

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич
Должность: врио ректора
Дата подписания: 21.07.2025 15:23:22
Уникальный программный ключ:
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Утверждаю:

Руководитель ООП



Е.М. Семенова

«24»

июня

2025 г.

Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

Физика полупроводников

Направление подготовки

03.03.02 Физика

профиль

Физика конденсированного состояния вещества

Для студентов

4 курса, очной формы обучения

Составитель: д.ф.-м.н., профессор Солнышкин А.В.

Тверь, 2025

I. Аннотация

1. Цель и задачи дисциплины

Целью дисциплины является изучение теоретических основ макроскопического и микроскопического описания физических свойств полупроводниковых материалов и рассмотрение различных аспектов их практического применения.

Задачами освоения дисциплины являются:

- 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

Дисциплина «Физика полупроводников» изучается в модуле Физика конденсированного состояния Блока 1. Дисциплины части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

Содержательно она закладывает основы знаний для изучения физических свойств и структуры полупроводниковых материалов, технологий их изготовления и принципов работы полупроводников приборов. Для освоения дисциплины необходимы знания и компетенции, приобретенные при предшествующем изучении дисциплин: «Кристаллография», «Физика конденсированного состояния», «Математический анализ». Учебная дисциплина необходима для успешного

освоения курсов «Нанотехнологии в физике конденсированного состояния», «Физические свойства сегнетоэлектриков».

3. Объем дисциплины: 3 зачетные единицы, 108 академических часов, **в том числе:**

контактная аудиторная работа: лекции 30 часов, лабораторные работы 30 часов;

самостоятельная работа: 48 часов из них контроль 27 часов.

4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-2. Способен выполнять экспериментальную работу в области физики и оформлять результаты исследований и разработок.	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. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения

Экзамен в 7 семестре.

6. Язык преподавания: русский.

II. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)		Самос- тоятель- ная работа (час.)
		Лекции	Лабора- торные занятия	
Глава 1. Основы зонной теории полу- проводников				
1.1. Уравнение Шредингера для кристалла. Адиабатическое приближение.	1	1		
1.2. Одноэлектронное приближение.	1	1		
1.3. Приближение сильносвязанных элек- тронов.	2			2
1.4. Число состояний в разрешенной зоне. Зоны Бриллюэна.	1	1		
1.5. Метод эффективной массы.	1	1		
1.6. Локализованные состояния.	1	1		
1.7. Поверхностные явления. Квазичастицы.	2			2
Глава 2. Статистика электронов и дырок в полупроводниках				
2.1. Плотность квантовых состояний. Функция распределения Ферми-Дирака.	2	1		1
2.2. Концентрация электронов и дырок. Примесный полупроводник.	6	1	4	1
2.3. Уравнение электронейтральности. Собственный полупроводник.	6	1	4	1
2.4. Невырожденный полупроводник, при- месь одного вида.	2	1		1

2.5. Компенсированный полупроводник. Примесная зона.	2	1		1
Глава 3. Кинетические явления в полупроводниках				
3.1. Кинетическое уравнение Больцмана.	2	1		1
3.2. Время релаксации. Общее кинетическое уравнение для стационарного случая.	2	1		1
3.3. Электропроводность полупроводников. Тензорезистивный эффект.	6	2	4	
3.4. Гальваномагнитные эффекты.	6	1	4	1
3.5. Теплопроводность полупроводников. Термоэлектрические явления.	5	1	4	
Глава 4. Теория рассеяния носителей заряда				
4.1. Рассеяние носителей заряда. Типы центров рассеяния.	2			2
4.2. Рассеяние на ионах примеси.	2			2
4.3. Рассеяние на нейтральных центрах и тепловых колебаниях решетки.	2			2
Глава 5. Рекомбинация носителей заряда				
5.1. Равновесные и неравновесные носители заряда. Время жизни. Монополярная генерация.	5	1	4	
5.2. Межзонная рекомбинация.	1	1		
5.3. Рекомбинация через центры захвата.	5	1	4	
5.4. Центры прилипания и рекомбинации.	3	1		2
5.5. Поверхностная рекомбинация.	1	1		
Глава 6. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда				
6.1. Уравнение непрерывности.	3	1		2

