

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич
Должность: врио ректора
Дата подписания: 31.05.2025 15:09:20
Уникальный программный ключ:
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
ФГБОУ ВО «ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Рабочая программа дисциплины

Физика полупроводников и диэлектриков

Закреплена за кафедрой:	Прикладной физики
Направление подготовки:	03.03.03 Радиофизика
Направленность (профиль):	Физика и технология материалов и устройств радиоэлектроники
Квалификация:	Бакалавр
Форма обучения:	очная
Семестр:	6

Программу составил(и):

канд. физ.-мат. наук, доц., Барабанова Екатерина Владимировна

Тверь, 2021

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения дисциплины (модуля):

основные представления физики полупроводников и диэлектриков, включая зонную теорию, статистику носителей тока, элементы теории рассеяния носителей заряда, сведения об основных кинетических явлениях на основе решения кинетического уравнения Больцмана

Задачи:

приобретение знаний о современном состоянии теории и технических приложений преобразователей физических величин, необходимых для решения научно-исследовательских экспериментальных и технических задач, навыки расчета, моделирования, практической работы с преобразователями физических величин

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.В

Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Квантовая механика

Физика атомного ядра и элементарных частиц

Электродинамика

Атомная физика

Дифференциальные уравнения

Векторный и тензорный анализ

Математический анализ

Электричество и магнетизм

Теория вероятностей и математическая статистика

Механика

Молекулярная физика

Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:

Материаловедение электронной техники

Технологическая практика

Физика и технологии функциональных материалов

Преддипломная практика

3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
в том числе:	
аудиторные занятия	42
самостоятельная работа	39
часов на контроль	27

4. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

ПК-4.1: Осуществляет сбор, обработку, анализ и обобщение передового отечественного и международного опыта в соответствующей области исследований

ПК-4.2: Применяет методы анализа научно-технической информации

ПК-4.3: Оформляет результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

ПК-4.4: Решает аналитические задачи в области физического материаловедения

УК-1.1: Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие

УК-1.2: Определяет, интерпретирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи

УК-1.3: Осуществляет поиск информации для решения поставленной задачи по различным типам запросов

УК-1.5: Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки

5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

Виды контроля в семестрах:	
экзамены	6

6. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ

Язык преподавания: русский.

7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Код занят.	Наименование разделов и тем	Вид занятия	Семестр / Курс	Часов	Источники	Примечание
	Раздел 1. Полупроводники. Роль полупроводников в современной физике и технике. Особенности их кристаллической структуры и характер химической связи. Основные понятия физики полупроводников.					
1.1	Полупроводники. Роль полупроводников в современной физике и технике. Особенности их кристаллической структуры и характер химической связи. Основные понятия физики полупроводников.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3 Л1.4	
1.2	Полупроводники. Роль полупроводников в современной физике и технике. Особенности их кристаллической структуры и характер химической связи. Основные понятия физики полупроводников	Ср	6	4		

	Раздел 2. Элементы зонной теории твердого тела. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение. Волновая функция электрона в периодическом поле. Спектр электрона, движущегося в периодическом поле. Зоны Бриллюэна. Граничные условия Борна-Кармена.					
2.1	Элементы зонной теории твердого тела. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение. Волновая функция электрона в периодическом поле. Спектр электрона, движущегося в периодическом поле. Зоны Бриллюэна. Граничные условия Борна-Кармена.	Лек	6	4		
2.2	Элементы зонной теории твердого тела. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение. Волновая функция электрона в периодическом поле. Спектр электрона, движущегося в периодическом поле. Зоны Бриллюэна. Граничные условия Борна-Кармена.	Ср	6	8		
2.3	Элементы зонной теории твердого тела. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение. Одноэлектронное приближение. Волновая функция электрона в периодическом поле. Спектр электрона, движущегося в периодическом поле. Зоны Бриллюэна. Граничные условия Борна-Кармена.	Пр	6	1		

