

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

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан ФФ



С.Н. Филимонов

2021 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика полупроводниковых приборов

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Профиль подготовки:

«Фундаментальная физика»

Форма обучения

Очная

Квалификация

Бакалавр


Год приема

2021

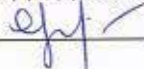
Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.ДВ.01.06.12

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

Томск – 2021

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК-2 – способность проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;
- ПК-1 – способность проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК-2.2. Знает основы анализа и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования, необходимые для освоения и применения современных методов решений профессиональных задач;

ИПК-1.1. Владеет навыками сбора и анализа научно-технической информации по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования

2. Задачи освоения дисциплины

- Освоить аппарат курса физика полупроводниковых приборов.
- Научиться применять понятийный аппарат курса физика полупроводниковых приборов для решения практических задач профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к части, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

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

Семестр 7, зачет с оценкой.

Семестр 8, экзамен.

5. Входные требования для освоения дисциплины

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

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по дисциплинам модулей: «Общая физика», «Математическая физика», «Физика полупроводников»

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 8 з.е., 288 часов, из которых:

- лекции: 98 ч.;
- лабораторные работы: 28 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Электронно-дырочные переходы (р-п переходы).

Характеристики потенциального барьера. Вольт-амперные характеристики идеального р-п перехода. Особенности реальных р-п переходов. Пробой в р-п переходе. р-п переход на малом переменном сигнале. Переходные процессы в р-п переходе. Туннельный диод (принцип действия, вольт-амперная характеристика, анализ эквивалентной схемы.) Обращённый диод.

Тема 2. Гетеропереходы.

Развитие представлений о гетеропереходах. Анизотипные и изотипные гетеропереходы: энергетические диаграммы и механизмы токопохождения. Инжекционные свойства анизотипных гетеропереходов. Гетероструктурные системы на основе полупроводников АЗВ5: принципы подбора практических гетероструктурных систем, гетероструктуры на основе тройных и четверных твёрдых растворов. Двумерный электронный газ в гетеропереходах и возможные приложения. Сверхрешётки, резонансное туннелирование в сверхрешётках, резонансно-туннельные диоды.

Тема 3. Контакт металл-полупроводник (КМП) и приборы на его основе.

Энергетическая диаграмма КМП. Термоэлектронная эмиссия с поверхности полупроводника (П) и металла (М). Контактная разность потенциалов. Контакты М с полупроводниками п- и р-типа. Свойства обедненного слоя в КМП. Прохождение тока через КМП: эффект Шоттки, диодная и диффузионная теории выпрямления, туннелирование в КМП с барьером Шоттки (БШ).

Особенности реальных КМП с БШ. Модель Бардина: промежуточный слой и поверхностные электронные состояния. Высота барьера в реальных КМП. Вольт-амперная характеристика реальных КМП. Омические (невыпрямляющие) КМП; теоретические и реальные зависимости сопротивления контакта от параметров П. Принципы создания реальных омических контактов. Общие требования к материалу и конструкции полупроводниковых приборов (ПП) на основе КМП. Диоды с барьером Мотта. Полупроводниковые сверхвысокочастотные (СВЧ) диоды на основе КМП с БШ. Детекторные и варакторные (настроенные, параметрические) диоды.

Тема 4. Биполярные транзисторы.

Структура (геометрия) БТ. Планарный транзистор. Принцип действия БТ. Токи в транзисторе. Коэффициент усиления тока БТ, реальные факторы, влияющие на коэффициент усиления. БТ с эмиттерным гетеропереходом. Статические (входные и выходные) характеристики БТ в схемах с общей базой и общим эмиттером. Системы параметров транзистора (y - z - h - системы). БТ на переменном сигнале. Эквивалентная схема транзистора. Частотные свойства БТ, способы (пути) повышения предельной частоты БТ; дрейфовый транзистор. Конструктивные пути создания СВЧ БТ и мощных БТ.

Тема 5. Полевые транзисторы с р-п переходом и бар. Шоттки в качестве затвора.

