

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:  
Декан

А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

**Лабораторный практикум по полупроводниковой оптоэлектронике**

по направлению подготовки

**03.03.03 Радиофизика**

Направленность (профиль) подготовки :  
**Радиофизика, электроника и информационные системы**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2025**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
М.Л. Громов

Председатель УМК  
А.П. Коханенко

Томск – 2025

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-2 Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

ПК-3 Способен использовать современное оборудование для решения задач в области радиофизики и электроники.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.1 Выбирает и использует соответствующие ресурсы, современные методики и оборудование для проведения экспериментальных и теоретических исследований.

ИОПК 2.2 Обрабатывает для получения обоснованных выводов и представляет полученные результаты экспериментальных и теоретических исследований.

ИПК 3.1 Понимает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.

ИПК 3.2 Проводит радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Освоить материал курса, а именно основные типы полупроводниковых оптоэлектронных приборов, их функциональные возможности и области применения.

– Научиться экспериментально определять и рассчитывать параметры и характеристики основных полупроводниковых оптоэлектронных приборов.

## **3. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплина (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор. Дисциплина входит в модуль «Твердотельная электроника».

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Седьмой семестр, зачет

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: «Математический анализ», «Физика», «Дифференциальные уравнения», «Квантовая механика», «Физика полупроводников».

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 з.е., 72 часов, из которых:

-лабораторные: 36 ч.

в том числе практическая подготовка: 36 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины, структурированное по темам**

Тема 1. Поглощение оптического излучения в полупроводнике

Закон Бугера–Ламберта. Линейный коэффициент поглощения. Виды поглощения оптического излучения в полупроводниках. Форма края поглощения при прямых и непрямых оптических переходах

Тема 2. Фотопроводимость полупроводников

Оптическая генерация. Фотопроводимость. Собственная фотопроводимость при однородной по объему генерации. Кинетика фотопроводимости и фототока при включении и выключении освещения.

Тема 3. Фотолюминесценция полупроводников

Фотопроводимость. Собственная фотопроводимость при однородной по объему генерации. Кинетика фотопроводимости и фототока. Фотопроводимость при неоднородной оптической генерации носителей заряда. Влияние поверхностной рекомбинации на спектр стационарной фотопроводимости. Особенности примесной фотопроводимости. Ватт-амперная характеристика.

Тема 4. Фотодиоды

Природа фотоэффекта в  $p$ - $n$ -переходе. Уравнение полупроводникового фотодиода. Режимы работы фотодиода. Основные параметры и характеристики фотодиода. Зависимость величины фототока от длины волны и внутренних параметров фотодиодной структуры (чувствительность, коэффициент усиления, спектральная характеристика, материалы). Примесные фоторезисторы.

Тема 5. Светодиоды

Инжекционная электролюминесценция в  $p$ - $n$ -переходах и гетероструктурах. Спектр излучения. Вывод излучения из кристалла светодиода, внешний квантовый выход, ватт-амперная характеристика. Материалы для светодиодов на различные участки спектра. Конструкции светодиодов

Тема 6. Инжекционные лазеры

Вынужденное излучение. Принцип действия инжекционного лазера. Условие возникновения лазерного излучения в полупроводнике. Усиление и пороговый ток инжекционного лазера. Спектры излучения. Материалы и конструкции гетероструктурных лазеров

## **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, выполнения лабораторных работ и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

## **10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации**

Зачет в седьмом семестре проводится в устной форме. Включает опрос обучающегося по выполненным лабораторным работам и представления по ним письменных отчетов. Отчеты по лабораторной работе должны содержать рукописное или печатное изложение цели работ, основных этапов и приемов ее достижения, полученных теоретических и экспериментальных результатов, оценку их достоверности, анализ результатов и выводы.

Проверяются теоретические знания по проделанным лабораторным работам. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Примерный перечень теоретических вопросов

1. Записать выражение для зависимости коэффициента поглощения света от энергии фотона при прямых разрешенных переходах вблизи края собственного поглощения полупроводника.

2. Какова физическая причина увеличения коэффициента собственного поглощения света  $\alpha$  при возрастании энергии фотона ( $h\nu > E_g$ )?

3. Записать выражение для зависимости избыточной концентрации электронов от времени: а) после включения освещения; б) после выключения освещения – при малом уровне возбуждения.

4. Что такое внутренний квантовый выход люминесценции полупроводникового материала?

5. Изобразить спектр люминесценции при межзонной рекомбинации в прямозонном полупроводнике и объяснить его форму.

6. Из каких компонентов складывается фототок в  $p-n$ -переходе?

7. Изобразить вольт-амперные характеристики фотодиода в темноте и при освещении.

8. Записать выражение для мощности излучения светодиода?

9. Что такое внешний квантовый выход излучающего диода и от чего он зависит?

10. Опишите принцип действия инжекционного лазера на  $p-n$ -переходе.

11. Записать необходимое условие возникновения лазерного излучения в полупроводнике.

Результаты промежуточной аттестации по дисциплине характеризуются оценками «зачтено» или «не зачтено» в соответствии с таблицей.

