

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

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан

А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Дополнительные главы физики полупроводников

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-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.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

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

ИПК 1.1 Понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе и ожидаемые результаты их использования.

2. Задачи освоения дисциплины

– изучить модели, описывающие движение, генерацию и рекомбинацию электронов и дырок в полупроводниках, а также взаимодействие носителей заряда с кристаллической решёткой;

– научиться применять понятийный аппарат физики полупроводников при анализе кинетических явлений в полупроводниковых материалах в процессе профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

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

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

4. Семестр освоения и форма промежуточной аттестации по дисциплине

Шестой семестр, зачет.

5. Входные требования для освоения дисциплины

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

6. Язык реализации

Русский.

7. Объем дисциплины

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

– лекции: 30 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Раздел 1. 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.

Раздел 2. 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.

Гальваномагнитные явления в полупроводниках. Эффект Холла в полупроводниках с одним типом примеси. Магниторезистивный эффект. Эффект Эттингсгаузена.

Термоэлектрические явления в полупроводниках. Эффект Зеебека, температурная зависимость коэффициента термоэдс. Эффекты Пельтье и Томсона.

Раздел 3. 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.

Раздел 4. Колебания атомов в кристаллической решётке

Колебания и волны в простой одномерной решётке. Зависимость частоты колебаний от волнового вектора.

Колебания и волны в сложной одномерной решётке. Акустические и оптические колебания и волны. Спектр колебаний атомов в кристаллической решетке.

Колебания атомов в трёхмерной кристаллической решётке. Квантовые уровни системы несвязанных осцилляторов. Фононы.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости и устных опросов в процессе занятий. Результаты контроля фиксируются в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Самостоятельная работа студентов проводится в форме изучения учебного материала по теме занятия, подготовке ответов на контрольные вопросы, подготовке к зачёту.

Проведение контрольных опросов направлено на проверку достижения обучающимися индикаторов компетенций: ИОПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности) и ИПК 1.1 (Понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе и ожидаемые результаты их использования).

Примеры контрольных вопросов по дисциплине для самостоятельной работы

1. Чем отличается межзонная рекомбинация от рекомбинации Шокли-Рида?
2. В чем заключается эффект Пельтье?

3. Какой вид имеет зависимость скорости поверхностной рекомбинации от поверхностного потенциала?
4. Какие виды колебаний возможны в одномерной сложной кристаллической решетке?

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в шестом семестре проводится в устной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса по двум темам дисциплины. Продолжительность зачёта 1,5 часа.

Вопросы каждого билета формулируются таким образом, чтобы проверить сформированность общепрофессиональной и профессиональной компетенций с использованием их индикаторов: ИОПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности) и ИПК 1.1 (Понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе и ожидаемые результаты их использования).

Примеры билетов для устного зачёта

Билет №1

Вопрос 1. Эффект Холла в ограниченном полупроводнике в областях примесной, смешанной и собственной проводимостей в слабых магнитных полях.

Вопрос 2. Вывод уравнения непрерывности для электронов.

Билет №2

Вопрос 1. Используя уравнение $\tau = \tau_{p0} \frac{n_0 + n_1}{n_0 + p_0} + \tau_{n0} \frac{p_0 + p_1}{n_0 + p_0}$, провести анализ температурной зависимости времени жизни (область низких температур).

Вопрос 2. Особенности колебательного спектра атомов в трёхмерной кристаллической решётке.

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

Компетенция	Индикатор компетенции	Критерии оценивания результатов обучения			
		Не зачтено	Зачтено		
ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в	ИОПК-1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.	Не имеет представления об основных параметрах полупроводниковых материалов; не знает их общепринятых обозначений в учебной и научной	Знает процессы генерации, рекомбинации и диффузии неравновесных носителей заряда, но не может дать их математическое описание.	Владеет навыками теоретических расчётов и методов определения характеристик полупроводниковых материалов, допускает незначительные ошибки.	Свободно использует теоретические модели для определения характеристик полупроводниковых материалов, правильно объясняет физический смысл

сфере педагогической деятельности.		литературе.			процессов, связанных с поведением неравновесных носителей заряда.
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.	ИПК-1.1 Понимает требования, предъявляемые к исследуемому прибору, устройству или системе, и ожидаемые результаты их использования.	Не имеет представления о теоретических моделях, связанных с процессами генерации, рекомбинации и диффузии носителей заряда в полупроводниках. Не имеет представления о теоретических моделях для расчета характеристик полупроводниковых материалов.	Может дать определение отдельным явлениям, связанным с неравновесными носителями заряда. Не владеет четким представлением о теоретических моделях процессов генерации и рекомбинации. Имеет представление о кинетических явлениях в полупроводниках, не знает их практического использования, не всегда способен объяснить теоретическую модель.	Имеет представление о способах определения электрофизических характеристик полупроводников, может назвать методики и модели их расчета, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы. Владеет теоретическими моделями для расчета параметров полупроводниковых материалов, но допускает неточности в интерпретации результатов.	Свободно использует теоретические модели для описания кинетических явлений и процессов при определении параметров полупроводниковых материалов.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» – <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=6737>

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

в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=6737>

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

3. Панюшкин Н. Физика полупроводников и полупроводниковые приборы. - Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2016. - Электронный ресурс: ЭБС Знаниум (доступно в локальной сети ТГУ). - 131 с.. URL: <http://znanium.com/catalog/document?id=295140>

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.

в) ресурсы сети Интернет:

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

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

3. eLIBRARY.RU: Научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp?>

4. Scopus: база данных цитирования издательства Elsevier(доступ из сети НИ ТГУ).– URL: <http://www.scopus.com/>

5. WebofScience: база данных цитирования компании ClarivateAnalytics(доступ из сети НИ ТГУ). – URL: <http://webofknowledge.com/WOS>

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

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/>

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.

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

15. Информация о разработчиках

Калыгина Вера Михайловна, кандидат физико-математических наук, доцент, радиофизический факультет НИ ТГУ, кафедра полупроводниковой электроники, доцент.