	Раздел 3. Энергетические зоны. Физический смысл приближений сильно связанных и слабо связанных электронов. Изоэнергетические поверхности. Эффективная масса.					
3.1	Энергетические зоны. Физический смысл приближений сильно связанных и слабо связанных электронов. Изоэнергетические поверхности. Эффективная масса.	Лек	6	4		
3.2	Энергетические зоны. Физический смысл приближений сильно связанных и слабо связанных электронов. Изоэнергетические поверхности. Эффективная масса.	Пр	6	1		
3.3	Энергетические зоны. Физический смысл приближений сильно связанных и слабо связанных электронов. Изоэнергетические поверхности. Эффективная масса.	Ср	6	4		
	Раздел 4. Особенности образования энергетических зон в кристалле (неперекрывающиеся и прерывающиеся зоны, смыкающиеся зоны, вырождение зон), зона проводимости, валентная и запрещенная зоны. Классификация материалов по зонной структуре.					
4.1	Особенности образования энергетических зон в кристалле (неперекрывающиеся и прерывающиеся зоны, смыкающиеся зоны, вырождение зон), зона проводимости, валентная и запрещенная зоны. Классификация материалов по зонной структуре.	Лек	6	2		

4.2	Особенности образования энергетических зон в кристалле (неперекрывающиеся и прерывающиеся зоны, смыкающиеся зоны, вырождение зон), зона проводимости, валентная и запрещенная зоны. Классификация материалов по зонной структуре.	Ср	6	2		
	Раздел 5. Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Статистика Ферми-Дирака. Распределение квантовых состояний в зонах. Случаи невырожденных и сильно вырожденных полупроводников, критерии вырождения.					
5.1	Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Статистика Ферми-Дирака. Распределение квантовых состояний в зонах. Случаи невырожденных и сильно вырожденных полупроводников, критерии вырождения.	Лек	6	2		
5.2	Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Статистика Ферми-Дирака. Распределение квантовых состояний в зонах. Случаи невырожденных и сильно вырожденных полупроводников, критерии вырождения.	Ср	6	3		
	Раздел 6. Уравнение электрической нейтральности. Уровень Ферми в собственном полупроводнике. Зависимость уровня Ферми от температуры. Концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике.					
6.1	Уравнение электрической нейтральности. Уровень Ферми в собственном полупроводнике. Зависимость уровня Ферми от температуры. Концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике.	Лек	6	2		

6.2	Уравнение электрической нейтральности. Уровень Ферми в собственном полупроводнике. Зависимость уровня Ферми от температуры. Концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике.	Пр	6	2		
6.3	Уравнение электрической нейтральности. Уровень Ферми в собственном полупроводнике. Зависимость уровня Ферми от температуры. Концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике.	Ср	6	4		
	Раздел 7. Энергетические уровни дефектов и примесей в полупроводниках. Уровень Ферми в примесных полупроводниках, зависимость уровня Ферми от температуры. Концентрация электронов и дырок в вырожденных и невырожденных примесных полупроводниках.					
7.1	Энергетические уровни дефектов и примесей в полупроводниках. Уровень Ферми в примесных полупроводниках, зависимость уровня Ферми от температуры. Концентрация электронов и дырок в вырожденных и невырожденных примесных полупроводниках.	Лек	6	2		
7.2	Энергетические уровни дефектов и примесей в полупроводниках. Уровень Ферми в примесных полупроводниках, зависимость уровня Ферми от температуры. Концентрация электронов и дырок в вырожденных и невырожденных примесных полупроводниках.	Пр	6	2		

