследований и опытно-конструкторских разработок в области ФИИТ применительно к профессиональной деятельности ПК-1.3: Имеет навыки руководства исследованиями и опытно-конструкторскими разработками в области ФИИТ применительно к профессиональной деятельности, и формирования их новых направлений	ПК-1.1: Знание основных принципов, лежащих в основе работы полупроводниковых лазерных излучателей, а также новейшего отечественного и зарубежного опыта в этой области ПК-1.2: Умение использовать базовые знания радиофизики при изучении полупроводниковых лазеров, а также при использовании их в научно-исследовательской деятельности ПК-1.3: Владение опытом использования фундаментальных разделов лазерной физики и технологии создания полупроводниковых лазеров при решении новых научно-исследовательских задач, в том числе - на уровне опытно-конструкторских разработок	Опрос	Экзамен: Задания Контрольные вопросы

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)	0
- КСР	2
самостоятельная работа	65
Промежуточная аттестация	45 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
ТВведение. Общие принципы работы лазеровема 1	6	2	0	2	4
Активная полупроводниковая среда. Специфика условий создания инверсии в полупроводниках	10	4	0	4	6
Потери и усиление в полупроводниковых излучателях	6	2	0	2	4
Основы технологии изготовления полупроводниковых многослойных структур	10	4	0	4	6
Волноводные свойства излучателя. Оптический резонатор	8	2	0	2	6
Основные характеристики излучения полупроводникового лазера	18	6	0	6	12
Лазеры с распределенной обратной связью	12	4	0	4	8
Лазеры с вертикальным резонатором	12	4	0	4	8
Современные тенденции в развитии технологии полупроводниковых лазерных систем	15	4	0	4	11
Аттестация	45				
КСР	2			2	
Итого	144	32	0	34	65

Содержание разделов и тем дисциплины

.Введение. Исторический обзор. Полупроводниковый инжекционный лазер как наиболее перспективный ОКГ. Структура канала оптической связи. Основные виды систем оптической передачи информации

Полупроводниковый инжекционный лазер как источник излучения

1. Принцип работы полупроводникового лазера (ПЛ). Оптические гетероструктуры. Процессы излучательной рекомбинации. Инверсия и усиление в полупроводниковой активной среде.
2. Физические параметры и рабочие характеристики ПЛ. Квантовая эффективность. Диаграмма направленности излучения. Спектрально-энергетические свойства излучателей.
3. Шумовые свойства полупроводникового лазера. Стабильность и надежность лазерных диодов.
4. Модуляционные свойства полупроводникового лазера. Релаксационный пик. Полоса модуляции. СВЧ-особенности при модуляции лазерного излучения.

Типы современных ПЛ, применяемых в системах связи.

1. Гетероструктурные лазеры. Особенности создания усиления в гетероструктурах. Волноводные свойства и геометрия полосковых полупроводниковых лазеров. Спектральные характеристики излучения. Температурные зависимости параметров лазерных излучателей.
2. Лазеры с распределенной обратной связью. Брэгговские решетки как основная специфическая особенность лазеров с РОС. Формирование РОС в полупроводниках - особенности технологии. Резонаторные спектральные характеристики в лазерах с РОС. Одночастотность излучения в лазерах с РОС.
3. Лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL). Технология изготовления ЛВР. Основные отличия ЛВР от лазеров с торцевым выходом излучения. Формирование брэгговских зеркал. Пороговое условие в ЛВР. Спектральные характеристики излучения в ЛВР. ЛВР с оптической накачкой. ЛВР с внешним составным резонатором. Лазеры ближнего и среднего ИК-диапазона.