Диффузионный и дрейфовый токи. Соотношение Эйнштейна.				
6.2. Диффузия и дрейф при монополярной генерации. Движение неосновных носителей заряда.	5	1	4	
6.3. Диффузия и дрейф неравновесных носителей заряда при биполярной генерации.	5	1	4	
Глава 7. Контактные явления в полупроводниках				
7.1. Полупроводник во внешнем электрическом поле. Работа выхода.	3	1		2
7.2. Контакт металл-металл. Контактная разность потенциалов. Контакт металл-полупроводник.	6	2	4	
7.3. Контакт полупроводников <i>n</i> - и <i>p</i> -типа.	8	2	4	2
Глава 8. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках				
8.1. Поглощение света полупроводниками.	2	1		1
8.2. Фоторезистивный эффект.	5	1	4	
8.3. Фотогальванические явления.	2	1		1
ИТОГО	108	32	32	44

III. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

- планы лабораторных занятий и методические рекомендации к ним;
- методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов;
- сборники заданий для самоконтроля.

IV. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Наряду с другими дисциплинами учебного плана дисциплина «Физика полупроводников» участвует в формировании профессиональных компетенций ПК-1 «Способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин», ПК-2 «Способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта» и ПК-3 «Готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований»

Зачет

Студенты, освоившие программу курса могут получить оценку по итогам семестровой и полусеместровой рейтинговой аттестации согласно «Положению о рейтинговой системе обучения ТвГУ» (протокол №8 от 30 апреля 2020 г.).

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» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.)

Зачет выставляется по результатам рейтинг-контроля. Студентам, не набравшим необходимое число баллов (50), предоставляется возможность ответить на дополнительные вопросы и выполнить дополнительные задания из банка вопросов и заданий, приведенного ниже.

Шкала оценивания: Максимальная оценка каждого студента по итогам ответа на вопросы и результатам выполнения задания составляет 50 баллов. Она складывается из оценки уровня знаний (максимум 25 баллов), умений (максимум 15 баллов) и владений (максимум 10 баллов).

1. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности профессиональной компетенции ПК-1 «Способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин»

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Показатели и критерии оценивания компетенции, шкала оценивания
Начальный владеть	Продemonстрировать навыки владения материалом по статистике носителей заряда в полупроводниках. <u>Пример.</u> Описать поведение электронной подсистемы на основе функции распределения электронов по энергетическим состояниям	1 уровень – записывает функцию распределения Ферми-Дирака, может дать определение энергии Ферми (1 балл). 2 уровень – детально описывает поведение электронной системы в полупроводниках на основе функции распределения Ферми-Дирака (2 балла).
Начальный уметь	Продemonстрировать умение решать типичные примеры по статистике носителей заряда в полупроводниках. <u>Пример.</u> Считая, что в некотором температурном интервале концентрация носителей заряда в полупроводнике равна концентрации доноров, определить границы данного интервала. Произвести оценку максимальной и минимальной температур указанного интервала для антимонида индия, полагая, что эффективная масса носителей заряда равна	1 уровень – записаны уравнения для концентрации носителей в области истощения примеси, отсутствует решение (1 балл). 2 уровень – дается правильное решение и получен верный ответ (2 балла).

	$0,15m_0, \quad E_d = E_c - 0,001 \text{ эВ},$ $E_g = (0,26 - 2,7 \cdot 10^{-4} T) \text{ эВ},$ $N_d = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$	
Начальный знать	Продemonстрировать знания в статистики носителей заряда в полупроводниках. <u>Пример.</u> Описать изменения энергетического спектра электронов при внесении примеси в полупроводник.	1 уровень – правильно называет типы примесей и указывает, как происходит изменение концентрации носителей (1 балл). 2 уровень – полностью определяет, какие изменения вносят примеси в энергетический спектр электронов (2 балла).
Промежуточный владеть	Продemonстрировать навыки владения материалом по определению концентрации носителей и ширины запрещенной зоны в полупроводниках. <u>Пример.</u> Описать положение уровня Ферми и концентрацию носителей заряда в невырожденных донорных полупроводниках	1 уровень – записана формула для определения концентрации носителей в невырожденных донорных полупроводниках для общего случая (1 балл). 2 уровень – рассмотрено изменение концентрации носителей с изменением температуры (2 балла). 3 уровень – полностью описано положение уровня Ферми и концентрацию носителей заряда в невырожденных донорных полупроводниках при изменении температуры от абсолютного нуля до температуры перехода к собственной проводимости (3 балла).
Промежуточный уметь	Продemonстрировать умение решать типичные примеры по определению концентрации носителей и ширины запрещенной зоны в полупроводниках. <u>Пример.</u> В исследуемом полупроводнике по экспериментальным данным концентрация электронов	1 уровень – представлена формула для определения концентрации носителей в общем случае (1 балл). 2 уровень – правильно использована формула для определения концентрации носителей в невырожденном полупроводнике, в ходе

