

Документ подписан электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 10.07.2024 12:02:42  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

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

Утверждаю:  
Руководитель ООП  
  
Б.Б.Педько  
«21» мая 2024 г.



Рабочая программа дисциплины  
**Физика полупроводников**

Закреплена за кафедрой: **Физики конденсированного состояния**

Направление подготовки: **03.03.02 Физика**

Направленность (профиль): **Физика, технологии и компьютерное моделирование функциональных материалов**

Квалификация: **Бакалавр**

Форма обучения: **очная**

Семестр: **7**

Программу составил(и):  
*канд. физ.-мат. наук, доц., Кислова Инна Леонидовна*



Тверь, 2024

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### Цели освоения дисциплины (модуля):

Изучение теоретических основ макроскопического и микроскопического описания физических свойств полупроводниковых материалов и рассмотрение различных аспектов их практического применения.

### Задачи:

- Формирование представления о зонной теории полупроводников;
- изучение статистики носителей заряда в полупроводниках;
- знакомство с методом кинетического уравнения Больцмана для описания явлений переноса;
- изучение эффектов, сопровождающих контактные явления в полупроводниках;
- описание современного состояния достижений в области физики полупроводников;
- подготовка студентов к изучению специальных обзоров и оригинальных работ по отдельным вопросам данной области знания.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.В

### Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Кристаллография

Физика конденсированного состояния вещества

Математический анализ

Дифференциальные уравнения

Теория вероятностей и математическая статистика

Электричество и магнетизм

Оптика

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

Нанотехнологии в физике конденсированного состояния

## 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

<b>Общая трудоемкость</b>	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
<b>в том числе:</b>	
аудиторные занятия	52
самостоятельная работа	21
часов на контроль	27

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

ПК-2.1: Проводит экспериментальные исследования с применением научно-исследовательского оборудования в соответствии с утвержденными методиками

ПК-2.2: Анализирует физические явления и процессы в области физики конденсированного состояния и составляет отчет по теме исследования или по результатам проведенных экспериментов

## 5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

Виды контроля в семестрах:	
экзамены	7

**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. 1. Основы зонной теории полупроводников					
1.1	1.1. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
1.2	1.2. Одноэлектронное приближение.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
1.3	1.3. Приближение сильносвязанных электронов.	Ср	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
1.4	1.4. Число состояний в разрешенной зоне. Зоны Бриллюэна.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
1.5	1.5. Метод эффективной массы.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
1.6	1.6. Локализованные состояния.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
1.7	1.7. Поверхностные явления. Квазичастицы.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 2. 2. Статистика электронов и дырок в полупроводниках					

2.1	2.1. Плотность квантовых состояний. Функция распределения Ферми-Дирака.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
2.2	2.1. Плотность квантовых состояний. Функция распределения Ферми-Дирака.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
2.3	2.2. Концентрация электронов и дырок. Примесный полупроводник.	Лаб	7	4	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
2.4	2.2. Концентрация электронов и дырок. Примесный полупроводник.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
2.5	2.3. Уравнение электронейтральности. Собственный полупроводник.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
2.6	2.3. Уравнение электронейтральности. Собственный полупроводник.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
2.7	2.3. Уравнение электронейтральности. Собственный полупроводник.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
2.8	2.4. Невырожденный полупроводник, примесь одного вида.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
2.9	2.4. Невырожденный полупроводник, примесь одного вида.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	

2.10	2.5. Компенсированный полупроводник. Примесная зона.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
2.11	2.5. Компенсированный полупроводник. Примесная зона.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 3. 3. Кинетические явления в полу-проводниках					
3.1	3.1. Кинетическое уравнение Больцмана.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.3 Э1 Э2 Э3 Э4	
3.2	3.1. Кинетическое уравнение Больцмана.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
3.3	3.2. Время релаксации. Общее кинетическое уравнение для стационарного случая.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
3.4	3.2. Время релаксации. Общее кинетическое уравнение для стационарного случая.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
3.5	3.3. Электропроводность полупроводников. Тензорезистивный эффект.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
3.6	3.3. Электропроводность полупроводников. Тензорезистивный эффект.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	

