

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

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО:

Декан

А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

**Физика полупроводников**

по направлению подготовки / специальности

**03.03.03 Радиофизика**

Направленность (профиль) подготовки/ специализация:

**Киберфизические системы, прикладная электроника и квантовые технологии**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Радиофизик-кибернетик, преподаватель. Разработчик киберфизических и квантовых систем**

Год приема

**2024**

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОПОП

О.А. Доценко

Председатель УМК

А.П. Коханенко

Томск – 2025

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

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности

ПК-1 Способен проанализировать поставленную задачу в области радиофизики и электроники, осуществлять поиск, обобщение и использование научно-технической информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональной задачи

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

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

РООПК 1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.

РОПК 1.3 Владеет приемами сравнительного анализа вариантов решения задачи, определения рисков, связанных с реализацией различных вариантов

РОПК 3.1 Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.

РОПК 3.2 Умеет проводить радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля

## **2. Задачи освоения дисциплины**

– Познакомить студентов с моделями физических явлений, протекающих в полупроводниковых материалах.

– Обучить методам расчёта и измерения параметров полупроводниковых материалов для решения практических задач профессиональной деятельности.

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

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

Дисциплина относится к обязательной части образовательной программы.

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

Шестой семестр, экзамен

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

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: «Математический анализ», «Физика», «Радиоэлектроника».

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 з.е., 180 часов, из которых:

-лекции: 46 ч.

-лабораторные: 28 ч.

-практические занятия: 14 ч.

в том числе практическая подготовка: 28 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

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

### **Тема 1. Введение**

Классификация веществ по характеру и величине электропроводности. Краткий обзор развития физики полупроводников, значение полупроводниковых материалов в современной науке и технике. Предмет и содержание курса.

### **Тема 2. Основы зонной теории твердого тела**

Уравнение Шредингера для электронов в изолированном атоме, энергетический спектр электронов в атоме. Уравнение Шредингера для кристалла, одноэлектронное приближение. Зоны разрешенных значений энергии электрона в кристалле. Движение носителей заряда в кристалле под действием электрического поля, понятие эффективной массы, физический смысл эффективной массы. Связь энергии носителей заряда с эффективной массой. Плотность квантовых состояний в разрешенных зонах. Зонная структура некоторых полупроводников (германий, кремний, арсенид галлия). Элементарная теория примесных состояний. Размерное квантование.

### **Тема 3. Статистика электронов и дырок в твердом теле**

Функция распределения в статистике Ферми-Дирака. Концентрации электронов и дырок в разрешенных зонах и на примесных уровнях. Уравнение электронейтральности. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике. Температурная зависимость уровня Ферми и концентрации носителей заряда в полупроводнике, легированном одним типом примеси. Вырожденные и частично вырожденные полупроводники. Перераспределение носителей заряда в компенсированных полупроводниках.

### **Тема 4. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда**

Равновесные и неравновесные носители заряда, квазиуровни Ферми. Изменение концентрации носителей заряда в полупроводнике при биполярной генерации и межзонной рекомбинации. Изменение концентрации избыточных носителей заряда при монополярной генерации, время релаксации Максвелла. Механизмы межзонной рекомбинации носителей заряда (излучательная, безызлучательная, ударная). Рекомбинация через локальные центры в запрещенной зоне (рекомбинация Шокли-Рида). Зависимость времени жизни от положения уровня Ферми в полупроводнике и от температуры. Поверхностная рекомбинация, понятие о скорости поверхностной рекомбинации.

### **Тема 5. Кинетические явления в полупроводниках**

Общая характеристика кинетических явлений в твердом теле. Элементарная теория электропроводности, понятие дрейфовой скорости и дрейфовой подвижности носителей заряда. Температурная зависимость подвижности и электрической проводимости при различных механизмах рассеяния носителей заряда. Эффект Холла в полупроводниках с одним типом примеси. Магниторезистивный эффект. Термоэлектрические явления (термоэдс, эффекты Пельтье и Томсона).

### **Тема 6. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда в полупроводниках**

Уравнение непрерывности. Соотношения Эйнштейна. Диффузия и дрейф основных неравновесных носителей заряда (монополярная генерация), длина экранирования. Диффузия и дрейф неосновных избыточных носителей заряда (биполярная генерация) в примесном полупроводнике, длина затягивания и диффузионная длина. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда в полупроводнике, близком к собственному, коэффициент биполярной диффузии, биполярная дрейфовая подвижность

### **Тема 7. Диэлектрические свойства твердых тел**

Основные типы диэлектрических материалов. Понятие поляризации. Поляризованность – количественная характеристика поляризации. Связь поляризованности с электрическим полем. Диэлектрическая проницаемость, понятие

относительной диэлектрической проницаемости. Основные виды поляризации в диэлектриках. Диэлектрические потери. Тангенс угла диэлектрических потерь.

### **Тема 8. Оптические свойства твердых тел**

Основные оптические характеристики твердых тел (коэффициент поглощения, показатель поглощения, коэффициент отражения, коэффициент пропускания); взаимосвязь оптических постоянных. Методы экспериментального определения оптических постоянных. Поглощение света в полупроводниках: виды поглощения; закон сохранения энергии и импульса. Прямые и не прямые оптические переходы. Собственное поглощение в полупроводниках. Экситонное поглощение, поглощение излучения свободными носителями заряда, примесное и решеточное поглощение. Определение ширины запрещенной зоны из оптических измерений.

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

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, тестов по лекционному материалу, выполнения домашних заданий, проверки отчетов по лабораторным работам и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Студент является аттестованным на контрольной точке, если посещаемость составляет не ниже 50 % лекционных занятий.