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

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. КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И МОДЕЛИ: Учебное пособие.
— Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2022. - 105 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 - Опрос) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

В чем заключается основное отличие для 3-х и 4-уровневых схем при создании инверсии в активной
--

среде?
Объяснить эквивалентность 4-уровневой схемы при рассмотрении полупроводниковой активной среды
Изобразить энергетическую схему лазерного диода на гетероструктуре
Почему в квантоворазмерных активных слоях происходит увеличение запрещенной зоны?
Что произойдет с порогом генерации при уменьшении квантового выхода люминесценции?
Чем определяется оптимальная толщина активного слоя в полупроводниковой среде, при которой порог имеет наименьшее значение?
К чему приводит наличие дополнительного волновода внутри активной зоны?
Как можно охарактеризовать спонтанное излучение в полупроводниковом лазере?
Чем ограничивается максимальный объем активного слоя в лазере?
Каким способом и за счет каких параметров можно увеличить мощность генерации лазерного диода?
Чем определяется частота генерации в резонаторах с селективными и неселективными потерями?
Какой физический смысл имеют параметры внутреннего и внешнего квантового выхода ?
Чем объясняется наблюдаемое переключение мод в спектре генерации при изменении тока накачки?
С какими внутренними параметрами связана диаграмма направленности излучения лазера?
Почему с увеличением длины резонатора в полупроводниковом лазере мощность генерации при постоянном токе сначала растет, а потом падает?

Критерии оценивания (оценочное средство - Опрос)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Правильные ответы на вопросы, соответствующие сформированности компетенции

Оценка	Критерии оценивания
не зачтено	Неправильные ответы на вопросы, отсутствие сформированной компетенции

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

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор 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 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 отдельным и 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>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 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
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 ПК-1

1. Почему сложно реализовать полупроводниковые лазеры в диапазонах $\lambda < 0,4$ мкм и $\lambda > 4$ мкм?
2. Проанализируйте преимущества и недостатки возможных полупроводниковых источников оптического излучения при использовании их в спектроскопии ИК-диапазона.
3. Обосновать необходимость многокомпонентных материалов для приготовления диодных структур. Преимущества и недостатки соединения AlGaAs как материала для лазерных диодов. Привести пример материалов для диодной структуры на «телекоммуникационный» диапазон $\sim 1,3$ мкм
4. **Задача.** Считая одно зеркало в резонаторе Фабри-Перо "глухим" ($R_1 = 1$), а другое полупрозрачным ($R_2 = R$), найдите зависимость мощности лазера от R . Существует ли оптимальная величина R ?
5. **Задача.** Резонатор инжекционного полупроводникового лазера образован естественными гранями кристалла с коэффициентами отражения $R_1=R_2=0,37$. Определите пороговый уровень усиления для резонаторов длиной $L = 400$ мкм и $L = 100$ мкм, если внутренние

потери составляют $\alpha_{\text{внут}} = 5 \text{ см}^{-1}$. Что произойдет, если на грани резонатора нанести отражающие покрытия с $R_1=0,98$ и $R_2=1$?

6. **Задача.** Мощность непрерывной генерации полосткового полупроводникового лазера равна 10 мВт, длина волны излучения $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$, ширина спектральной линии $\Delta\nu = 100 \text{ МГц}$, размеры ближнего поля - $1 \text{ мкм} \times 10 \text{ мкм}$. До какой температуры надо нагреть абсолютно черное тело, чтобы его спектральная яркость в заданном диапазоне достигла яркости на зеркале лазера?

Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все индикаторы компетенции, 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 индикаторы компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
очень хорошо	Все индикаторы компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
хорошо	Все индикаторы компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
удовлетворительно	Все индикаторы компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
неудовлетворительно	Хотя бы один индикатор компетенции сформирован на уровне «неудовлетворительно»,
плохо	Полное отсутствие знаний, полная несформированность компетенции

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Почему в лазерах, работающих на молекулярных переходах, используют полированные металлические зеркала, а в лазерах, работающих на электронных переходах, – диэлектрические?
2. Почему одним из компонентов для инжекционных длинноволновых лазерных диодов обычно является свинец? Излучение какого диапазона можно получить в подобных материалах?