3.7	3.4. Гальваномагнитные эффекты.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
3.8	3.4. Гальваномагнитные эффекты.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
3.9	3.5. Теплопроводность полупроводников. Термоэлектрические явления.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
3.10	3.5. Теплопроводность полупроводников. Термоэлектрические явления.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 4. 4. Теория рассеяния носителей заряда					
4.1	4.1. Рассеяние носителей заряда. Типы центров рассеяния.	Ср	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
4.2	4.2. Рассеяние на ионах примеси.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
4.3	4.3. Рассеяние на нейтральных центрах и тепловых колебаниях решетки.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 5. 5. Рекомбинация носителей заряда					
5.1	5.1. Равновесные и неравновесные носители заряда. Время жизни. Монополярная генерация.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	

5.2	5.1. Равновесные и неравновесные носители заряда. Время жизни. Монополярная генерация.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
5.3	5.2. Межзонная рекомбинация.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
5.4	5.3. Рекомбинация через центры захвата.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
5.5	5.3. Рекомбинация через центры захвата.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
5.6	5.4. Центры прилипания и рекомбинации.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
5.7	5.4. Центры прилипания и рекомбинации.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
5.8	5.5. Поверхностная рекомбинация.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 6. 6. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда					
6.1	6.1. Уравнение непрерывности. Диффузионный и дрейфовый токи. Соотношение Эйнштейна.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	

6.2	6.1. Уравнение непрерывности. Диффузионный и дрейфовый токи. Соотношение Эйнштейна.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
6.3	6.2. Диффузия и дрейф при монополярной генерации. Движение неосновных носителей заряда.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
6.4	6.2. Диффузия и дрейф при монополярной генерации. Движение неосновных носителей заряда.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
6.5	6.3. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при биполярной генерации.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
6.6	6.3. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при биполярной генерации.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 7. 7. Контактные явления в полупроводниках					
7.1	7.1. Полупроводник во внешнем электрическом поле. Работа выхода.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
7.2	7.1. Полупроводник во внешнем электрическом поле. Работа выхода.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
7.3	7.2. Контакт металл-металл. Контактная разность потенциалов. Контакт металл-полупроводник.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	



7.4	7.2. Контакт металл-металл. Контактная разность потенциалов. Контакт металл-полупроводник.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
7.5	7.3. Контакт полупроводников n- и p-типа.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
7.6	7.3. Контакт полупроводников n- и p-типа.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 8. 8. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках					
8.1	8.1. Поглощение света полупроводниками.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
8.2	8.1. Поглощение света полупроводниками.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
8.3	8.2. Фоторезистивный эффект.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
8.4	8.2. Фоторезистивный эффект.	Лаб	7	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
8.5	8.3. Фотогальванические явления.	Лек	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	

8.6	8.3. Фотогальванические явления.	Ср	7	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.3 Л2.2 Э1 Э2 Э3 Э4	
	Раздел 9. Экзамен					
9.1		Экзамен	7	27		

### Список образовательных технологий

1	Активное слушание
2	Дискуссионные технологии (форум, симпозиум, дебаты, аквариумная дискуссия, панельная дискуссия, круглый стол, фасилитированная и т.д.)

## 8. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### 8.1. Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

#### 1. Текущий контроль успеваемости

Самостоятельная работа студентов предполагает:

- обязательное выполнение домашних заданий, предусмотренных лекционными и лабораторными занятиями;
- углубленное изучение литературы и решение задач по пройденным темам и по вопросам, дополнительно указанным преподавателем;
- использование материалов УМК для систематизации знаний и подготовке к занятиям и контрольным работам.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем существенная особенность полупроводников, отличающая их от других видов веществ?
2. Чем объясняется большая чувствительность полупроводников к внешним воздействиям?
3. Чем отличается энергетический спектр электронов в кристалле от спектра в изолированном атоме?
4. Как зависит ширина разрешенной зоны от степени связи электрона с ядром?
5. В чем сущность адиабатического и электронного приближений при решении уравнения Шредингера для электронов в кристалле?
6. Чем отличается потенциальная функция электрона в кристалле от потенциальной функции электрона в изолированном атоме?
7. Что такое квазиимпульс электрона?
8. Каковы различия в зонной структуре металлов, полупроводников и диэлектриков?
9. В чем заключается физический смысл понятия эффективной массы?
10. Что такое собственный полупроводник?
11. Что такое доноры и акцепторы?
12. Приведите примеры точечных, линейных и плоских дефектов?
13. В чем сущность геометрического и электрохимического факторов, определяющих образование растворов замещения или внедрения примесных атомов в кристалле?
14. Какие изменения вносят примеси замещения в энергетический спектр

электронов?