	составила $1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при 400 К и $6,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при 350 К. Найти ширину запрещенной зоны материала, считая, что она меняется с температурой по линейному закону.	решения допущены некоторые ошибки, ответ получен неверный (2 балла). 3 уровень – дается верный ход решения и получен правильный ответ (3 балла).
Промежуточный знать	Продemonстрировать знания по определению концентрации носителей и ширины запрещенной зоны в полупроводниках. <u>Пример.</u> Рассмотреть, как изменяется концентрация носителей при изменении положения уровня Ферми (в результате увеличения примеси).	1 уровень – записана концентрация носителей через интеграл Ферми-Дирака (1 балл). 2 уровень – записана концентрация носителей через интеграл Ферми-Дирака, правильно рассмотрен случай невырожденного полупроводника (2 балла). 3 уровень – правильно рассмотрено изменение концентрации носителей при изменении положения уровня Ферми с учетом вырождения (3 балла)

Список вопросов и заданий для проверки уровня сформированности профессиональной компетенции ПК-1 «Способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин»

Для оценивания результатов обучения в виде владений предлагается рассмотреть следующие темы:

1. Основы зонной теории полупроводников. Число состояний в разрешенной зоне. Зоны Бриллюэна.
2. Плотность квантовых состояний. Функция распределения электронов по энергетическим состояниям (функция Ферми-Дирака).
3. Концентрация электронов в полупроводнике, содержащем донорную примесь. Концентрация дырок в полупроводнике, содержащем акцепторную примесь.

4. Уравнение электронейтральности. Степень заполнения примесных уровней. Собственный полупроводник. Закон действующих масс.
5. Положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда в невырожденных примесных полупроводниках (примесь одного вида). Полупроводник, содержащий акцепторную и донорную примесь, – компенсированный полупроводник.
6. Электропроводность полупроводников. Подвижность носителей заряда. Удельная электропроводность. Тензорезистивный эффект.

Для оценивания результатов обучения в виде умений предлагается продемонстрировать следующие навыки решения типичных примеров:

1. Найти положение уровня Ферми и концентрацию электронов в собственном полупроводнике с параболическими зонами при 400 К, если известно, что ширина запрещенной зоны при этих температурах меняется по закону $E_g = (0,21 - 2,2 \cdot 10^{-4} T) \text{ эВ}$. Использовать значения эффективных масс $m_n^* = 0,2m_e$, $m_p^* = 0,08m_e$.
2. В исследуемом полупроводнике по данным измерения эффекта Холла концентрация электронов составляла $1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при 400 К и $6,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при 350 К. Найти ширину запрещенной зоны материала, считая, что она меняется с температурой по линейному закону.
3. Найти температурный интервал, в котором концентрация электронов постоянна и равна концентрации доноров. Оценить границы интервала для германия, содержащего $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ доноров с энергетическим уровнем $E_d = E_c - 0,01 \text{ эВ}$, если ширина запрещенной зоны изменяется по закону $E_g = \Delta - \xi T$, где $\Delta = 0,785 \text{ эВ}$ и $\xi = 4 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$.
4. Считая, что в некотором температурном интервале концентрация носителей заряда в полупроводнике равна концентрации доноров, определить границы данного интервала. Произвести оценку максимальной и минимальной температур указанного интервала для антимонида индия,

полагая, что эффективная масса носителей заряда равна $0,15m_0$,
 $E_d = E_c - 0,001 \text{ эВ}$, $E_g = (0,26 - 2,7 \cdot 10^{-4} T) \text{ эВ}$, $N_d = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

5. Найти температурный интервал, в котором концентрация электронов постоянна и равна концентрации доноров. Оценить границы интервала для германия, содержащего $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ доноров с энергетическим уровнем E_d — $E_c = 0,01 \text{ эВ}$, если ширина запрещенной зоны изменяется по закону $E_g = (0,785 - 4 \cdot 10^{-4} T) \text{ эВ}$, а фактор вырождения равен двум.

6. Определить температурную зависимость концентрации носителей заряда n в частично компенсированном образце ($N_d > N_a$) в примесной области в отсутствие вырождения. Какова энергия активации, определяющая наклон низкотемпературной части зависимости $\ln[n]$ от $1/T$?

