

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Направление подготовки/специальность: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Наименование образовательной программы: Квантовая и оптическая электроника

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная

Рабочая программа дисциплины
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

| | |
|---|---|
| Блок: | Блок 1 «Дисциплины (модули)» |
| Часть образовательной программы: | Часть, формируемая участниками образовательных отношений |
| № дисциплины по учебному плану: | Б1.Ч.01.09 |
| Трудоемкость в зачетных единицах: | 7 семестр - 4; |
| Часов (всего) по учебному плану: | 144 часа |
| Лекции | 7 семестр - 32 часа; |
| Практические занятия | 7 семестр - 32 часа; |
| Лабораторные работы | не предусмотрено учебным планом |
| Консультации | 7 семестр - 2 часа; |
| Самостоятельная работа | 7 семестр - 77,5 часа; |
| в том числе на КП/КР | не предусмотрено учебным планом |
| Иная контактная работа | проводится в рамках часов аудиторных занятий |
| включая: Тестирование Контрольная работа | |
| Промежуточная аттестация: | |
| Экзамен | 7 семестр - 0,5 часа; |

Москва 2019

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Преподаватель

(должность)

| | | |
|---|---|----------------------------|
|  | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» | |
| | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ | |
| | Владелец | Коваль О.И. |
| | Идентификатор | R121ee132-KovalOI-3d30dc05 |

(подпись)


О.И. Коваль

(расшифровка подписи)

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной
программы

(должность, ученая степень, ученое звание)

| | | |
|---|---|---------------------------------|
|  | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» | |
| | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ | |
| | Владелец | Скорнякова Н.М. |
| | Идентификатор | R984920bc-SkorniakovaNM-67f74b6 |

(подпись)


Н.М.

Скорнякова

(расшифровка подписи)

Заведующий выпускающей
кафедры

(должность, ученая степень, ученое звание)

| | | |
|---|---|---------------------------------|
|  | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» | |
| | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ | |
| | Владелец | Скорнякова Н.М. |
| | Идентификатор | R984920bc-SkorniakovaNM-67f74b6 |

(подпись)

Н.М.

Скорнякова

(расшифровка подписи)

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения дисциплины: Изучение физики процессов в полупроводниковых лазерах и их приборных характеристик.

Задачи дисциплины

- изучение возможностей использования полупроводниковых лазеров в современных квантово-оптических системах;
- изучение физических явлений в полупроводниковых лазерах, их приборных характеристик и параметров излучения;
- приобретение навыков приятия и обоснования конкретных технических решений при исследовании и конструировании элементов квантово-оптических систем.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

| Код и наименование компетенции | Код и наименование индикатора достижения компетенции | Запланированные результаты обучения |
|---|--|---|
| ПК-1 Способен осуществлять техническое управление разработкой проектов квантовооптических систем для решения задач диагностики, навигации, связи и контроля космического пространства | ИД-1 _{ПК-1} Анализ исходных требований к разрабатываемому проекту квантово-оптических систем для решения задач диагностики, навигации, связи и контроля космического пространства | знать: - физические законы, лежащие в основах работы полупроводниковых лазеров, применяемых в квантово-оптических системах; - условия формирования характеристик излучения полупроводниковых лазеров, требуемых при конструировании квантово-оптических систем и их составных частей. |
| ПК-1 Способен осуществлять техническое управление разработкой проектов квантовооптических систем для решения задач диагностики, навигации, связи и контроля космического пространства | ИД-6 _{ПК-1} Разработка технических заданий на разработку квантово-оптических систем в целом и их составных частей, эскизных и технических проектов | уметь: - применять современную приборную базу к проектированию и разработке квантово-оптических систем; - проводить классификацию полупроводниковых лазеров в зависимости от их параметров и возможности использования в системах навигации и связи. |