15. Каков будет тип электропроводности кристаллов германия и кремния при легировании их примесью железа, никеля, меди и олова?

16. Что такое амфотерность примесей в полупроводниках? Приведите примеры амфотерных примесей в кристаллах AIV и AIIIIV.

17. Какие виды вакансий могут существовать в кристаллах? Какова физическая природа образования вакансий в кристаллах AIV, AIIIIV и AIIIV?

18. Какие изменения в энергетический спектр электронов вносят вакансии?

19. Что такое уровни Тамма? Какова их природа?

20. Какова природа образования краевой и винтовой дислокации?

21. В чем проявляется влияние дислокаций на энергетический спектр электронов в кристалле?

22. Каков физический смысл функции распределения?

23. Что такое химический потенциал?

24. Каково заполнение электронами энергетических уровней меньших. Чем уровень Ферми, больших уровня Ферми, самого уровня Ферми?

25. Что такое вырождение электронного газа?

26. Где расположен уровень химического потенциала в собственном полупроводнике?

27. В какой из половин запрещенной зоны находится уровень Ферми в полупроводниках n- и p-типов?

28. Что такое рассеяние носителей заряда?

29. Какие величины являются количественной мерой рассеяния?

30. Дайте определение термина «подвижность носителей заряда».

31. Какие внешние силы приводят к возникновению: а) электропроводности; б) эффекта Холла; в) термо- э.д.с.; г) теплопроводности; д) эффекта Нернста- Эттингсхаузена?

32. В чем сущность метода кинетического уравнения?

33. Какие механизмы рассеяния могут проявляться в полупроводниках, содержащих различные дефекты?

34. Какие механизмы рассеяния могут проявляться в полупроводниках, содержащих различные дефекты?

35. В чем состоит физическая сущность рассеяния носителей заряда нейтральными примесями?

36. В чем состоит физическая трактовка рассеяния носителей заряда дислокациями?

37. По какому закону складываются времена релаксации при одновременном действии нескольких механизмов?

38. Как связаны коэффициент Холла и концентрация носителей заряда?

39. Какие существуют термоэлектрические эффекты, в чем их физическая сущность?

40. Какова причина возникновения решеточной составляющей теплопроводности?

41. Какие вы знаете механизмы рассеяния фононов?

42. Какие существуют взаимодействия света с электронами в полупроводниках?

43. В чем состоит сущность прямых и непрямых оптических переходов?

44. Какие переходы называют разрешенными и запрещенными?

45. Каков механизм взаимодействия света с кристаллической решеткой?

46. При каких длинах волн в спектре поглощения германия и кремния обнаруживаются линии поглощения, обусловленные присутствием примеси кислорода в этих кристаллах?

47. Какова природа поглощения света примесными атомами?

48. Что такое экситон?

49. В какой области длин волн наблюдается экситонное поглощение?

50. Какую информацию о свойствах полупроводника можно получить из исследований отражения света?

51. В чем сущность эффекта Фарадея?

52. Что называют процессом генерации электронно-дырочных пар?
53. В чем смысл понятия инжекции носителей заряда?
54. Что называют процессом рекомбинации носителей?
55. Дайте определение скоростей генерации и рекомбинации носителей.
56. Дайте определение времени жизни носителей заряда.
57. Чем отличаются стационарные и нестационарные времена жизни носителей заряда?
58. В чем сущность эффекта прилипания?
59. Какие существуют виды рекомбинации?
60. Какие существуют механизмы рекомбинации? В чем проявляются их различия?
61. Как изменяется значение излучательного времени жизни с изменением степени легирования полупроводника?
62. В каких полупроводниках излучательная межзонная рекомбинация наиболее вероятна?
63. В чем сущность межзонной ударной рекомбинации?
64. Что такое поверхностная рекомбинация? Какую роль она играет при использовании полупроводников в полупроводниковых приборах?
65. Каков физический смысл понятия диффузионной длины? Каким образом она связана с временем жизни носителей заряда?
66. В чем состоит сущность явления фотопроводимости?
67. Как связана фотопроводимость с поглощением света?
68. Что такое красная граница фотопроводимости?
69. Каков механизм фототермической ионизации?
70. Участвуют ли экситоны в возникновении фотопроводимости?
71. Какие вы знаете определения фоточувствительности?
72. В чем состоит отличие моно- и биполярной примесной проводимости?
73. Какова роль заполнения примесных уровней в фотопроводимости?
74. Что такое люкс-амперная характеристика полупроводника? Какими параметрами она определяется?
75. Что такое фотовольтаические явления?
76. Какие условия требуется выполнить для возникновения фотовольтаических явлений?
77. Объясните природу объемной фото-э.д.с.
78. Какова сущность эффекта Дембера?
79. Каков механизм появления фотомагнитной фото-э.д.с.?
80. В чем сущность фотолюминесценции?
81. Какие виды люминесценции вы знаете?
82. От каких факторов зависит интенсивность люминесценции?
83. С чем связано появление контактных явлений?
84. Что такое работа выхода электрона?
85. Что такое контактная разность потенциалов? Каким образом она возникает?
86. Как меняется зонная структура полупроводника в приповерхностном слое в случае контакта металл-полупроводник?
87. Что такое запирающие и антизапирающие слои?
88. Объясните механизм выпрямления тока на контакте металл-полупроводник.
89. Что такое р-п переход? В чем его отличие от контакта металл-полупроводник?
90. Как классифицировать р-п-переходы?
91. Чем отличается гетеропереход от обычного гомогенного перехода?
92. Какое направление принято считать положительным при подсоединении р-п-перехода к источнику внешнего напряжения?