Компетенция	Индикатор компетенции	Критерии оценивания результатов обучения	
		Незачет	Отлично
<b>ОПК-2</b> Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;	<b>ИОПК-2.1</b> Выбирает и использует соответствующие ресурсы, современные методики и оборудование для проведения экспериментальных и теоретических исследований.	Не имеет представления о назначении и характеристиках полупроводникового оптоэлектронного прибора.	Знает основные свойства современных полупроводниковых оптоэлектронных приборов.
		Не имеет представления о теоретических моделях и использовании экспериментального оборудования для определения характеристик полупроводниковых структур и приборов.	Знает теоретические модели необходимые для определения характеристик полупроводниковых оптоэлектронных приборов.

	<b>ИОПК-2.2</b> Обрабатывает для получения обоснованных выводов и представляет полученные результаты экспериментальных и теоретических исследований.	Не имеет представления об обработке исходных данных и результатов измерений характеристик оптоэлектронных полупроводниковых приборов с использованием вычислительной техники	Проводит обработку исходных данных и результатов измерений характеристик оптоэлектронных полупроводниковых приборов с использованием вычислительной техники и определяет параметры областей полупроводниковых структур.
		Не имеет представления о представлении результатов экспериментальных измерений и теоретических расчетов.	Корректно представляет результаты экспериментальных измерений и теоретических расчётов в виде графиков и отчётов.
<b>ПК-3</b> Способен использовать современное оборудование для решения задач в области радиофизики и электроники.	<b>ИПК-3.1</b> Понимает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.	Не имеет представления о принципе действия и назначении оптоэлектронных полупроводникового прибора.	Знает принципы действия, характеристики и области применения полупроводниковых оптоэлектронных приборов.
		Не имеет представления об основных выражениях полупроводниковой электроники	Умеет применять основные выражения полупроводниковой электроники при проведении исследований.
	<b>ИПК-3.2</b> Проводит радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля.	Полное непонимание принципа измерения параметра или характеристики оптоэлектронного полупроводникового прибора.	Знает смысл исследуемого параметра оптоэлектронного прибора.
		Отсутствие навыков работы с радиоизмерительными приборами.	Знает принципы работы измерительной установки.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=13812>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (п. 9, 10).

в) Методические указания по проведению лабораторных работ: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=13812>

д) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=13812>

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

- Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: учебное пособие для студентов вузов / А.Н. Игнатов. - Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2016. - 538 с
- Гермогенов В.П. Материалы, структуры и приборы полупроводниковой оптоэлектроники: учебное пособие: для студентов старших курсов вузов / В.П. Гермогенов; Нац. исслед. Том. гос. ун-т. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. – 271 с. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000511917>

б) дополнительная литература:

- Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – 2-е изд. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.
- Задачи по полупроводниковой оптоэлектронике: задачник / Сост. В.П. Гермогенов. –Томск: Томский госуниверситет, 2014. – 21 с

в) ресурсы сети Интернет:

- Полупроводниковые и оптоэлектронные приборы (Методичкус): электронный ресурс. – URL: <https://3ys.ru/poluprovodnikovye-i-optoelektronnye-pribory.html>
- Светодиоды (иллюстрации Ф. Шуберта): электронный ресурс. – URL: <https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>
- Физика и техника полупроводников (научный журнал РАН): электронная версия. – URL: <https://journals.ioffe.ru/journals/2>
- eLIBRARY.RU: Научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/>

## 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office 2010 Russian Academic Open, Microsoft Windows Professional 7 Academic Open (Лицензия №47729022 от 26.11.2010). Пакет программного обеспечения РТС MathCad Education (Договор поставки №7193 от 14.10.2015).
- публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Справочник по электронным компонентам. – URL: <http://kazus.ru/>

в) профессиональные базы данных:

- Новые полупроводниковые материалы. Характеристики и свойства: база данных ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – URL: <http://www.matprop.ru/>

## 14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Лаборатории, оборудованные маркерной доской, мультимедийным проектором с экраном, 5 компьютерных рабочих мест для обработки результатов и моделирования характеристик полупроводниковых приборов. Также имеются приборы и установки для измерения характеристик полупроводниковых оптоэлектронных приборов: установка для измерения поглощения оптического излучения в полупроводнике на базе

спектрофотометра СФ-16; лабораторная установка для изучения фотопроводимости полупроводников, включающая генератор прямоугольных импульсов Г5-54 и осциллограф GDS-840S; монохроматор МДР-23 и спектрометр Ocean Optics Flame для наблюдения спектров электролюминесценции светодиодов; лабораторная установка для измерения характеристик полупроводниковых фотоприемников, включающая источник-измеритель Keithley 2410 с компьютером и монохроматор УМ-2; установка для измерения фотолюминесценции полупроводниковых пластин на базе монохроматора ИКС-12 и лазера ЛГ-126; спектрометр Ocean Optics USB4000 с компьютером для измерения характеристик инжекционного лазера.

Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате («Adobe Connect»).

### **15. Информация о разработчиках**

Копьев Виктор Васильевич, кандидат физико-математических наук, Радиофизический факультет ТГУ, доцент.