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Квантовая и оптическая электроника (далее – ОПОП), направления подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать фундаментальные законы квантовой механики
- уметь определять, какие законы оптики обуславливают явления или процессы в устройствах различной физической природы, и выполнять применительно к ним простые технические расчёты
- уметь применять основные физические явления, законы оптики и их математическое описание к решению задач

- уметь определять, какие законы квантовой механики обуславливают явления или процессы в устройствах различной физической природы, и выполнять применительно к ним простые технические расчёты

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единицы, 144 часа.

| № п/п | Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации | Всего часов на раздел | Семестр | Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы | | | | | | | | | | Содержание самостоятельной работы/ методические указания | |
|-------|---|-----------------------|---------|--|-----|----|--------------|---|-----|----|----|-------------------|-----------------------------------|---|--|
| | | | | Контактная работа | | | | | | | СР | | | | |
| | | | | Лек | Лаб | Пр | Консультация | | ИКР | | ПА | Работа в семестре | Подготовка к аттестации /контроль | | |
| КПР | ГК | ИККП | ТК | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
| 1 | Физика полупроводников, входящих в состав полупроводниковых лазеров | 54 | 7 | 16 | - | 16 | - | - | - | - | - | 22 | - | <p><u>Подготовка домашнего задания:</u> Выполнения домашнего задания по разделу.</p> <p><u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу. Подготовка к тесту №1 и Контрольной работе №1</p> <p><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение лекционного и дополнительного материала по разделу</p> <p><u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], стр. 6-29, 30-49, 50-73, 95-105 [2], стр. 12, 23 [3], стр. 22-69, 35-36, 69-82, 93-120, 224-229, 302-313</p> | |
| 1.1 | Энергетическая зонная структура полупроводников | 14 | | 4 | - | 4 | - | - | - | - | - | 6 | - | | |
| 1.2 | Локализованные состояния в полупроводниках. Статистика электронов и дырок | 10 | | 3 | - | 3 | - | - | - | - | - | 4 | - | | |
| 1.3 | Процессы поглощения и излучения в полупроводниках | 20 | | 6 | - | 6 | - | - | - | - | - | 8 | - | | |
| 1.4 | Диффузия и дрейф носителей заряда. P-n переходы и гетеропереходы | 10 | | 3 | - | 3 | - | - | - | - | - | 4 | - | | |
| 2 | Генерация и распространение излучения в полупроводниковых лазерах | 22 | | 6 | - | 6 | - | - | - | - | - | 10 | - | | <p><u>Подготовка домашнего задания:</u> Выполнения домашнего задания по разделу.</p> <p><u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу. Подготовка к тесту №2</p> <p><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение лекционного и дополнительного материала</p> |
| 2.1 | Вынужденное излучение в полупроводниках. | 11 | | 3 | - | 3 | - | - | - | - | - | 5 | - | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|--------------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|------------|-------------|-------------|--|
| | Усиление и генерация излучения. | | | | | | | | | | | | по разделу. <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], стр. 74-86, 89-94 [2], стр. 14 |
| 2.2 | Трёхслойные плоские волноводы с конечной проводимостью. Боковое оптическое ограничение. | 11 | 3 | - | 3 | - | - | - | - | - | 5 | - | |
| 3 | Конструктивные особенности и характеристики полупроводниковых лазеров | 32 | 10 | - | 10 | - | - | - | - | - | 12 | - | <u>Подготовка домашнего задания:</u> Выполнения домашнего задания по разделу. <u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу. Подготовка к контрольной работе №2 <u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение лекционного и дополнительного материала по разделу. <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], стр. 106-108 [2], стр. 20, 23 |
| 3.1 | Структура и технология изготовления инжекционных лазеров. Квантово-размерные слои. | 13 | 4 | - | 4 | - | - | - | - | - | 5 | - | |
| 3.2 | Основные приборные характеристики и спектры излучения полупроводниковых лазеров | 19 | 6 | - | 6 | - | - | - | - | - | 7 | - | |
| | Экзамен | 36.0 | - | - | - | - | 2 | - | - | 0.5 | - | 33.5 | |
| | Всего за семестр | 144.0 | 32 | - | 32 | - | 2 | - | - | 0.5 | 44 | 33.5 | |
| | Итого за семестр | 144.0 | 32 | - | 32 | - | 2 | - | - | 0.5 | 77.5 | | |