Для оценивания результатов обучения в виде знаний предлагается ответить на следующие вопросы:

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 A^{IV} и $A^{III}B^V$.
17. Какие виды вакансий могут существовать в кристаллах? Какова физическая природа образования вакансий в кристаллах A^{IV} , $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$?
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».

2. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности профессиональной компетенции ПК-2 «Способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта»

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Показатели и критерии оценивания компетенции, шкала оценивания
Начальный владеть	Продemonстрировать навыки владения материалом по рассеянию носителей заряда в полупроводниках. <i>Пример.</i> Описать рассеяние электронов на ионах примеси	1 уровень – записывает энергию взаимодействия электрона с ионом примеси и определяет прицельный параметр (1 балл). 2 уровень – детально описывает рассеяние электронов на ионах примеси и находит время релаксации и длину свободного пробега (2 балла).
Начальный уметь	Продemonстрировать умение решать типичные примеры по рассеянию носителей заряда в полупроводниках. <i>Пример.</i> Оценить величину времени релаксации для чистого германия при комнатной температуре, если подвижность носителей $\mu_n = 0,4 \text{ м/В}\cdot\text{с}$, $m_n^* = 0,3m_e$.	1 уровень – записана формула, определяющая подвижность, отсутствует решение (1 балл). 2 уровень – дается правильное решение и получен верный ответ (2 балла).
Начальный	Продemonстрировать знания	1 уровень – правильно

знать	по рассеянию носителей заряда в полупроводниках. <u>Пример.</u> Какие механизмы рассеяния могут проявляться в полупроводниках, содержащих различные дефекты?	называет механизмы рассеяния носителей (1 балл). 2 уровень – полностью определяет механизмы рассеяния носителей и дает оценку сечения рассеяния и длины свободного пробега при рассеянии на различных центрах (2 балла).
Промежуточный владеть	Продemonстрировать навыки владения материалом по кинетическим явлениям в полупроводниках. <u>Пример.</u> Описать гальваномагнитные эффекты в полупроводниках.	1 уровень – правильно перечисляет гальваномагнитные эффекты (1 балл). 2 уровень – правильно перечисляет гальваномагнитные эффекты и дает определения каждому из них (2 балла). 3 уровень – полностью описывает гальваномагнитные эффекты в полупроводниках (3 балла).
Промежуточный уметь	Продemonстрировать умение решать типичные примеры по кинетическим явлениям в полупроводниках. <u>Пример.</u> Образец полупроводника n-типа имеет форму параллелепипеда, по ребрам которого направлены оси прямоугольной системы координат. Плотность тока вдоль оси x равна $0,1 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Напряженность магнитного поля по оси z составляет 80 кА/м. В условиях рассеяния на колебаниях решетки $\mu_{nH} = 1,18 \mu_n$. Определить	1 уровень – представлена формула для определения плотности тока при приложении электрического и магнитного полей (1 балл). 2 уровень – правильно использована формула для концентрации носителей в невырожденном полупроводнике, выражено поле Холла, в ходе решения допущены некоторые ошибки, ответ получен неверный (2 балла). 3 уровень – дается верный ход решения и получен правильный ответ (3 балла).

	постоянную Холла R_H и холловское напряжение V_H , если $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и размер образца в направлении оси y равен $a = 0,5 \text{ см}$.	
Промежуточный знать	Продемонстрировать знания по кинетическим явлениям в полупроводниках. <u>Пример.</u> Описать сущность метода кинетического уравнения.	1 уровень – записано кинетическое уравнение Больцмана (1 балл). 2 уровень – записано кинетическое уравнение Больцмана и перечислены силы, приводящие к возникновению кинетических явлений (2 балла). 3 уровень – правильно раскрыта сущность метода кинетического уравнения с учетом внешних воздействий и процессов рассеяния (3 балла)

Список вопросов и заданий для проверки уровня сформированности профессиональной компетенции ПК-2 «Способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта»

Для оценивания результатов обучения в виде владений предлагается рассмотреть следующие темы:

1. Гальваномагнитные эффекты: эффект Холла, магниторезистивный эффект. Холл-фактор. Поле Холла. Постоянная Холла. Магнетосопротивление.
2. Теплопроводность полупроводников. Теплопроводность при наличии электронов и дырок в полупроводниках. Термоэлектрические явления.

Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона. Дифференциальная термоэлектродвижущая сила.

3. Рассеяние на ионах примеси. Эффективное сечение рассеяния и длина свободного пробега носителей заряда.