7.3	Энергетические уровни дефектов и примесей в полупроводниках. Уровень Ферми в примесных полупроводниках, зависимость уровня Ферми от температуры. Концентрация электронов и дырок в вырожденных и невырожденных примесных полупроводниках.	Ср	6	4		
	Раздел 8. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Простые центры. Взаимная компенсация доноров и акцепторов. Компенсирующие полупроводник					
8.1	Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Простые центры. Взаимная компенсация доноров и акцепторов. Компенсирующие полупроводник	Лек	6	2		
8.2	Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Простые центры. Взаимная компенсация доноров и акцепторов. Компенсирующие полупроводник	Ср	6	2		
	Раздел 9. Электропроводность полупроводников. Явления переноса. Кинетическое уравнение Больцмана.					
9.1	Электропроводность полупроводников. Явления переноса. Кинетическое уравнение Больцмана	Лек	6	2		
9.2	Электропроводность полупроводников. Явления переноса. Кинетическое уравнение Больцмана	Пр	6	2		
9.3	Электропроводность полупроводников. Явления переноса. Кинетическое уравнение Больцмана	Ср	6	2		
	Раздел 10. Рассеяние носителей заряда.					
10.1	Рассеяние носителей заряда.	Лек	6	2		
10.2	Рассеяние носителей заряда.	Пр	6	2		
10.3	Рассеяние носителей заряда.	Ср	6	2		

	Раздел 11. Колебания решетки кристалла. Статистика Бозе-Эйнштейна. Фононы.					
11.1	Колебания решетки кристалла. Статистика Бозе-Эйнштейна. Фононы.	Лек	6	2		
11.2	Колебания решетки кристалла. Статистика Бозе-Эйнштейна. Фононы.	Пр	6	2		
11.3	Колебания решетки кристалла. Статистика Бозе-Эйнштейна. Фононы.	Ср	6	2		
	Раздел 12. Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда.					
12.1	Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда.	Лек	6	2		
12.2	Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда.	Пр	6	2		
12.3	Неравновесные носители заряда. Генерация и рекомбинация носителей заряда.	Ср	6	2		
	Раздел 13. Экзамен					
13.1	экзамен	Экзамен	6	27		

Список образовательных технологий

1	Дискуссионные технологии (форум, симпозиум, дебаты, аквариумная дискуссия, панельная дискуссия, круглый стол, фасилитированная и т.д.)
2	Информационные (цифровые) технологии
3	Технологии развития критического мышления
4	Активное слушание

8. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

8.1. Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

Вопросы для проверки знаний на семинарских занятиях:

1. Квантовомеханическое описание атома водорода. Квантовые числа.
2. Химические связи.
3. Уравнение Шредингера для свободных электронов и электронов в идеальном кристалле.
4. Адиабатическое и одноэлектронное приближение.

5. Приближение сильной и слабой связи.
6. Число состояний в разрешенной зоне. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна.
7. Закон дисперсии. Зависимость энергии электрона от волнового вектора у дна и потолка энергетической зоны.
8. Эффективная масса электрона. Изоэнергетические поверхности.
9. Движение электрона в кристалле под действием электрического поля.
10. Зонная теория твердых тел. Металлы, диэлектрики и полупроводники.
11. Функция распределения электронов по энергетическим состояниям (функция Ферми-Дирака). Плотность квантовых состояний.
12. Концентрация свободных носителей в разрешенных зонах.
13. Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике. Температурная зависимость уровня Ферми.
14. Уравнение электронейтральности. Степень заполнения примесных уровней.
15. Примесные невырожденные полупроводники. Температурная зависимость уровня Ферми в полупроводниках с одним типом примеси.
16. Примесные вырожденные полупроводники
17. Кинетическое уравнение Больцмана
18. Электропроводность полупроводников.
19. Подвижность носителей заряда. Время релаксации.
20. Тепловые колебания решетки
21. Рассеяние носителей заряда. Эффективное сечение рассеяния. Вероятность рассеяния.
22. Механизмы рассеяния электронов и дырок

8.2. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации

см. приложение

8.3. Требования к рейтинг-контролю

Форма проведения экзамена: студенты, освоившие программу курса «Физика полупроводников и диэлектриков» могут получить оценку по итогам семестровой и полусеместровой рейтинговой аттестации согласно «Положению о рейтинговой системе обучения ТвГУ»

Если условия «Положения о рейтинговой системе ...» не выполнены, то экзамен сдается согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ»

Дисциплина заканчивается экзаменом. Количество баллов, отводимых на семестр - 60:

модульные контрольные работы - по 10 баллов
текущая работа, выполнение домашних заданий - 40 баллов

На экзамен выносятся 40 баллов.

