

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 непрямые 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.

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

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, кафедры полупроводниковой электроники, доцент.