4. Рассеяние на нейтральных центрах. Рассеяние на тепловых колебаниях решетки. Эффективное сечение рассеяния и длина свободного пробега носителей заряда.

5. Межзонная излучательная рекомбинация. Межзонная ударная рекомбинация.

Для оценивания результатов обучения в виде умений предлагается продемонстрировать следующие навыки решения типичных примеров:

1. Германий легирован сурьмой и бором. Концентрация бора равна 10^{16} см^{-3} , а степень компенсации $N_d/N_a=0,5$. Найти концентрацию электронов при 25 К, если $m_n=0,56 m_0$ и $E_d = E_c - 0,01 \text{ эВ}$.

2. Определить область температур, в которой концентрация электронов в частично компенсированном полупроводнике ($N_a > N_d$) постоянна и равна $N_d - N_a$. Оценить границы этой области для кремния, легированного мышьяком ($E_d = E_c - 0,05 \text{ эВ}$) в концентрации $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и алюминием, концентрация которого составляет $1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Эффективная масса электронов в кремнии равна $1,1 m_0$, а ширина запрещенной зоны меняется по закону $E_g = (1,21 - 2,8 \cdot 10^{-4} T) \text{ эВ}$.

3. В образцах Ge с различными n_0 и p_0 имеются простые рекомбинационные центры с $N_t=2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. При 300 К в монополярном n -Ge время жизни $\tau = \tau_1 = 8$ мкс, при $p_0 = p_2 = 10 \text{ см}^{-3}$ время жизни $\tau = \tau_2 = 26$ мкс, а максимальное τ было $\tau = \tau_{\max} = 91$ мкс. Определить коэффициенты и сечения захвата носителей и уровень центра E_t , считая его находящимся в нижней половине запрещенной зоны.

4. В германии n -типа (с $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$) стационарным освещением равномерно по объему генерируются пары носителей. При слабом освещении $\tau_0 = 2$ мкс, а при

$\Delta n/n_0 = 0,1$ рекомбинация идет с $\tau = 4,7$ мкс. Считая, что рекомбинация происходит на простых центрах, с $E_t = E_C - 0,20$ эВ, определить отношение сечений захвата дырок и электронов при 300 К.

5. Для образца n -Ge с $\rho_0 = 1,65$ Ом·см при 300 К и слабом освещении значение времени жизни $\tau = \tau_0 = 2,0$ мкс. При более интенсивном возбуждении $\rho_1 = 1,275$ Ом·см и $\tau = \tau_1 = 3,3$ мкс. Считая, что рекомбинация идет через простые центры с уровнем $E_t = E_V + 0,32$ эВ, найти времена жизни для монополярных p - и n -Ge с тем же механизмом рекомбинации.

6. В полупроводник введены акцепторы с концентрацией $N_a = 10^{16}$ см⁻³. Их уровень расположен вблизи середины запрещенной зоны. Отношение сечений захвата $\sigma_p/\sigma_n = 100$. Кроме того, в полупроводник введены еще мелкие доноры с $N_d = 10^{15}$ см⁻³. При низкой температуре образец освещается светом, генерирующим $G = 10^{19}$ см⁻³·с⁻¹ пар носителей равномерно по объему. Время жизни электронов τ_n равно 10 мкс. Определить τ_p и неравновесные концентрации Δn и Δp , а также коэффициенты захвата α_n и α_p .

Для оценивания результатов обучения в виде знаний предлагается ответить на следующие вопросы:

1. Какие внешние силы приводят к возникновению: а) электропроводности; б) эффекта Холла; в) термо- э.д.с.; г) теплопроводности; д) эффекта Нернста-Эттингсхаузена?
2. В чем сущность метода кинетического уравнения?
3. Какие механизмы рассеяния могут проявляться в полупроводниках, содержащих различные дефекты?
4. Какие механизмы рассеяния могут проявляться в полупроводниках, содержащих различные дефекты?
5. В чем состоит физическая сущность рассеяния носителей заряда нейтральными примесями?