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

9.1. Рекомендуемая литература

9.1.1. Основная литература

Шифр	Литература
Л1.1	Авдеев, Краткий обзор теории полупроводниковых структур, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2018, ISBN: 978-5-9275-2721-2, URL: https://znanium.com/catalog/document?id=339864

Л1.2	Ансельм А. И., Введение в теорию полупроводников, Санкт-Петербург: Лань, 2022, ISBN: 978-5-8114-0762-0, URL: https://e.lanbook.com/book/212255
Л1.3	Епифанов Г. И., Физика твердого тела, Санкт-Петербург: Лань, 2022, ISBN: 978-5-8114-1001-9, URL: https://e.lanbook.com/book/210671
Л1.4	Шалимова К. В., Физика полупроводников, Санкт-Петербург: Лань, 2022, ISBN: 978-5-8114-0922-8, URL: https://e.lanbook.com/book/210524

9.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет"

Э1	К. Зеегер. Физика полупроводников: http://ikfia.ysn.ru/wp-content/uploads/2018/01/Zeeger1977ru.pdf
Э2	В.П. ПЛОТНИКОВ ФИЗИКА ПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ: https://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2004/plotnikov.pdf

9.3.1 Перечень программного обеспечения

1	Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows
2	Adobe Acrobat Reader
3	Google Chrome
4	OpenOffice
5	Mozilla Firefox
6	Notepad++

9.3.2 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1	ЭБС ТвГУ
2	ЭБС «Лань»
3	ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
4	ЭБС «ЮРАИТ»
5	ЭБС «ZNANIUM.COM»

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
3-227	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран

11. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Литература:

1. В.Л.Бонч-Бруевич и С.Г.Калашников Физика полупроводников, М., Наука, 1977
2. А.И.Ансельм Введение в теорию полупроводников М., ФМЛ. 1962
3. Ч. Киттель Введение в физику твердого тела М., Наука, 1978
4. Дж.Слэтер Диэлектрики, полупроводники, металлы М., Мир, 1969
6. Н. Ашкрофт, М. Мермин Физика твердого тела М., Мир, 1980 5. Дж.Займан Принципы теории твердого тела М., Наука, 1976
7. А.И. Орешкин Физика полупроводников и диэлектриков.. М.: «Высшая школа», 1977. – 448 с

Самостоятельная работа начинается до прихода студента на лекцию. Целесообразно использование «системы опережающего чтения», т.е. предварительного прочитывания лекционного материала, содержащегося в учебниках и учебных пособиях, закладывающего базу для более глубокого восприятия лекции. Работа над лекционным материалом включает два основных этапа: конспектирование лекций и последующую работу над лекционным материалом. Под конспектированием подразумевают составление конспекта, т.е. краткого письменного изложения содержания чего-либо (устного выступления – речи, лекции, доклада и т.п. или письменного источника – документа, статьи, книги и т.п.).

Методика работы при конспектировании устных выступлений значительно отличается от методики работы при конспектировании письменных источников. Конспектируя письменные источники, студент имеет возможность неоднократно прочитать нужный отрывок текста, поразмыслить над ним, выделить основные мысли автора, кратко сформулировать их, а затем записать. При необходимости он может отметить и свое отношение к этой точке зрения. Слушая же лекцию, студент большую часть комплекса указанных выше работ должен откладывать на другое время, стремясь использовать каждую минуту на запись лекции, а не на ее осмысление – для этого уже не остается времени. Поэтому при конспектировании лекции рекомендуется на каждой странице отделять поля для последующих записей в дополнение к конспекту.

