

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

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан

А. Г. Коротаяев

Рабочая программа дисциплины

Дополнительные разделы полупроводниковой электроники

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-2 Способен проводить математическое моделирование процессов в приборах и устройствах радиофизики и электроники, владеть современными отечественными и зарубежными пакетами программ при решении профессиональных задач.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

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

ИПК 2.1 Понимает принцип действия и модели разрабатываемого радиоэлектронного прибора или устройства.

ИПК 2.2 Применяет в профессиональной деятельности различные численные методы, в том числе реализованные в готовых библиотеках при решении конкретных радиофизических задач.

ИПК 2.3 Владеет современными пакетами программ при решении задач в области радиофизики и радиоэлектроники.

2. Задачи освоения дисциплины

- познакомиться с физическими моделями полупроводниковых приборов;
- получить навыки применения специализированных программных средств для моделирования полупроводниковых структур и приборов на их основе;
- научиться применять понятийный аппарат полупроводниковой электроники для решения практических задач 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

Восьмой семестр, зачет.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по дисциплинам: «Физика полупроводников» и «Полупроводниковая электроника».

6. Язык реализации

Русский.

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

- лекции: 30 ч.,
- лабораторные работы (практическая подготовка): 44 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Раздел 1. Программный комплекс TCAD Sentaurus

Структура программного комплекса TCAD Sentaurus. Концепция приборного моделирования, инструменты, используемые при выполнении лабораторных работ.

Раздел 2. Барьеры Шоттки

Параметры идеального барьера Шоттки. Модель Бардина. Эффект Шоттки. Теории протекания тока. Силовые диоды Шоттки.

Раздел 3. $p-n$ -переходы

Управление параметрами $p-n$ -перехода. Модели протекания тока в $p-n$ -переходах. Влияние структурных дефектов и поверхностных состояний на электрические характеристики диодов.

Раздел 4. Гетероструктуры

Параметры идеального гетероперехода. Влияние граничных электронных состояний на характеристики гетероперехода.

Варизонные полупроводники. Квазиэлектрические поля. Варизонная $p-n$ -структура.

Раздел 5. Транзисторы

Параметры и характеристики биполярного транзистора. Схемы и модели биполярного транзистора. Режимы работы идеальной МДП-структуры. Параметры и характеристики МДП-транзистора.

Раздел 6. Интегральные микросхемы

Классификация интегральных микросхем (ИМС). Полупроводниковые биполярные ИМС. Структура и топология интегрального биполярного транзистора. Элементы биполярной ИМС. Способы изоляции элементов в биполярных ИМС.

МДП-интегральные микросхемы. Элементы МДП-ИМС. КМДП-микросхемы.

Лабораторные работы

Тема 1. Моделирование электрофизических характеристик объемного полупроводникового материала.

Тема 2. Моделирование вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода.

Тема 3. Моделирование вольт-фарадной характеристики $p-n$ -перехода.

Тема 4. Расчет статических параметров биполярного транзистора.

Тема 5. Расчет параметров МОП-структуры.

Тема 6. Расчет характеристик МОП-транзистора.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения устных и письменных опросов по теоретическому материалу, в ходе которых проверяется достижение обучающимися индикаторов компетенций ИОПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности) и ИПК 2.1 (Понимает принцип действия и модели разрабатываемого радиоэлектронного прибора или устройства).

Текущая аттестация по лабораторным работам направлена на проверку достижения обучающимися следующих индикаторов компетенций: ИПК 2.1 (Понимает принцип действия и модели разрабатываемого радиоэлектронного прибора или устройства), ИПК 2.2 (Применяет в профессиональной деятельности различные численные методы, в том

числе реализованные в готовых библиотеках при решении конкретных радиофизических задач), ИПК 2.3 (Владеет современными пакетами программ при решении задач в области радиофизики и радиоэлектроники). Эта аттестация включает устные опросы обучающихся, выполнение ими индивидуальных заданий и представление по ним отчётов.

Пример индивидуального задания по лабораторным работам

Индивидуальное задание 5

Расчет статических параметров p - n -перехода в прямом включении:

- сформировать двухмерную модель p - n -перехода с контактами для расчета его характеристик;
- рассчитать статические ВАХ структуры в диапазоне напряжений $U = 0-2$ В;
- на основе приборного моделирования построить: зависимости полного тока, тока электронов и дырок от напряжения на переходе, серию двухмерных распределений для концентраций электронов и дырок, плотностей электронного, дырочного и полного токов;
- на основе приборного моделирования рассчитать: эффективность эмиттера, дифференциальное сопротивление p - n -перехода, ток омического вырождения.

Результаты текущего контроля фиксируются в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация в восьмом семестре проводится в форме устного зачёта по теоретическому материалу. К зачёту допускаются только студенты, успешно прошедшие текущие аттестации по лабораторным работам. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Билет для зачёта содержит вопросы, позволяющие проверить достижение обучающимися индикаторов компетенций ИОПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности) и ИПК 2.1 (Понимает принцип действия и модели разрабатываемого радиоэлектронного прибора или устройства).