6. В чем состоит физическая трактовка рассеяния носителей заряда дислокациями?
7. По какому закону складываются времена релаксации при одновременном действии нескольких механизмов?
8. Как связаны коэффициент Холла и концентрация носителей заряда?
9. Какие существуют термоэлектрические эффекты, в чем их физическая сущность?
10. Какова причина возникновения решеточной составляющей теплопроводности?
11. Какие вы знаете механизмы рассеяния фононов?
12. Какие существуют взаимодействия света с электронами в полупроводниках?
13. В чем состоит сущность прямых и непрямых оптических переходов?
14. Какие переходы называют разрешенными и запрещенными?
15. Каков механизм взаимодействия света с кристаллической решеткой?
16. При каких длинах волн в спектре поглощения германия и кремния обнаруживаются линии поглощения, обусловленные присутствием примеси кислорода в этих кристаллах?
17. Какова природа поглощения света примесными атомами?
18. Что такое экситон?
19. В какой области длин волн наблюдается экситонное поглощение?
20. Какую информацию о свойствах полупроводника можно получить из исследований отражения света?
21. В чем сущность эффекта Фарадея?
22. Что называют процессом генерации электронно-дырочных пар?
23. В чем смысл понятия инжекции носителей заряда?
24. Что называют процессом рекомбинации носителей?
25. Дайте определение скоростей генерации и рекомбинации носителей.
26. Дайте определение времени жизни носителей заряда.
27. Чем отличаются стационарные и нестационарные времена жизни носителей заряда?

28. В чем сущность эффекта прилипания?
29. Какие существуют виды рекомбинации?
30. Какие существуют механизмы рекомбинации? В чем проявляются их различия?
31. Как изменяется значение излучательного времени жизни с изменением степени легирования полупроводника?

3. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности профессиональной компетенции ПК-3 «Готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований»

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Показатели и критерии оценивания компетенции, шкала оценивания
Начальный владеть	Продemonстрировать навыки владения материалом по диффузии и дрейфу носителей заряда в полупроводниках. <i>Пример.</i> Описать диффузионный и дрейфовый токи при наличии градиента концентрации носителей заряда	1 уровень – описан дрейфовый ток в полупроводниках (1 балл). 2 уровень – детально рассмотрено изменение концентрации носителей и определен полный ток с учетом диффузионной и дрейфовой составляющих (2 балла).
Начальный уметь	Продemonстрировать умение решать типичные примеры по диффузии и дрейфу носителей заряда в полупроводниках. <i>Пример.</i> Вычислить коэффициент диффузии электронов в условиях сильного вырождения при квадратичном законе дисперсии, если $\mu_n = 300$	1 уровень – записаны выражения для концентрации носителей в полупроводниках при сильном вырождении и коэффициента диффузии, нет решения (1 балл). 2 уровень – дается правильное решение и получен верный ответ (2 балла).

	$\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}), \quad n = 10^{18} \text{ см}^{-3},$ $m_n^* = 0,2 m_e.$	
Начальный знать	Продemonстрировать знания по диффузии и дрейфу носителей заряда в полупроводниках. <u>Пример.</u> Вывести соотношения Эйнштейна.	1 уровень – записаны формулы для соотношений Эйнштейна (1 балл). 2 уровень – приведен вывод соотношений Эйнштейна для полупроводника в состоянии термодинамического равновесия (2 балла).
Промежуточный владеть	Продemonстрировать навыки владения материалом по контактнм явлениям в полупроводниках. <u>Пример.</u> Описать контакт металл-полупроводник (невырожденный полупроводник)	1 уровень – рассмотрена энергетическая диаграмма контакта (1 балл). 2 уровень – рассмотрена энергетическая диаграмма контакта и составлено уравнение Пуассона для контактной области полупроводника (2 балла). 3 уровень – на основе решения уравнения Пуассона полностью описан контакт металл-невырожденный полупроводник при слабом искривлении зон (3 балла).
Промежуточный уметь	Продemonстрировать умение решать типичные примеры по контактнм явлениям в полупроводниках. <u>Пример.</u> На поверхности кремния p-типа существует обедненный слой, причем концентрация электронов считается пренебрежимо малой. Найти толщину области объемного заряда при 300 К, если поверхностный потенциал $\phi_s = 0,25 \text{ В}$, а концентрация мелких полностью ионизованных акцепторов в объеме $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.	1 уровень – составлено уравнение Пуассона для приповерхностного слоя (1 балл). 2 уровень – приведено решение уравнения Пуассона для приповерхностного слоя, в ходе решения допущены некоторые ошибки, ответ получен неверный (2 балла). 3 уровень – дается верный ход решения и получен правильный ответ (3 балла).