Принцип действия и конструкция ПТ. Основные особенности и достоинства. в сравнении с БТ. Статические характеристики ПТ. Основные характеристики и параметры ПТ в усилительном режиме. Пути повышения крутизны ПТ. Работа ПТ в режиме ключа. Частотные свойства ПТ (эквивалентная схема). Пути повышения предельной частоты и мощности ПТ и уменьшения паразитной обратной связи. Особенности характеристик БТ с коротким каналом: эффект насыщения в ПТ с затвором Шоттки, эффект баллистического переноса электронов. ПТ с высокой подвижностью электронов (НЕМТ)..

Тема 6. Полевые транзисторы с изолированным затвором.

Свойства структуры металл-диэлектрик-полупроводник: режимы аккумуляции, истощения и инверсии; эффект поля. Энергетическая диаграмма и вольт-фарадная характеристика МДП-структуры. Пороговое напряжение и потенциал инверсии. Подвижный заряд в инверсионном слое. Конструкция и принцип работы МДП-ПТ. Статические характеристики МДП-ПТ. Работа ПТ в режиме ключа и усилительном режиме. Параметры усилительного режима: крутизна, выходная проводимость, пороговое напряжение. Частотные свойства МДП-ПТ, эквивалентная схема, факторы, определяющие предельную частоту МДП-ПТ. Короткоканальные эффекты в МДП-ПТ, принцип "масштабирования" при конструировании МДП-ПТ. Типы МДП-ПТ.

Темы лабораторных работ:

1. Изучение зависимости барьерной емкости полупроводникового диода с р–п-переходом от напряжения.
2. Изучение вольт-амперной характеристики полупроводникового диода с р–п-переходом.
3. Изучение переходной характеристики переключения полупроводникового диода из пропускного в запирающее состояние.
4. Изучение вольт-амперной характеристики туннельного диода.
5. Исследование параметров диода Ганна.
6. Изучение статических характеристик биполярного транзистора.
7. Исследование характеристик полевого транзистора с р–п-переходом в качестве затвора.
8. Изучение частотной зависимости коэффициента передачи тока биполярного транзистора.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, выполнения практических заданий, выполнения лабораторных работ и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет с оценкой в седьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. К зачету допускаются студенты, успешно прошедшие все текущие аттестации. Билет содержит теоретический вопрос и задачу. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Примерный перечень теоретических вопросов:

1. Энергетическая диаграмма КМП. Термоэлектронная эмиссия с поверхности полупроводника и металла.
2. Контактная разность потенциалов. Контакты металла с полупроводниками n- и p-типа.
3. Диодная теория выпрямления.
4. Диффузионная теория выпрямления.
5. Омические (невыпрямляющие) контакты металл-полупроводник.
6. Особенности реальных КМП с БШ. Модель Бардина: промежуточный слой и поверхностные электронные состояния.
7. Высота барьера в реальных КМП. Вольт-амперная характеристика реальных КМП.
8. Диоды с барьером Мотта.
9. Полупроводниковые сверхвысокочастотные (СВЧ) диоды на основе КМП с БШ.
10. Детекторные и варакторные (настроечные, параметрические) диоды.
11. Характеристики потенциального барьера. Вольт-амперные характеристики идеального р-п перехода.

12. Особенности реальных p-n переходов.
13. Пробой в p-n переходе. p-n переход.
14. Переходные процессы в p-n переходе.
15. Туннельный диод (принцип действия, вольт-амперная характеристика, анализ эквивалентной схемы.).
16. Анизотипные и изотипные гетеропереходы: энергетические диаграммы и механизмы токопохождения.
17. Инжекционные свойства анизотипных гетеропереходов.
18. Гетероструктурные системы на основе полупроводников АЗВ5.
19. Двумерный электронный газ в гетеропереходах и возможные приложения.

Примеры задач:

1. Задача 1.

Рассчитать контактную разность потенциалов p-n перехода. p-n переход считать резким (ступенчатым).