## 8.2. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации

### 2. Промежуточная аттестация

Экзамен предполагает проведение устного опроса по вопросам, список которых

приводится ниже, а также решение задач.

Список вопросов:

1. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение.
2. Одноэлектронное приближение.
3. Периодическое поле и оператор трансляции.
4. Приближение сильно связанных электронов.
5. Число состояний в разрешенной зоне. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна
6. Эффективная масса электрона.
7. Движение электрона в кристалле под действием электрического поля.
8. Элементарная теория примесных состояний.
9. Поверхностные явления.
10. Квазичастицы (полярон, экситон)
11. Плотность квантовых состояний.
12. Функция распределения электронов по энергетическим состояниям (функция Ферми-Дирака).
13. Концентрация свободных носителей в разрешенных зонах.
14. Уравнение электронейтральности. Степень заполнения примесных уровней.
15. Уровень Ферми в собственном полупроводнике.
16. Положение уровня Ферми и концентрация носителей в донорном полупроводнике.
17. Положение уровня Ферми и концентрация носителей в акцепторном полупроводнике.
18. Положение уровня Ферми и концентрация носителей в полупроводнике, содержащем оба вида примеси.
19. Кинетическое уравнение Больцмана.
20. Время релаксации.
21. Электропроводность полупроводников.
22. Гальваномагнитные явления.
23. Теплопроводность полупроводников.
24. Термоэлектрические явления.
25. Рассеяние носителей заряда. Эффективное сечение рассеяния. Вероятность рассеяния.
26. Рассеяние носителей заряда на ионах примеси.
27. Рассеяние носителей заряда на тепловых колебаниях решетки.
28. Равновесные и неравновесные носители заряда.
29. Биполярная генерация носителей.
30. Монополярная генерация.
31. Межзонная излучательная рекомбинация. Межзонная ударная рекомбинация.
32. Рекомбинация носителей заряда через центры захвата.
33. Центры прилипания и центры рекомбинации.
34. Поверхностная рекомбинация.
35. Уравнение непрерывности. Соотношение Эйнштейна.
36. Диффузионный и дрейфовый токи.
37. Диффузия и дрейф неравновесных носителей при монополярной генерации.
38. Движение неосновных носителей заряда в примесном полупроводнике.
39. Полупроводник во внешнем поле.
40. Работа выхода.
41. Контакт металл-полупроводник.
42. Неоднородный полупроводник – контакт полупроводников n- и p-типа.
43. Поглощение света полупроводниками. Типы поглощений света в полупроводниках.
44. Собственное (фундаментальное) поглощение света: прямые и непрямые переходы.
45. Поглощение света свободными носителями заряда.
46. Поглощение света электронами в локализованных состояниях. Поглощение

света решеткой.

- 47. Фоторезистивный эффект.
- 48. Эффект Дембера. Э.д.с. Дембера.
- 49. Вентильная фотоэлектродвижущая сила.

### 8.3. Требования к рейтинг-контролю

Рейтинг за семестр

Первая контрольная точка. Содержание модуля 1: Темы 1 – 3.

