

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

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан

А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Приборное и технологическое моделирование в микроэлектронике

по направлению подготовки / специальности

03.04.03 Радиофизика, 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика

Направленность (профиль) подготовки/ специализация:
Цифровые технологии фотоники и радиофизики

Форма обучения
Очная

Квалификация
инженер-исследователь

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
А.П. Коханенко

Председатель УМК
А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

БК-2 Способен использовать научные методы для решения профессиональных задач

ОПК-3 Способен применять современные информационные технологии, использовать компьютерные сети и программные продукты для решения задач профессиональной деятельности

ПК-2 Способен осуществлять построение математических моделей объектов исследования и выбор готового или разработку нового алгоритма решения задачи

ПК-3 Способен использовать современное оборудование для решения профессиональных задач

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

РОБК-2.2 Умеет: выстраивать систематическую и логическую цепочку анализа и принимаемых решений в контексте задачи профессиональной деятельности

РООПК-3.2 Предлагает новые идеи и подходы к решению научно-исследовательских и прикладных задач с использованием информационных систем и технологий

РОПК-2.1 Формулирует постановку задачи, определяет параметры и функции разрабатываемой системы

РОПК-2.2 Определяет алгоритм и набор параметров, с учётом которых должно быть проведено моделирование устройства или системы

РОПК-2.3 Проводит компьютерное моделирование устройства или системы

РОПК-3.1 Понимает принципы действия устройств и систем, предназначенных для решения профессиональных задач

2. Задачи освоения дисциплины

– Освоить аппарат приборного и технологического моделирования устройств микроэлектроники.

– Научиться применять понятийный аппарат микроэлектроники для моделирования диодов Шоттки, диодов с р-п-переходом, биполярных и полевых транзисторов и транзисторов с высокой подвижностью электронов.

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 Модуль «Проектирование электронных схем».

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

Третий семестр, экзамен

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часов, из которых:

-лекции: 16 ч.

-практические занятия: 10 ч.

-семинар: 16 ч.

в том числе практическая подготовка: 0 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Тема 1. Современные методы численного моделирования устройств микроэлектроники.

Современные пакеты моделирования полупроводниковых приборов используемые в производстве. Обзор функциональных возможностей TCAD различных производителей ПО САПР

Тема 2. Особенности численного моделирования полупроводниковых устройств микроэлектроники средствами TCAD.

Описание топологии полупроводниковых приборов. Выбор и размещение сетки расчетов. Выбор и использование физических моделей протекающих электрофизических процессов. Формирование двумерной модели полупроводникового транзистора.

Тема 3. Структура и принцип работы pHEM-транзистора

Типы HEM-транзисторов. Энергетическая диаграмма HEM-транзистора. Образование двумерного электронного газа. Формирование барьерных и омических контактов. Особенности моделирования HEM-транзисторов.

Тема 4. Раздел 4. Технологические операции применяемые при производстве HEM-транзисторов.

Методы нанесения металлизации. Методы нанесения диэлектрических слоев. Фотолитография. Методы травления.

Тема 5. Анализ выходных статических характеристик pHEM-транзистора

Выходные статические характеристики HEM-транзистора. Передаточные характеристики HEM-транзистора. Пороговое напряжения. Крутизна. Коэффициенты усиления. Особенности моделирования выходных статических характеристик HEM-транзисторов. Приборное моделирование статических выходных характеристик транзистора на горячих электронах.

Тема 6. Анализ частотных характеристик pHEM-транзистора

Частотные характеристики pHEM-транзистора. Частота отсечки. Коэффициенты усиления. Диаграмма Смита. Особенности моделирования частотных характеристик HEM-транзисторов. Приборное моделирование динамических выходных характеристик транзистора на горячих электронах.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения устных опросов, контрольных работ, представления презентаций на семинарских занятиях, выполнения практических заданий и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр. В ходе контроля проверяется достижение обучающимися следующих результатов обучения: РОПК-2.1 (Формулирует постановку задачи, определяет параметры и функции разрабатываемой системы), РОПК-2.2 (Определяет алгоритм и набор параметров, с учётом которых должно быть проведено

моделирование устройства или системы), РОПК-2.3 (Проводит компьютерное моделирование устройства или системы). Самостоятельная работа студентов состоит в изучении теоретического материала, выполнении тестов с возможностью работы над ошибками, подготовке к семинарским занятиям, выполнении домашней работы по решению задач. материалу,

Методические указания обучающимся по освоению дисциплины.

Изучать материал курса рекомендуется последовательно, двигаясь от первой темы к последней. Раздел 1 знакомит с подходами используемыми при моделировании полупроводниковых устройств, дает обзор некоторых программных пакетов используемых для данных задач. Далее в разделе 2 дается более подробная информация по использованию программного комплекса TCAD, который используется для выполнения практических заданий.

Для более глубокого понимания процессов протекающих в транзисторных структурах типа рНЕМТ необходимо разобраться со структурой и принципом работы рНЕМ-транзистора. Необходимо уделить особое внимание процессу образование двумерного электронного газа и методам повышения подвижности свободных носителей заряда в рабочем слое.

Изучение раздела 4 позволит разобраться в основных технологических моментах, позволит при решении задач получать результат максимально приближенных к экспериментальному.

Раздела 5 и 6 посвящены анализу статических и динамических характеристик рНЕМ-транзистора. При изучении данного раздела необходимо уделить особое внимание таким понятиям как пороговое напряжения, крутизна, коэффициенты усиления и передачи, частота отсечки.