Записав лекцию или составив ее конспект, не следует оставлять работу над лекционным материалом до начала подготовки к зачету. Нужно проделать как можно раньше ту работу, которая сопровождает конспектирование письменных источников и которую не удалось сделать во время записи лекции: прочесть свои записи, расшифровав отдельные сокращения, проанализировать текст, установить логические связи между его элементами, выделить главные мысли, отметить вопросы, требующие дополнительной обработки, в частности, консультации преподавателя.

В процессе организации самостоятельной работы большое значение имеют консультации с преподавателем, в ходе которых можно решить многие проблемы изучаемого курса, уяснить сложные вопросы. Беседа студента и преподавателя может дать многое - это простой прием получения знаний. Самостоятельная работа носит сугубо индивидуальный характер, однако вполне возможно и коллективное осмысление проблем.

Методические рекомендации по подготовке к экзамену

Экзамен - важные этапы в учебном процессе, имеющие целью проверку знаний, выявление умений применять полученные знания к решению практических задач. Как подготовка к экзамену, так и сам экзамен - форма активизации и систематизации полученных знаний, их углубления и закрепления.

Для экзамена необходимо следующее: экзаменационные вопросы; материалы курса; ваши КР; ваши записи; ваш преподаватель; ваша учебная группа; учебные занятия.

Рекомендуем воспользоваться общими советами.

1. Используйте экзаменационные вопросы. Это даст Вам верное представление о том, что нужно ожидать на экзамене. Попрактикуйтесь в написании ответов на вопросы, стараясь уложиться в отведённое время, но при этом имейте под руками материалы курса, чтобы проверить Вашу память на относящиеся к делу идеи и концепции.

2. Используйте материалы курса. У Вас будут хорошие шансы сдать экзамен успешно, если Вы используете материалы курса в Ваших ответах на экзаменационные вопросы. Постарайтесь бегло просмотреть основные идеи курса, когда у Вас появится некоторое время для обдумывания.

3. Прибегните к помощи Вашего преподавателя и других студентов Вашей группы.

4. Используйте лекции и учебные занятия для подготовки к зачету и экзамену.

Примеры заданий для контрольной работы:

Чему равна концентрация носителей заряда натрия при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, если подвижность электронов $0,56 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/(\text{Вс})$, а электропроводность $0,23 \cdot 10^8 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$?

Период решетки a одномерного кристалла равен $3\text{ \AA}$. Определить максимальную энергию фононов, распространяющихся вдоль этой цепочки атомов. Скорость звука в кристалле равна 5000 м/с .

Ширина запрещенной зоны E_g собственного кремния равна $1,12 \text{ эВ}$. Вычислить вероятность заполнения электроном уровня вблизи дна зоны проводимости при температурах 0 и 300 К .

Образец кремния n -типа имеет размеры: длина 10 мм , ширина 2 мм и толщина 1 мм . Подвижности электронов и дырок равны соответственно $0,12$ и $0,05 \text{ м}^2/(\text{Вс})$, концентрация собственных носителей заряда $n_i = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Определить концентрацию донорной примеси в образце, если сопротивление образца $R = 150 \text{ Ом}$.

Сравнить концентрации свободных электронов в беспримесном германии при температурах $T_1 = 200 \text{ К}$ и $T_2 = 300 \text{ К}$, пренебрегая изменением эффективных плотностей состояний в зоне проводимости N_c и валентной зоне N_v при изменении температуры. Ширина запрещенной зоны в германии $E_g = 0,7 \text{ эВ}$.

Критерии оценивания:

Все правильно решено и оформлено – 3 балла

Допущена вычислительная ошибка – 2 балла

Ход решения частично верный - 1 балл

Задача не решена – 0 баллов