Всего за модуль – 30 баллов, из них 15 – текущая работа студентов, 15 – рубежная контрольная работа.

Вторая контрольная точка. Содержание модуля 2: Темы 4 – 6.

Всего за модуль – 30 баллов, из них 20 – текущая работа студентов, 10 – рубежная контрольная работа.

Третья контрольная точка. Экзамен.

Максимальное количество баллов – 40.

Программой предусматривается выполнение письменных контрольных работ в качестве форм рубежного контроля в конце каждого модуля. Для подготовки к рубежному контролю предполагается выполнение домашних заданий по каждой пройденной в течение модуля теме и использование банка контрольных вопросов и заданий УМК.

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

### 9.1. Рекомендуемая литература

#### 9.1.1. Основная литература

Шифр	Литература
Л1.1	Шалимова К. В., Физика полупроводников, Санкт-Петербург: Лань, 2021, ISBN: 978-5-8114-0922-8, URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/167840">https://e.lanbook.com/book/167840</a>
Л1.2	Лебедев А. И., Физика полупроводниковых приборов, Москва: Физматлит, 2008, ISBN: 978-5-9221-0995-6, URL: <a href="https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=68403">https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=68403</a>

#### 9.1.2. Дополнительная литература

Шифр	Литература
Л2.1	Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П., Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики, Санкт-Петербург: Лань, 2021, ISBN: 978-5-8114-2003-2, URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/168852">https://e.lanbook.com/book/168852</a>
Л2.2	Ансельм А. И., Основы статистической физики и термодинамики, Санкт-Петербург: Лань, 2021, ISBN: 978-5-8114-0756-9, URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/167726">https://e.lanbook.com/book/167726</a>
Л2.3	Зегря Г. Г., Перель В. И., Основы физики полупроводников, Москва: Физматлит, 2009, ISBN: 978-5-9221-1005-1, URL: <a href="https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=68394">https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=68394</a>

### 9.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет"

Э1	ЭБС «ИНФРА-М»: <a href="http://www.znaniium.com">http://www.znaniium.com</a>
Э2	ЭБС «Университетская библиотека ОН-ЛАЙН»: <a href="http://www.biblioclub.ru">http://www.biblioclub.ru</a>

Э3	ЭБС «ЛАНЬ»: <a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>
Э4	Сервер информационно-методического обеспечения учебного процесса ТвГУ: <a href="http://edc.tversu.ru">http://edc.tversu.ru</a>

### 9.3.1 Перечень программного обеспечения

1	Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows
2	Adobe Acrobat Reader
3	Google Chrome
4	WinDjView
5	OpenOffice
6	Foxit Reader
7	Mathcad 15 M010

### 9.3.2 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1	ЭБС ТвГУ
2	ЭБС BOOK.ru
3	ЭБС «Лань»
4	ЭБС IPRbooks
5	ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
6	ЭБС «ЮРАИТ»
7	ЭБС «ZNANIUM.COM»

## 10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
3-2026	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, переносной мультимедийный проектор, экран
3-4а	компьютеры, проектор, экран, переносной ноутбук, сумка для ноутбука, коммутатор, видеокамеры
3-35	комплект учебной мебели, экран настенный, переносной ноутбук, проекторы

## 11. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

1) Планы лабораторных занятий и методические рекомендации к ним.

Лабораторные занятия включают в себя экспериментальное или теоретическое исследование свойств и процессов в полупроводниковых материалах и структурах на их основе, а также его обсуждение в группе.

Тема 1. Статистика электронов и дырок в полупроводниках.

Вопросы для обсуждения:

1. Концентрация электронов и дырок. Примесный полупроводник.
2. Уравнение электронейтральности. Собственный полупроводник.
3. Невырожденный полупроводник, при-месь одного вида.
4. Компенсированный полупроводник. Примесная зона.

Тема 2. Кинетические явления в полупроводниках.

Вопросы для обсуждения:

1. Электропроводность полупроводников. Тензорезистивный эффект.
2. Гальваномагнитные эффекты.
3. Теплопроводность полупроводников. Термоэлектрические явления.

Тема 3. Рекомбинация носителей заряда.

Вопросы для обсуждения:

1. Равновесные и неравновесные носители заряда. Время жизни. Монополярная генерация.
2. Рекомбинация через центры захвата.
3. Центры прилипания и рекомбинации.