Примеры билетов для теоретического зачёта

Билет № 1

Вопрос 1. Как зависят параметры ОПЗ p - n -перехода (U_K , d , C_{p-n} , \mathcal{E}_m , $U_{\text{проб}}$) от типа полупроводникового материала и концентраций легирующих примесей?

Вопрос 2. Изобразите структуру интегрального биполярного транзистора и назовите его особенности.

Билет № 2

Вопрос 1. Почему поверхность p - n -структуры может влиять на её электрические характеристики?

Вопрос 2. Поясните суть способа изоляции элементов интегральной микросхемы при EPIC-процессе.

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
<p>ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.</p>	<p>ИОПК-1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.</p>	<p>Не имеет представления об основных уравнениях физики полупроводников и физики полупроводниковых приборов.</p> <p>Не имеет представления о теоретических моделях для описания характеристик полупроводниковых структур и приборов.</p>	<p>Понимает смысл и области применения основных уравнений физики полупроводников и физики полупроводниковых приборов.</p> <p>Понимает содержание теоретических моделей и способен их использовать для определения характеристик полупроводниковых приборов.</p>
<p>ПК-2 Способен проводить математическое моделирование процессов в приборах и устройствах радиофизики и электроники, владеть современными отечественными и зарубежными пакетами программ при решении профессиональных задач.</p>	<p>ИПК-2.1 Понимает принцип действия и модели разрабатываемого радиоэлектронного прибора или устройства.</p>	<p>Не имеет представления о принципах действия, характеристиках и теоретических моделях полупроводниковых барьерных структур.</p>	<p>Способен описать принципы действия, характеристики и теоретические модели полупроводниковых приборных структур.</p>
	<p>ИПК-2.2 Применяет в профессиональной деятельности различные численные методы, в том числе реализованные в готовых библиотеках при решении</p>	<p>Не владеет методами численного расчёта характеристик полупроводниковых структур с использованием пакетов программ.</p>	<p>Проводит численный расчёт электрических характеристик полупроводниковых структур с использованием пакета программ.</p>

	конкретных радиофизических задач.		
	ИПК-2.3 Понимает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.	Не имеет представления об области применения и общей структуре программного пакета TCAD Sentaurus. Не способен провести моделирование характеристик простой полупроводниковой структуры.	Имеет необходимое представление об общей структуре, назначении подпрограмм пакета TCAD Sentaurus и его возможностях. Уверенно использует средства пакета TCAD Sentaurus для моделирования и построения характеристик $p-n$ -переходов и транзисторных структур.

11. Учебно-методическое обеспечение

- а) Электронный учебный курс по данной дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=6775>
- б) Электронный учебный курс по дисциплине «Полупроводниковая электроника» в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=1821>
- в) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (п. 9, 10).
- г) Методические указания по проведению лабораторных работ - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=6775>
- д) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=6775>

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

- а) основная литература:

1. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы / Пасынков В. В., Чиркин Л. К. - 9-е изд. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 480 с. – Электронный ресурс: ЭБС Лань (доступно в локальной сети ТГУ). – URL: <https://e.lanbook.com/book/167773>
2. Смирнов Ю. А. Физические основы электроники / Смирнов Ю. А., Соколов С. В., Титов Е. В.. - 2-е изд., испр.. - Санкт-Петербург : Лань. - 560 с.. URL: <https://e.lanbook.com/book/168522>
3. Смирнов Ю. А. Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники : учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. – Изд. 2-е, испр. – Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2021. - 495 с. – Электронный ресурс: ЭБС Лань (доступно в локальной сети ТГУ). – URL: <https://e.lanbook.com/book/168550>
4. 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>

5. Новиков В.А. Практическое руководство по моделированию полупроводниковых приборов средствами TCAD Sentaurus: Методическое пособие: электронный ресурс.

б) дополнительная литература:

1. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – 2-е изд. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.

2. Synopsys Sentaurus Device User Guide. 2019, – 1284p.

в) ресурсы сети Интернет:

1. Гермогенов В.П., Новиков В.А. Дополнительные разделы полупроводниковой электроники: электронный ресурс на базе виртуальной обучающей среды MOODLE. – URL: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=6775>

2. Полупроводниковые приборы (материалы клуба 155): электронный ресурс. – URL: <http://www.club155.ru/stintro>

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

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

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

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

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);

– пакет программного обеспечения PTC MathCad Education (Договор поставки №7193 от 14.10.2015);

– пакет SMath Studio для решения задач на практических занятиях (в свободном доступе);

– пакет технологического проектирования SUPREM-IV.GS - Stanford TCAD

– 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/>

– 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. В число их входит компьютерный класс с программным обеспечением TCAD Sentaurus.

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

Гермогенов Валерий Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, радиофизический факультет НИ ТГУ, кафедра полупроводниковой электроники, профессор;

Новиков Вадим Александрович, кандидат физико-математических наук, радиофизический факультет НИ ТГУ, кафедра полупроводниковой электроники, доцент.