Примечание: Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПр – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

3.2 Краткое содержание разделов

1. Физика полупроводников, входящих в состав полупроводниковых лазеров

1.1. Энергетическая зонная структура полупроводников

Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение. Трансляционная симметрия. Функция Блоха. Зоны Бриллюэна. Приближение слабосвязанных электронов. Отражение Брэгга и энергетическая щель. Приближение сильносвязанных электронов. Эффективная масса электронов. Понятие дырки. Число состояний в разрешенных зонах энергий. Деление веществ на металлы, полупроводники и диэлектрики с точки зрения зонной теории. Энергетическая зонная структура основных полупроводников..

1.2. Локализованные состояния в полупроводниках. Статистика электронов и дырок

Водородоподобные примеси. Метод эффективной массы. Колебания решётки. Фононы. Экситоны. Плотность состояний для электронов и дырок. Функция распределения Ферми-Дирака. Уровень Ферми. Равновесные и неравновесные концентрации электронов и дырок в зонах проводимости и валентной зоне для собственного и примесного полупроводников. Квазиуровни Ферми..

1.3. Процессы поглощения и излучения в полупроводниках

Прямые и не прямые оптические переходы. Влияние внешних факторов (температуры, давления) на край поглощения. Собственное поглощение в сильном электрическом поле. Эффект Франца-Келдыша. Зависимость положения края полосы поглощения от концентрации примесей. Эффект Бурштейна-Мосса. Экситонное поглощение. Переходы между зоной и примесным уровнем. Переходы между донорами и акцепторами. Внутризонные переходы в полупроводниках р-типа и n-типа. Поглощение свободными носителями заряда. Решеточное поглощение. Излучательные переходы в полупроводниках. Скорость излучательной рекомбинации. Время жизни носителей заряда. Рекомбинация через центры рекомбинации. Оже-рекомбинация..

1.4. Диффузия и дрейф носителей заряда. Р-n переходы и гетеропереходы

Диффузия и дрейф основных и неосновных носителей. Уравнение непрерывности. Р-n переходы и гетеропереходы. Энергетическая диаграмма. Вольт-амперные характеристики. Анизотипные и изотипные гетеропереходы. Двойные гетероструктуры..

2. Генерация и распространение излучения в полупроводниковых лазерах

2.1. Вынужденное излучение в полупроводниках. Усиление и генерация излучения.

История развития полупроводниковых лазеров. Применение полупроводниковых лазеров. Особенности лазерного эффекта в полупроводниках. Спектральный диапазон и интервал значений мощности излучения. Вынужденное излучение в полупроводниках. Необходимое условие вынужденного излучения. Классификация полупроводниковых лазеров по способам возбуждения. Лазеры с накачкой электронным пучком и оптической накачкой. Инжекционные лазеры. Условие генерации для проводящей активной среды. Резонаторы..

2.2. Трёхслойные плоские волноводы с конечной проводимостью. Боковое оптическое ограничение.

Распространение электромагнитных волн в среде с конечной проводимостью. Комплексный показатель преломления. Волноводный эффект в инжекционных лазерах.

Условия возникновения фундаментальной моды и мод более высокого порядка. Коэффициент оптического ограничения. Оптическое ограничение в боковых направлениях..

3. Конструктивные особенности и характеристики полупроводниковых лазеров

3.1. Структура и технология изготовления инжекционных лазеров. Квантово-размерные слои.

Изготовление и основные конструкции полупроводниковых лазеров. Лазеры полосковой геометрии. Боковая диффузия носителей заряда. Квантово-размерные структуры. Способы получения. Напряжённые квантово-размерные слои. Энергетическая диаграмма потенциальной ямы..