Тема 4. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда.

Вопросы для обсуждения:

1. Диффузионный и дрейфовый токи.
2. Диффузия и дрейф при монополярной генерации.
3. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при биполярной генерации.

Тема 5. Контактные явления в полупроводниках.

Вопросы для обсуждения:

1. Полупроводник во внешнем электрическом поле.
2. Контакт металл-металл. Контактная разность потенциалов.
3. Контакт металл-полупроводник.
4. Контакт полупроводников n- и p-типа.

Тема 6. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках.

Вопросы для обсуждения:

1. Поглощение света полупроводниками.
2. Фоторезистивный эффект.
3. Фотогальванические явления.

2) Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов:

Самостоятельная работа студентов предполагает:

- обязательное выполнение домашних заданий, предусмотренных лекционными и лабораторными занятиями;
- углубленное изучение литературы и решение задач по пройденным темам и по вопросам, дополнительно указанным преподавателем;
- использование материалов рабочей программы для систематизации знаний и подготовке к занятиям и контрольным работам.

Перечень вопросов для систематизации знаний:

1. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение.
2. Одноэлектронное приближение.
3. Периодическое поле и оператор трансляции.
4. Приближение сильно связанных электронов.
5. Число состояний в разрешенной зоне. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна
6. Эффективная масса электрона.
7. Движение электрона в кристалле под действием электрического поля.
8. Элементарная теория примесных состояний.
9. Поверхностные явления.
10. Квазичастицы (полярон, экситон)
11. Плотность квантовых состояний.
12. Функция распределения электронов по энергетическим состояниям (функция Ферми-Дирака).
13. Концентрация свободных носителей в разрешенных зонах.



14. Уравнение электронейтральности. Степень заполнения примесных уровней.
15. Уровень Ферми в собственном полупроводнике.
16. Положение уровня Ферми и концентрация носителей в донорном полупроводнике.
17. Положение уровня Ферми и концентрация носителей в акцепторном полупроводнике.
18. Положение уровня Ферми и концентрация носителей в полупроводнике, содержащем оба вида примеси.
19. Кинетическое уравнение Больцмана.
20. Время релаксации.
21. Электропроводность полупроводников.
22. Гальваномагнитные явления.
23. Теплопроводность полупроводников.
24. Термоэлектрические явления.
25. Рассеяние носителей заряда. Эффективное сечение рассеяния. Вероятность рассеяния.
26. Рассеяние носителей заряда на ионах примеси.
27. Рассеяние носителей заряда на тепловых колебаниях решетки.
28. Равновесные и неравновесные носители заряда.
29. Биполярная генерация носителей.
30. Монополярная генерация.
31. Межзонная излучательная рекомбинация. Межзонная ударная рекомбинация.
32. Рекомбинация носителей заряда через центры захвата.
33. Центры прилипания и центры рекомбинации.
34. Поверхностная рекомбинация.
35. Уравнение непрерывности. Соотношение Эйнштейна.
36. Диффузионный и дрейфовый токи.
37. Диффузия и дрейф неравновесных носителей при монополярной генерации.
38. Движение неосновных носителей заряда в примесном полупроводнике.
39. Полупроводник во внешнем поле.
40. Работа выхода.
41. Контакт металл-полупроводник.
42. Неоднородный полупроводник – контакт полупроводников n- и p-типа.
43. Поглощение света полупроводниками. Типы поглощений света в полупроводниках.
44. Собственное (фундаментальное) поглощение света: прямые и непрямые переходы.
45. Поглощение света свободными носителями заряда.
46. Поглощение света электронами в локализованных состояниях. Поглощение света решеткой.
47. Фоторезистивный эффект.
48. Эффект Дембера. Э.д.с. Дембера.
49. Вентильная фотоэлектродвижущая сила.