Промежуточный знать	Продемонстрировать знания по контактными явлениям в полупроводниках. <i>Пример.</i> Описать p - n переход в полупроводниковых структурах	1 уровень – приведена энергетическая диаграмма контакта (1 балл). 2 уровень – приведена энергетическая диаграмма контакта и записаны уравнения Пуассона (2 балла). 3 уровень – на основе решения уравнения Пуассона найдено распределение потенциала и толщина слоя объемного заряда (3 балла)
------------------------	---	--

Список вопросов и заданий для проверки уровня сформированности профессиональной компетенции ПК-3 «Готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований»

Для оценивания результатов обучения в виде владений предлагается рассмотреть следующие темы:

1. Центры прилипания и центры рекомбинации. Электронный и дырочный демаркационный уровни.
2. Изменение числа носителей заряда при наличии процессов диффузии и дрейфа. Уравнение непрерывности. Диффузионный и дрейфовый токи при наличии градиента концентрации носителей заряда. Соотношение Эйнштейна.
3. Контакт металл-металл. Контактная разность потенциалов. Контакт металл-полупроводник. Обогащенный и обедненный приконтактные слои в полупроводниках. Электрический ток через контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки.
4. Неоднородный полупроводник – контакт полупроводников n - и p -типа. Запирающий слой, его толщина. Вольтамперная характеристика p - n перехода. Полупроводниковый диод.

5. Эффект Дембера. Э.д.с. Дембера. Вентильная фотоэлектродвижущая сила.

Для оценивания результатов обучения в виде умений предлагается продемонстрировать следующие навыки решения типичных примеров:

1. Вычислить диффузионную длину электронов в невырожденном германии при температуре 300 К, если время жизни электронов составляет: 1) $\tau_1 = 10^{-4}$ с, 2) $\tau_2 = 10^{-6}$ с; подвижность электронов $\mu_n = 3800 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.
2. Вычислить коэффициент биполярной диффузии в арсениде галлия с собственной проводимостью при температуре 300 К; $\mu_n = 8800 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $\mu_p = 400 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.
3. В однородный полубесконечный электронный полупроводник ($x \geq 0$) в плоскости $x = 0$ непрерывно инжектируются дырки, так что $\Delta p(0) = 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Найти неравновесную концентрацию дырок на расстоянии $x = 4$ мм от поверхности, если $\tau_p = 10^{-3}$ с, $D_p = 40 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.
4. В некоторой точке однородного электронного полупроводника световым зондом генерируются пары носителей. Считая задачу одномерной, определить диффузионную длину дырок, если концентрация неравновесных носителей на расстоянии $x_1 = 2$ мм от зонда равна $\Delta p_1 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а при $x_2 = 4,3$ мм она равна $\Delta p_2 = 10^{13} \text{ см}^{-3}$.
5. Найти распределение неравновесных дырок в длинном нитевидном образце n -Ge при стационарной инжекции дырок в точке и при наличии электрического поля $\mathcal{E} = 5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ вдоль образца. Температура комнатная, полупроводник невырожден, $L_p = 0,09$ см.
6. В однородный полубесконечный электронный полупроводник ($x \geq 0$) на поверхности $x = 0$ стационарно инжектируются дырки. Вдоль образца в направлении $x > 0$ приложено электрическое поле $\mathcal{E} = 10 \text{ В/см}$. Определить, на каком расстоянии от поверхности образца концентрация неравновесных дырок уменьшится в полтора раза; $L_p = 0,1$ см.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний предлагается ответить на следующие вопросы:

1. В каких полупроводниках излучательная межзонная рекомбинация наиболее вероятна?
2. В чем сущность межзонной ударной рекомбинации?
3. Что такое поверхностная рекомбинация? Какую роль она играет при использовании полупроводников в полупроводниковых приборах?
4. Каков физический смысл понятия диффузионной длины? Каким образом она связана с временем жизни носителей заряда?
5. В чем состоит сущность явления фотопроводимости?
6. Как связана фотопроводимость с поглощением света?
7. Что такое красная граница фотопроводимости?
8. Каков механизм фототермической ионизации?
9. Участвуют ли экситоны в возникновении фотопроводимости?
10. Какие вы знаете определения фоточувствительности?
11. В чем состоит отличие моно- и биполярной примесной проводимости?
12. Какова роль заполнения примесных уровней в фотопроводимости?
13. Что такое люкс-амперная характеристика полупроводника? Какими параметрами она определяется?
14. Что такое фотовольтаические явления?
15. Какие условия требуется выполнить для возникновения фотовольтаических явлений?
16. Объясните природу объемной фото-э.д.с.
17. Какова сущность эффекта Дембера?
18. Каков механизм появления фотомагнитной фото-э.д.с.?
19. В чем сущность фотолюминесценции?
20. Какие виды люминесценции вы знаете?
21. От каких факторов зависит интенсивность люминесценции?
22. С чем связано появление контактных явлений?
23. Что такое работа выхода электрона?