3.2. Основные приборные характеристики и спектры излучения полупроводниковых лазеров

Воль-тамперные и ватт-амперные характеристики лазеров с широким контактом и полосковых лазеров. Эффективность преобразования и КПД. Температурные зависимости плотности порогового тока для лазеров с широким контактом и полосковых лазеров, лазеров на основе квантово-размерных структур. Излучательные свойства лазеров с широким контактом и полосковых лазеров. Угловая расходимость. Картина дальнего поля. Спектры излучения в зависимости от плотности тока накачки..

3.3. Темы практических занятий

1. Локализованные состояния в полупроводниках. Статистика электронов и дырок;
2. Основные приборные характеристики и спектры излучения полупроводниковых лазеров;
3. Процессы поглощения и излучения в полупроводниках;
4. Диффузия и дрейф носителей заряда. P-n переходы и гетеропереходы;
5. Вынужденное излучение в полупроводниках. Усиление и генерация излучения;
6. Трёхслойные плоские волноводы с конечной проводимостью. Боковое оптическое ограничение.;
7. Структура и технология изготовления инжекционных лазеров. Квантово-размерные слои.;
8. Энергетическая зонная структура кристаллических полупроводниковых материалов.

3.4. Темы лабораторных работ не предусмотрено

3.5 Консультации

Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Физика полупроводников, входящих в состав полупроводниковых лазеров"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Генерация и распространение излучения в полупроводниковых лазерах"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Конструктивные особенности и характеристики полупроводниковых лазеров"

3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ Курсовой проект/ работа не предусмотрены

3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

| Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1) | Коды индикаторов | Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1) | | | Оценочное средство (тип и наименование) |
|--|------------------|---|---|---|--|
| | | 1 | 2 | 3 | |
| Знать: | | | | | |
| условия формирования характеристик излучения полупроводниковых лазеров, требуемых при конструировании квантово-оптических систем и их составных частей | ИД-1ПК-1 | | + | | Контрольная работа/Контрольная работа 1. Поглощение и излучение в полупроводниковых материалах |
| физические законы, лежащие в основах работы полупроводниковых лазеров, применяемых в квантово-оптических системах | ИД-1ПК-1 | + | | | Тестирование/Тест № 1. Зонная энергетическая структура и локализованные состояния в полупроводниках |
| Уметь: | | | | | |
| проводить классификацию полупроводниковых лазеров в зависимости от их параметров и возможности использования в системах навигации и связи | ИД-6ПК-1 | | + | | Тестирование/Тест 2. Лазеры на основе квантово-размерных структур |
| применять современную приборную базу к проектированию и разработке квантово-оптических систем | ИД-6ПК-1 | | | + | Контрольная работа/Контрольная работа 2. Основные рабочие и излучательные характеристики полупроводниковых лазеров |

4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)

4.1. Текущий контроль успеваемости

7 семестр

Форма реализации: Письменная работа

1. Контрольная работа 1. Поглощение и излучение в полупроводниковых материалах (Контрольная работа)
2. Контрольная работа 2. Основные рабочие и излучательные характеристики полупроводниковых лазеров (Контрольная работа)
3. Тест 2. Лазеры на основе квантово-размерных структур (Тестирование)
4. Тест № 1. Зонная энергетическая структура и локализованные состояния в полупроводниках (Тестирование)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине

Экзамен (Семестр №7)

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и экзаменационной составляющих.

В диплом выставляется оценка за 7 семестр.