5.3. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

**ПК-2: Способен выполнять экспериментальную работу в области физики и оформлять результаты исследований и разработок**

Номер задания	Правильный ответ (ключ)	Содержание вопроса/задания	Критерии оценивания заданий
<i>Задания закрытого типа</i>			
1	4	Какова величина запрещенной зоны у диэлектриков? менее 1 эВ более 100 эВ порядка 2-3 эВ порядка от 4 эВ	
2	3	Удельная проводимость полупроводников при комнатной температуре изменяется в пределах? от $10^{-10}$ до $10^{10} \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$ от $10$ до $10^4 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$ от $10^{-10}$ до $10^4 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$ от $10^{-4}$ до $10^4 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$	
3	4	Кристаллы, в узлах кристаллической решетки которых располагаются либо одинаковые молекулы с насыщенными связями, либо атомы, инертных газов называют Полупроводниками Металлами Ионными Молекулярными	
4	1	Кристаллы германия и кремния относят к К ковалентным кристаллам К ионным кристаллам К молекулярным кристаллам	
5	1	Удельная электропроводность металлов при комнатных температурах составляет От $10^6 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$ От $10^{-6}$ до $10^8 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$ От $10^4$ до $10^6 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$ От $10^{-4}$ до $10^6 \frac{1}{\text{Ом}\cdot\text{м}}$	
<i>Задания открытого типа</i>			
1		Если под воздействием механического напряжения (или деформации, связанной с напряжением) в кристалле возникает электрическая поляризация, то данный пьезоэффект является _____ (указать прямым или обратным)	
Правильный ответ (ключ)			
<b>прямым</b>			
2		Явление возникновения механической деформации диэлектрика, пропорциональной квадрату приложенного электрического поля называется	
Правильный ответ (ключ)			
<b>электрострикцией</b>			

3	Как прямой, так и обратный пьезоэффекты являются эффектами. (Указать линейными или нелинейными.)	
Правильный ответ (ключ) <b>линейными</b>		
4	Пьезоэлектрический эффект существует только в _____ кристаллах (Указать симметрию кристаллов)	
Правильный ответ (ключ) <b>нецентросимметричных</b>		
5	Сколько основных типов прямого пьезоэлектрического эффекта различают в кристаллах? (написать цифрой)	
Правильный ответ (ключ) <b>4</b>		
6	Явление возникновения деформации в механически свободном (незажатом) пьезоэлектрике при приложении к нему внешнего электрического поля называется	
Правильный ответ (ключ) <b>обратным пьезоэлектрическим эффектом</b>		
7	Можно ли уравнение прямого пьезоэлектрического эффекта выразить и через относительную деформацию кристалла? (Да или Нет)	
Правильный ответ (ключ) <b>Да</b>		

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

#### 6.1. Рекомендуемая литература

##### *а) Основная литература:*

Шалимова, К. В. Физика полупроводников : учебник / К. В. Шалимова. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 384 с. — ISBN 978-5-8114-0922-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/167840>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов: учебное пособие. - М.: Физматлит, 2008. - 488 с. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68403>

##### *б) Дополнительная литература:*

Ансельм, А. И. Введение в теорию полупроводников : учебное пособие / А. И. Ансельм. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 624 с. — ISBN 978-5-8114-0762-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/168898>. — Режим доступа: для авториз. пользователей

Зегря Г. Г. Основы физики полупроводников. - М.: Физматлит, 2009. - 336 с. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68394>

Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учебник / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 448 с. — ISBN 978-5-8114-2003-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/168852>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### 9. СВЕДЕНИЯ ОБ ОБНОВЛЕНИИ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ (ИЛИ МОДУЛЯ)

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины (модуля)	Описание внесенных изменений	Дата и протокол заседания, утвердившего изменения
1	Раздел IV	Скорректирован фонд оценочных средств для проверки уровня сформированности закрепленных за дисциплиной компетенций	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
2	Раздел IV	Скорректированы задания для промежуточной аттестации в соответствии с обновленным «Положением о	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г.

		промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) студентов ТвГУ»	
3	Раздел V	Обновлен перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
4	Раздел IX	Оснащенность аудиторного фонда для проведения учебных занятий и самостоятельной работы студентов согласно «Справки МТО ООП ...»	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
5	Раздел IV	Скорректирован фонд оценочных средств для проверки уровня сформированности закрепленных за дисциплиной компетенций	Протокол Совета ФТФ № 6 от 15.01.2019 г.
6	Раздел IV	Внесены изменения в соответствии с «Положением о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ № 10 от 19.05.2020 г.
7	Раздел IV	Внесены изменения в соответствии с «Положением о рейтинговой системе обучения в ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ № 10 от 19.05.2020 г.
8	Раздел IX	Актуализированы данные на основе Справки МТО ООП	Протокол Совета ФТФ №14 от 03.07.2021
9	Раздел V	Обновлен перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	Протокол Совета ФТФ №14 от 03.07.2021