24. Что такое контактная разность потенциалов? Каким образом она возникает?
25. Как меняется зонная структура полупроводника в приповерхностном слое в случае контакта металл-полупроводник?
26. Что такое запирающие и антизапирающие слои?
27. Объясните механизм выпрямления тока на контакте металл-полупроводник.
28. Что такое р-п переход? В чем его отличие от контакта металл-полупроводник?
29. Как классифицировать р-п-переходы?
30. Чем отличается гетеропереход от обычного гомогенного перехода?
31. Какое направление принято считать положительным при подсоединении р-п-перехода к источнику внешнего напряжения?

V. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

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.

VI. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

Электронные библиотечные системы:

1. ЭБС «ИНФРА-М» <http://www.znaniyum.com>
2. ЭБС «Университетская библиотека ОН-ЛАЙН» <http://www.biblioclub.ru>
3. ЭБС «ЛАНЬ» <http://e.lanbook.com>

Сервер информационно-методического обеспечения учебного процесса ТвГУ <http://edc.tversu.ru>

VII. Методические указания 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, примесь 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 не прямые 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.

3) Требования к рейтинг-контролю

Результаты промежуточной аттестации выставляются на основе текущего контроля успеваемости (рейтинг-контроль, баллы за выполненные практические задания суммируются) и по результатам зачета.

Рейтинг

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

40 баллов, из них 20 – текущая работа, 10 – посещаемость, 10 – контрольная работа. 9-ая неделя.

2. Вторая контрольная точка. Содержание модуля 2: Раздел 4 – 7.

60 баллов, из них 40 – текущая работа, 10 – посещаемость, 10 – контрольная работа. 18-ая неделя

Критерии: работа на каждом практическом занятии – по 5 баллов (текущая работа), правильный ответ на один вопрос контрольной работы – 2 балла.

Программой предусматривается выполнение письменных контрольных работ и отчеты о выполнении студентами заданий на лабораторных занятиях 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 рабочей программы.

VIII. Перечень педагогических и информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (или модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (по необходимости)

IX. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Наименование специальных* помещений	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения
Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, Учебная аудитория № 202Б (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)	1. Комплект учебной мебели на 25 посадочных мест. 2. Экран настенный 153x203 3. Переносной комплект мультимедийной техники (ноутбук, проектор) 4. Меловая доска.	Google Chrome – бесплатно Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г. MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017 Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017

Помещения для самостоятельной работы:

Наименование помещений	Оснащенность помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
Помещение для самостоятельной работы, учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового	1. Компьютер RAMEC STORM C2D 4600/160Gb/ 256mB/DVD-RW +Монитор LG TFT 17" L1753S-SF – 12 шт 2. Мультимедийный комплект учебного класса (вариант № 2) Проектор Casio XJ-M140, настенный проекц. экран Lumien	Adobe Acrobat Reader DC - бесплатно Cadence SPB/OrCAD 16.6 - Государственный контракт на поставку лицензионных программных продуктов 103 - ГК/09 от 15.06.2009 Google Chrome - бесплатно Java SE Development Kit 8 Update

проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, практики, Компьютерный класс физико-технического факультета. Компьютерная лаборатория робототехнических систем №4а (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)	180*180. ноутбук Dell N4050. сумка 15,6", мышь 3. Коммутатор D-Link 10/100/1000mbps 16-port DGS-1016D 4. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО 5. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО 6. Демонстрационное оборудование комплект «LegoMidstormsEV3» 7. Комплект учебной мебели	45 (64-bit) - бесплатно Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г. Lazarus 1.4.0 - бесплатно Lego MINDSTORM EV3 - бесплатно Mathcad 15 M010 - Акт предоставления прав IC00000027 от 16.09.2011 MATLAB R2012b - Акт предоставления прав № Us000311 от 25.09.2012 Microsoft Express Studio 4 - бесплатно MiKTeX 2.9 - бесплатно MPICH 64-bit – бесплатно MSXML 4.0 SP2 Parser and SDK - бесплатно Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017 MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017
---	--	--

Х. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины

№ 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 промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) студентов ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г.
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	Протокол Совета ФТФ №

		средств для проверки уровня сформированности закрепленных за дисциплиной компетенций	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