3. Принцип действия каскадных лазеров и их частотный диапазон
4. Отличается ли ширина квантовых ям во внутризонных каскадных лазерах? По схеме какого типа (3,4-уровневой) они работают? Какое условие на расстояние между лазерными уровнями необходимо выполнить для эффективной работы лазера?
5. Активная полупроводниковая среда. Специфика условий создания инверсии в полупроводниках. Спектральные особенности
6. Потери и усиление в полупроводниковых излучателях
7. Основы технологии изготовления полупроводниковых многослойных структур
8. Волноводные свойства излучателя. Оптический резонатор.
9. Многослойные зеркала.
10. Основные характеристики излучения полупроводникового лазера
11. Лазеры с распределенной обратной связью
12. Лазеры с вертикальным резонатором
13. Тенденции в развитии полупроводниковых лазерных систем
14. Объяснить принцип действия и преимущества ДГС с раздельным ограничением. Типичные оптические параметры ДГС. Изобразить зонную диаграмму, привести вариант используемых материалов.
15. Особенности гетероструктуры на основе InGaAsP/InP. Вид ватт-амперной характеристики, спектр лазера и светодиода на её основе.
16. Чем определяется ширина полосы лазерного диода как источника информации? Почему светодиоды уступают им по этому параметру? Указать оценки для обоих случаев.
17. Как и почему зависит от температуры рабочая частота лазерного диода? Почему с ростом температуры снижается эффективность генерации?
18. Чем определяется толщина активной области лазерного диода, выполненного на основе простейшей гомоструктуры?
19. Указать и обосновать преимущества лазерных диодов с распределённой обратной связью и распределённым брэгговским отражением по сравнению с диодами простейшей геометрии.
20. Сравнить эффективность управления сигналами от лазерного диода путём модуляции накачки, модуляции добротности и модуляции выходного пучка.
21. Оценить ширину линии излучения и интервал между продольными модами для типичного лазерного диода

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все индикаторы компетенции, 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 индикаторы компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»

Оценка	Критерии оценивания
очень хорошо	Все индикаторы компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
хорошо	Все индикаторы компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
удовлетворительно	Все индикаторы компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
неудовлетворительно	Хотя бы один индикатор компетенции сформирован на уровне «неудовлетворительно»,
плохо	Полное отсутствие знаний, полная несформированность компетенции

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

Основная 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. Цареградский Владимир Борисович. Инжекционный полупроводниковый лазер : учеб. пособие / Горьк. гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского. - Горький, 1988. - 59 с. - б/ц., 4 экз.
4. Грибковский Виктор Павлович. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. - Минск : Наука и техника, 1975. - 463 с. : граф. - 2.98., 2 экз.

Дополнительная литература:

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / пер. с англ., под ред. Н. Н. Слепова. - М. : Техносфера, 2003. - 440 с. : ил. - (Мир связи). - ISBN 5-94836-010-5. - ISBN 0-471-41477-8 : 320.00., 15 экз.
2. Гауэр Дж. Оптические системы связи / пер. с англ. под ред. А. И. Ларкина. - М. : Радио и связь, 1989. - 500, [1] с. : ил. - ISBN 5-256-00113-2 (в пер.) : 2.50., 3 экз.
3. Маругин А. В. Лазерная спектроскопия : учебное пособие / Маругин А. В., Савикин А. П., Шарков В. В. - Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2019. - 85 с. - Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки 03.03.03 и 03.04.03 «Радиофизика», 02.04.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии». - Библиогр.: доступна в карточке книги, на сайте ЭБС Лань. - Книга из коллекции ННГУ им. Н. И. Лобачевского - Инженерно-технические науки.,

<https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=709574&idb=0>.

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

Маругин А.В., Савикин А.П., Шарков В.В. ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ: Учебное пособие. — Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2019. - 85 с.

https://elibrary.ru/download/elibrary_37061166_61905953.pdf

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Мультимедийный проектор

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 02.04.02 - Фундаментальная информатика и информационные технологии.

Автор(ы): Маругин Алексей Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18.12.2023, протокол № 09/23.