Выполнение практических заданий позволит закрепить материал, полученный во время лекционных занятий.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Экзамен в третьем семестре проводится в устной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса. Продолжительность экзамена 1,5 часа. Билет для экзамена содержит 2 вопроса, позволяющие проверить достижение обучающимися следующих результатов обучения: РОБК-2.2 (Умеет: выстраивать систематическую и логическую цепочку анализа и принимаемых решений в контексте задачи профессиональной деятельности), РООПК-3.2 (Предлагает новые идеи и подходы к решению научно-исследовательских и прикладных задач с использованием информационных систем и технологий), РОПК-3.1 (Понимает принципы действия устройств и систем, предназначенных для решения профессиональных задач).

Примерный перечень вопросов к экзамену:

1. Виды численного моделирования полупроводниковых устройств и схем на их основе. Протекание электрического тока в полупроводниках.
2. Уравнения непрерывности для электронов и дырок. Способы формирования топологии полупроводникового устройства с помощью ПО САПР.
3. Формирование однородной и неоднородной сетки расчета с помощью ПО САПР. Гетеропереходы в полупроводниковых структурах. Образование потенциальной ямы на гетерогранице.
4. Уравнение Пуассона. Решение уравнения Пуассона на примере линейного p - n перехода. Виды численного моделирования полупроводниковых устройств и схем на их основе.

5. Основные технологические операции, применяемые в полупроводниковой электронике. Осуществление выбора и подключения моделей в ПО САПР.

6. Образование двумерного электронного газа в *HEM*-структурах. Способы формирования топологии полупроводникового устройства с помощью ПО САПР.

7. Выходные статические характеристики *HEM*-транзистора при схеме подключения с общим затвором. Формирование однородного и неоднородного распределения примеси средствами ПО САПР.

8. Выходные динамические характеристики *HEM*-транзистора при схеме подключения с общим затвором. Формирование однородного и неоднородного распределения примеси средствами ПО САПР.

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 «Среда электронного обучения iDO» - <https://lms.tsu.ru/course/view.php?id=00000>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Игнатов А. Н. Микросхемотехника и наноэлектроника / Игнатов А. Н.. - Санкт-Петербург : Лань. 2021. - 528 с.

2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие для студентов вузов. – 9-е изд. – СПб: Лань, 2021. – 480 с.

3. Родионов Ю. А. Химические технологии в производстве микроэлектромеханических систем / Родионов Ю. А.. - Санкт-Петербург : Лань. 2021. - 220 с.

б) дополнительная литература:

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

2. Петров М. Н. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем / Петров М. Н., Гудков Г. В.. - Санкт-Петербург : Лань. 2021. - 464 с.

3. Смирнов Ю. А. Основы нано- и функциональной электроники / Смирнов Ю. А., Соколов С. В., Титов Е. В.. - 2-е изд., испр.. - Санкт-Петербург : Лань. 2021. - 320 с.

4. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 : учебное пособие для вузов / Амелина М. А., Амелин С. А.. - 3-е изд., стер.. - Санкт-Петербург : Лань. 2021. - 632 с.

5. Малянов С.В., Калыгина В.М. Сборник задач по физике биполярных полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2008. – 112 с.

6. Бурбаева Н.В., Днепровская Т.С. Основы полупроводниковой электроники. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 312 с.

7. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – М.: Физматлит, 2008. – 488 с.

в) ресурсы сети Интернет:

1. Гермогенов В.П., Вячистая Ю.В. Полупроводниковая электроника [Электрон. ресурс]: электронный учебный курс на базе виртуальной обучающей среды «Среда электронного обучения iDO» Электрон. дан. – Томск: ТГУ, 2014. – URL: <http://lms.tsu.ru/course/view.php?id=1821>
2. Гермогенов В.П., Вячистая Ю.В. Полупроводниковая оптоэлектроника [Электрон. ресурс]: электронный учебный курс на базе виртуальной обучающей среды «Среда электронного обучения iDO» Электрон. дан. – Томск: ТГУ, 2014. – URL: <http://lms.tsu.ru/course/view.php?id=1825>
3. Полупроводниковые приборы (материалы клуба 155): электронный ресурс. – URL: <http://www.club155.ru/stintro>
4. Полупроводниковые и оптоэлектронные приборы (Методичкус): электронный ресурс. – URL: <https://3ys.ru/poluprovodnikovye-i-optoelektronnye-pribory.html>
5. Демонстрационные модели свойств полупроводников и полупроводниковых приборов (Purdue University, Gerhard Klimeck, Benjamin P Haley): электронный ресурс. – URL: <https://nanohub.org/resources/6842>
6. Технология микро- и нанoeлектроники (Единое окно доступа к образовательным ресурсам). – URL: http://window.edu.ru/catalog/resources?p_rubr=2.2.75.26.43
7. Физика и техника полупроводников (научный журнал РАН): электронная версия. – URL: <https://journals.ioffe.ru/journals/2>

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.).
- ПО COMSOL Multiphysics (Semiconductor Module, Wave Optics Module, License number 9602720).

б) информационные справочные системы:

1. Новые полупроводниковые материалы. Характеристики и свойства: база данных ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – URL: <http://www.matprop.ru/>
2. Справочник по электронным компонентам. – URL: <http://kazus.ru/>
3. Электронные компоненты: каталог товаров группы компаний «Промэлектроника». – URL: <http://www.promelec.ru/>
4. eLIBRARY.RU: Научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/defaultx.asp?>
5. Электронно-библиотечная система «Лань» (доступ из сети НИ ТГУ). – URL: <http://e.lanbook.com/>
6. Scopus: база данных цитирования издательства Elsevier (доступ из сети НИ ТГУ). – URL: <http://www.scopus.com/>

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.

Освоение практической части дисциплины обеспечено наличием компьютерного класса, подготовленного для моделирования характеристик полупроводниковых приборов с помощью ПО САПР.

15. Информация о разработчиках

Прудаев Илья Анатольевич, кандидат физико-математических наук, Томский государственный университет, доцент