Тестирование проводится в режиме онлайн во второй половине семестра в системе Moodle (<https://lms.tsu.ru/course/view.php?id=13813>). В ходе тестирования студентам предлагается ответить на три теоретических вопроса, время на тестирование – 3 минуты. Тестирование считается пройденным, если дано 2 верных ответа. В случае, если студент не проходит тестирование, ему предлагается пройти его во время экзамена.

Контрольные работы и домашние задания выполняются в рамках практических занятий. Отчеты по лабораторным работам готовятся обучающимися самостоятельно. При успешном выполнении контрольных и домашних заданий, а также сдаче отчетов по лабораторным работам, практические задания на экзамене не даются. В противном случае, обучающемуся предлагается выполнить ряд практических задач.

Оценочные материалы текущего контроля размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» - <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

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

Экзамен в шестом семестре проводится в устной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из трех частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Первая часть представляет собой тест из 3 вопросов, проверяющих РООПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности). Ответы на вопросы первой части даются путем выбора из списка предложенных.

Вторая часть содержит один вопрос и одну практическую задачу, проверяющие РОПК 1.3 (Владеет приемами сравнительного анализа вариантов решения задачи, определения рисков, связанных с реализацией различных вариантов). Ответ на вопросы второй части предполагает решение задачи и краткую интерпретацию полученных результатов.

Третья часть содержит 2 вопроса, проверяющих РОПК 3.1 (Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач). Ответы на вопросы третьей части даются в письменном виде с устными пояснениями.

Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» - <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» <https://lms.tsu.ru/course/view.php?id=13813>

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

в) Методические указания по проведению лабораторных работ <https://lms.tsu.ru/course/view.php?id=13550>

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников / Шалимова К. В.. - 4-е изд. - Санкт-Петербург : Лань. - 384 с. - 2021. - Электронный ресурс: ЭБС Лань (доступно в локальной сети ТГУ). - URL: <https://e.lanbook.com/book/167840>.

2. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников / Ансельм А. И. - 4-е изд. - Санкт-Петербург : Лань. - 624 с. - 2021. - Электронный ресурс: ЭБС Лань (доступно в локальной сети ТГУ). - URL: [https://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=71742](https://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=71742).

б) дополнительная литература:

1. Сорокин В.С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учебник для студентов вузов. [Т. 1] / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. - Изд. 2-е, испр. - Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2015. - 1 онлайн-ресурс (442 с.). URL: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=67462](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=67462)

2. Гуртов В.А. Физика твердого тела для инженеров: учебное пособие для студентов вузов / В.А. Гуртов, Р.Н. Осауленко ; науч. ред. Л.А. Алешина. - Москва: Техносфера, 2007. - 518 с.

3. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников: учебное пособие для студентов физических специальностей вузов / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1990. - 685 с.

4. Малянов С.В., Калыгина В.М. Сборник задач по физике полупроводников: Учебное пособие для практических занятий. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. – 136 с.

в) ресурсы сети Интернет:

1. Вячистая Ю.В. Физика полупроводников. Практические занятия: электронный ресурс на базе виртуальной обучающей среды MOODLE. – Томск: ТГУ, 2015. – URL: <http://info.rff.tsu.ru/enrol/index.php?id=150>.

2. Демонстрационные модели свойств полупроводников и полупроводниковых приборов (Purdue University, Gerhard Klimeck, Benjamin P Haley): электронный ресурс. – URL: <https://nanohub.org/resources/6842>

3. Светодиоды (иллюстрации Ф. Шуберта): электронный ресурс. – URL: <https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>

4. Физика и техника полупроводников (научный журнал РАН): электронная версия. – URL: <https://journals.ioffe.ru/journals/2>

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

6. Справочник по электронным компонентам. – URL: <http://kazus.ru/>
7. eLIBRARY.RU: Научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp?>
8. Электронно-библиотечная система «Лань» (доступ из сети НИ ТГУ). – URL: <http://e.lanbook.com/>
9. Scopus: база данных цитирования издательства Elsevier (доступ из сети НИ ТГУ). – URL: <http://www.scopus.com/>

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);

- пакет SMath Studio для решения задач на практических занятиях (в свободном доступе).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>

– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

#### **14. Материально-техническое обеспечение**

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, 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 приборами и установками для измерения характеристик полупроводниковых приборов: лабораторная установка для определения ширины запрещённой зоны полупроводников; установка для определения диффузионной длины носителей заряда в полупроводниках УИДД-1; установка для измерения времени жизни носителей заряда в полупроводниках, включающая генератор сдвоенных импульсов Г5-56 и цифровой осциллограф GDS 840S; установка для измерения спектров оптического пропускания полупроводников, включающая комбинированный источник освещения (дейтерий-вольфрам) ДН-2000, сканирующий монохроматор MonoScan 2000 (300-700 нм) с компьютером; лабораторная установка для изучения эффекта Холла в полупроводниках; установка для определения удельного сопротивления полупроводников бесконтактным методом; установка для измерения удельного сопротивления полупроводников четырёхзондовым методом; установка для измерения термоэдс полупроводников; установка для металлографических исследований поверхности полупроводников на базе оптического микроскопа с видеокамерой.

Учебно-наглядные пособия: таблица фундаментальных физических постоянных, Периодическая система элементов Д.И. Менделеева, демонстрационные модели кристаллических решеток.

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

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

Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н., НИ ТГУ, радиофизический факультет, кафедра полупроводниковой электроники, доцент.