Вариант 1. Материал – кремний. Температура p-n перехода 300°K. Концентрация акцепторной примеси равна 10^{17} см^{-3} , концентрация донорной примеси 10^{15} см^{-3} .

Вариант 2. Материал – кремний. Температура p-n перехода 350°K. Концентрация акцепторной примеси равна 10^{16} см^{-3} , концентрация донорной примеси 10^{16} см^{-3} .

Вариант 3. Материал – германий. Температура p-n перехода 300°K. Концентрация акцепторной примеси равна 10^{16} см^{-3} , концентрация донорной примеси 10^{16} см^{-3} .

Вариант 4. Материал – GaAs. Температура p-n перехода 300°K. Концентрация акцепторной примеси равна 10^{14} см^{-3} , концентрация донорной примеси $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

2. Задача 2.

Рассчитать барьерную емкость резкого ступенчатого p-n перехода на базе кремния при температуре 300°K. Площадь поперечного сечения p-n перехода считать равной 0.5 мм^2 , удельную проводимость p-области диода равной $10 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, n-области $1 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$.

Вариант 1. В отсутствии напряжения на p-n переходе.

Вариант 2. При обратном смещении на p-n переходе равном 5 В.

Вариант 3. При обратном смещении на p-n переходе равном 10 В.

Вариант 4. При обратном смещении на p-n переходе равном 15 В.

3. Задача 3.

Рассчитать ширину области пространственного заряда и величину максимальной напряжённости электрического поля резкого ступенчатого p-n перехода на базе GaAs при температуре 350°K. Удельное сопротивление n-области считать равным $0.003 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, p-области $0.01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Вариант 1. В отсутствии напряжения на p-n переходе.

Вариант 2. При обратном смещении на p-n переходе равном 5 В.

Вариант 3. При обратном смещении на p-n переходе равном 10 В.

Вариант 4. При обратном смещении на p-n переходе равном 15 В.

4. Задача 4.

Рассчитать величину прямого тока, протекающего через резкий ступенчатый германиевый p-n переход с полуограниченной базой при температуре 300°K. Площадь поперечного сечения диода равна 0.05 мм^2 . Удельное сопротивление p-Области равно $0.02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, n-Области $0.4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Время жизни неосновных носителей заряда в базе диода считать равным 50 нс.

Вариант 1. При прямом смещении на p-n переходе равном 0.1 В.

Вариант 2. При прямом смещении на р-п переходе равном 0.15 В.

Вариант 3. При прямом смещении на р-п переходе равном 0.2 В.

Результаты зачета с оценкой определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Оценка результатов экзамена формируется в соответствии с таблицей 10.1.

Таблица 10.1

Оценка	Результат, продемонстрированный студентом на экзамене
Отлично	Студент, твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, способен самостоятельно принимать и обосновывать решения, оценивать их эффективность.
Хорошо	Студент твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает не критичные неточности в ответе
Удовлетворительно	Студент, показывает фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно точно формулирует базовые понятия.
Неудовлетворительно	Студенту не знает большей части основного содержания дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины.

Экзамен в восьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из двух частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Первая часть содержит вопрос, проверяющий ИОПК-2.2. Ответ на вопрос первой части дается в развернутой форме.

Вторая часть содержит вопрос, проверяющий ИПК-1.1. Ответ на вопрос второй части дается в развернутой форме.

Примерный перечень теоретических вопросов для первой и второй части:

1. Структура (геометрия) БТ. Планарный транзистор. Принцип действия БТ.
2. Токи в транзисторе. Коэффициент усиления тока БТ, реальные факторы, влияющие на коэффициент усиления.
3. Статические (входные и выходные) характеристики БТ в схемах с общей базой и общим эмиттером.
4. Частотные свойства БТ, способы (пути) повышения предельной частоты БТ; дрейфовый транзистор. Конструктивные пути создания СВЧ БТ и мощных БТ
5. Принцип действия и конструкция ПТ. Основные особенности и достоинства. в сравнении с БТ.
6. Статические характеристики ПТ. Основные характеристики и параметры ПТ в усилительном режиме. Пути повышения крутизны ПТ.
7. Работа ПТ в режиме ключа. Частотные свойства ПТ (эквивалентная схема). Пути повышения предельной частоты и мощности ПТ и уменьшения паразитной обратной связи.
8. Особенности характеристик БТ с коротким каналом: эффект насыщения в ПТ с затвором Шоттки, эффект баллистического переноса электронов. ПТ с высокой подвижностью электронов (HEMT).
9. Свойства структуры металл-диэлектрик-полупроводник: режимы аккумуляции, истощения и инверсии; эффект поля.
10. Энергетическая диаграмма и вольт-фарадная характеристика МДП-структуры. Пороговое напряжение и потенциал инверсии.
11. Конструкция и принцип работы МДП-ПТ. Статические характеристики МДП-ПТ.
12. Работа ПТ в режиме ключа и усилительном режиме. Параметры усилительного режима: крутизна, выходная проводимость, пороговое напряжение.

13. Частотные свойства МДП-ПТ, эквивалентная схема, факторы, определяющие предельную частоту МДП-ПТ. Короткоканальные эффекты в МДП-ПТ, принцип "масштабирования" при конструировании МДП-ПТ.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Оценка результатов экзамена формируется в соответствии с таблицей 10.2.

Таблица 10.2

Оценка	Результат, продемонстрированный студентом на экзамене
Отлично	Студент, твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, способен самостоятельно принимать и обосновывать решения, оценивать их эффективность.
Хорошо	Студент твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает не критичные неточности в ответе
Удовлетворительно	Студент, показывает фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно точно формулирует базовые понятия.
Неудовлетворительно	Студенту не знает большей части основного содержания дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины.

11. Учебно-методическое обеспечение

- а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=22040>
- б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.
- в) Методические указания по проведению лабораторных работ.

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>

б) дополнительная литература:

1. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. Перев. с англ. 2-ое перераб. и доп. издание.- М: Мир, 1984.
2. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов / А. И. Лебедев. - Москва: Физматлит, 2008.
3. В.И. Гаман. Физика полупроводниковых приборов. 2-ое перераб. и доп. издание. Томск, 2000 - 425 с.

4. И. М. Викулин, В.И. Стафеев. Физика полупроводниковых приборов. - М.: "Сов. Радио", 1980 - 289 с.

в) ресурсы сети Интернет:

1. Физические основы полупроводниковой оптоэлектроники. (Ермаков О.Н., Пихтин А.Н. и др.) . – URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_491570
2. Гермогенов В.П., Вячислая Ю.В. Материалы, структуры и приборы полупроводниковой оптоэлектроники [Электрон. ресурс]: учебно-методический комплекс. – Электрон. дан. – Томск: ТГУ, 2012. – URL: <http://edu.tsu.ru/eor/resource/787/tpl/index.html> доступ свободный.
3. Технология микро- и нанoeлектроники (Единое окно доступа к образовательным ресурсам). – URL: http://window.edu.ru/catalog/resources?p_rubr=2.2.75.26.43
4. Физика и техника полупроводников (научный журнал РАН): электронная версия. – URL: <https://journals.ioffe.ru/journals/2>
5. Электронный каталог НБ ТГУ (<http://chamo.lib.tsu.ru>)
6. Поисковая система Google Scholar (<https://scholar.google.ru/>)
7. Портал образовательных ресурсов по нанотехнологиям <https://nanohub.org/>

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/>

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

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

в) профессиональные базы данных (*при наличии*):

– Новые полупроводниковые материалы: Характеристики и свойства [Электрон. ресурс] // Интернет-сайт ФТИ им А.Ф.Иоффе РАН, 1998-2001. – URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/rintroduction.html>

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.

15. Информация о разработчиках

Новиков Вадим Александрович, кандидат физ.-мат. наук, кафедра физики полупроводников, физического факультета ТГУ, доцент.