Примечание: Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 Печатные и электронные издания:

1. Коваль, О. И. Полупроводниковые лазеры : Учебное пособие по курсу "Лазерные источники света" по направлению "Электроника и микроэлектроника" / О. И. Коваль, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Изд-во МЭИ, 2004 . – 122 с. - ISBN 5-7046-1169-9 .;
2. Источники лазерного излучения : задачник по направлению "Электроника и наноэлектроника" / В. В. Близнюк, П. Г. Зверев, О. И. Коваль, В. А. Паршин, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") . – М. : Изд-во МЭИ, 2018 . – 46 с. - ISBN 978-5-7046-1692-4 .
[http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=10312;](http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=10312)
3. Шалимова К. В.- "Физика полупроводников", (4-е изд., стер.), Издательство: "Лань", Санкт-Петербург, 2010 - (384 с.)
[https://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=648.](https://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=648)

5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. СДО "Прометей";
2. Office / Российский пакет офисных программ;
3. Майнд Видеоконференции.

5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

| Тип помещения | Номер аудитории, наименование | Оснащение |
|---|---|---|
| Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля | Ж-120, Машинный зал ИВЦ | сервер, кондиционер |
| Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП | Ж-120, Машинный зал ИВЦ | сервер, кондиционер |
| | А-202, Учебная мультимедийная аудитория каф. Физики | парта, стол преподавателя, стул, шкаф для хранения инвентаря, доска интерактивная, мультимедийный проектор, доска маркерная, колонки, ноутбук |
| Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации | Ж-120, Машинный зал ИВЦ | сервер, кондиционер |
| | А-204, Учебная аудитория каф. Физики | парта, стол преподавателя, стул, доска меловая, колонки |
| Помещения для самостоятельной работы | А-111/1, Компьютерный класс каф. Физики | стол компьютерный, стул, шкаф для документов, шкаф для одежды, мультимедийный проектор, доска маркерная, колонки, компьютер персональный |
| Помещения для консультирования | А-201/1, Кабинет сотрудников каф. Физики | стол, стул, шкаф для документов, шкаф для одежды, колонки, компьютер персональный, принтер |
| Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря | Б-101/1, Склад каф. Физики им. В.А. Фабриканта | |

БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Полупроводниковые лазеры

(название дисциплины)

7 семестр

Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Тест № 1. Зонная энергетическая структура и локализованные состояния в полупроводниках (Тестирование)
- КМ-2 Контрольная работа 1. Поглощение и излучение в полупроводниковых материалах (Контрольная работа)
- КМ-3 Тест 2. Лазеры на основе квантово-размерных структур (Тестирование)
- КМ-4 Контрольная работа 2. Основные рабочие и излучательные характеристики полупроводниковых лазеров (Контрольная работа)

Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

| Номер раздела | Раздел дисциплины | Индекс КМ: | КМ-1 | КМ-2 | КМ-3 | КМ-4 |
|---------------|---|------------|------|------|------|------|
| | | Неделя КМ: | 4 | 8 | 12 | 16 |
| 1 | Физика полупроводников, входящих в состав полупроводниковых лазеров | | | | | |
| 1.1 | Энергетическая зонная структура полупроводников | | + | | | |
| 1.2 | Локализованные состояния в полупроводниках. Статистика электронов и дырок | | + | | | |
| 1.3 | Процессы поглощения и излучения в полупроводниках | | + | | | |
| 1.4 | Диффузия и дрейф носителей заряда. Р-n переходы и гетеропереходы | | + | | | |
| 2 | Генерация и распространение излучения в полупроводниковых лазерах | | | | | |
| 2.1 | Вынужденное излучение в полупроводниках. Усиление и генерация излучения. | | | + | | |
| 2.2 | Трёхслойные плоские волноводы с конечной проводимостью. Боковое оптическое ограничение. | | | | + | |
| 3 | Конструктивные особенности и характеристики полупроводниковых лазеров | | | | | |
| 3.1 | Структура и технология изготовления инжекционных лазеров. Квантово-размерные слои. | | | | | + |
| 3.2 | Основные приборные характеристики и спектры излучения полупроводниковых лазеров | | | | | + |
| Вес КМ, %: | | | 15 | 30 | 15 | 40 |