

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ С.Т. Князев  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА МОДУЛЯ**

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕДАХ**

<b>Перечень сведений о рабочей программе модуля</b>	<b>Учетные данные</b>
<b>Модуль</b> Кинетические явления в материальных средах	<b>Код модуля</b> 1108188
<b>Образовательная программа</b> Физика	<b>Код ОП</b> 03.03.02/01.02
<b>Траектория образовательной программы (ТОП)</b>	
<b>Направление подготовки</b> Физика	<b>Код направления и уровня подготовки</b> 03.03.02
<b>Уровень подготовки</b> бакалавриат	
<b>ФГОС ВО</b>	<b>Реквизиты приказа Минобрнауки РФ об утверждении ФГОС ВО:</b> 07.08.2014 № 937

Программа модуля составлена авторами:

<b>№ п/п</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, ученое звание</b>	<b>Должность</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Подпись</b>
1	Германенко Александр Викторович	Д.ф.-м.н.	Зав.каф.	Компьютер ной физики	

**Руководитель модуля**

А.В. Германенко

**Рекомендовано учебно-методическим советом Института естественных наук**

Председатель учебно-методического совета

Е.С. Буянова

Протокол № 49 от 02.06.2016 г.

**Согласовано:**

Дирекция образовательных программ

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОДУЛЯ Кинетические явления в материальных средах

## 1.1. Объем модуля, з.е. - 9

## 1.2. Аннотация содержания модуля

В модуль «Кинетические явления в материальных средах» входит дисциплины «Кинетические явления в полупроводниках», «Кинетика и термодинамика фазовых превращений жидкость-газ» и «Кинетическая теория газов».

При изучении дисциплин модуля у студентов формируется современное представление о фундаментальных физических свойствах твердых тел и полупроводниковых материалов. Дисциплина «Кинетические явления в полупроводниках» представляет и прививает навыки получения фундаментальных знаний о природе физических явлений на примере полупроводников. На основе анализа экспериментальных данных, используя современные теоретические модели, дает представление об энергетическом спектре электронов и дырок, статистических закономерностях и кинетических эффектах в полупроводниках. Знакомит с основными экспериментальными результатами и достижениями в физике полупроводников. Изучение дисциплин «Кинетика и термодинамика фазовых превращений жидкость-газ», «Кинетическая теория газов» формирует у студента «способность осуществлять научно-исследовательскую деятельность (РО-О1)» и «способность осуществлять научные исследования процессов переноса и релаксации в материальных средах (РО-ТОП 1)».

## 2. СТРУКТУРА МОДУЛЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УЧЕБНОГО ВРЕМЕНИ ПО ДИСЦИПЛИНАМ

Наименования дисциплин с указанием, к какой части образовательной программы они относятся: базовой (Б), вариативной – по выбору вуза (ВВ), вариативной - по выбору студента (ВС).		Семестр изучения	Объем времени, отведенный на освоение дисциплин модуля							
			Аудиторные занятия, час.				Самостоятельная работа, включая все виды текущей аттестации, час.	Промежуточная аттестация (зачет, экзамен), час.	Всего по дисциплине	
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	Всего			Час.	Зач. ед.
1.	(ВВ) Кинетика и термодинамика фазовых превращений жидкость-газ	6	9	42	0	51	75	Э, 18	144	4
2.	(ВВ) Кинетическая теория газов	7	9	42	0	51	39	Э, 18	108	3
3.	(ВВ) Кинетические явления в полупроводниках	7	9	42	0	51	17	3, 4	72	2
<b>Всего на освоение модуля</b>			26	59	27	126	0	153	131	40

### 3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИН В МОДУЛЕ

3.1.	Пререквизиты и постреквизиты в модуле	Кинетика и термодинамика фазовых превращений жидкость-газ Кинетическая теория газов Кинетические явления в полупроводниках
3.2.	Корреквизиты	<i>нет</i>

### 4. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ МОДУЛЯ

#### 4.1. Планируемые результаты освоения модуля и составляющие их компетенции

Коды ОП, для которых реализуется модуль	Планируемые в ОХОП результаты обучения -РО, которые формируются при освоении модуля	Компетенции в соответствии с ФГОС ВО, а также дополнительные из ОХОП, формируемые при освоении модуля
03.03.02/01.02	РО-О1 «Способность осуществлять научно-исследовательскую деятельность»	ОК7 - способность к самоорганизации и самообразованию; ОПК2 - способность использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей; ПК1 - способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин;
	РО-О2 «Способность осуществлять научно-инновационную деятельность»	ОК7 - способность к самоорганизации и самообразованию; ОПК3 - способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач; ПК3 - готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований; ПК4 - способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин; ПК5 - способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований;
	РО-ТОП 1 «Способность осуществлять научные исследования процессов переноса и релаксации в	ДПК2 - способность применять на практике теоретические знания и экспериментальные методы физических исследований в области физики и техники низкотемпературного эксперимента, физики неравновесных процессов в газе, жидкости и твердом теле; ДПК4 - владеть основами экспериментальных методов

	материальных средах.»	теплофизических и электромагнитных измерений.
--	-----------------------	---

#### 4.2. Распределение формирования компетенций по дисциплинам модуля

Дисциплины модуля		ОК-7	ОПК-2	ОПК-3	ПК-1	ПК-3	ПК-4	ПК-5	ДПК-2	ДПК-4
1	(ВВ) Кинетика и термодинамика фазовых превращений жидкость-газ	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2	(ВВ) Кинетическая теория газов	*	*	*	*	*	*	*	*	
3	(ВВ) Кинетические явления в полупроводниках	*		*	*		*		*	*

#### 5. ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО МОДУЛЮ

*Не предусмотрена*

#### 6. ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ В РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ МОДУЛЯ

Номер листа изменений	Номер протокола заседания проектной группы модуля	Дата заседания проектной группы модуля	Всего листов в документе	Подпись руководителя проектной группы модуля

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н.Ельцина»

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ**

<b>Перечень сведений о рабочей программе дисциплины</b>	<b>Учетные данные</b>
<b>Модуль</b> Кинетические явления в материальных средах	<b>Код модуля</b> 1108188
<b>Образовательная программа</b> Физика	<b>Код ОП</b> 03.03.02/01.02
<b>Направление подготовки</b> Физика	<b>Код направления и уровня подготовки</b> 03.03.02
<b>Уровень подготовки</b> бакалавриат	
<b>ФГОС ВО</b>	<b>Реквизиты приказа Минобрнауки РФ об утверждении ФГОС ВО: 07.08.2014 № 937</b>

Екатеринбург, 2016

Рабочая программа дисциплины составлена авторами:

<b>№ п/п</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, ученое звание</b>	<b>Должность</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Подпись</b>
1	Черняк Владимир Григорьевич	Доктор физ.-мат. наук, профессор	Заведующи й кафедрой	Кафедра общей и молекуля рной физики	

**Руководитель модуля**

А.В. Германенко

**Рекомендовано учебно-методическим советом Института естественных наук**

Председатель учебно-методического совета

Е.С. Буянова

Протокол № 49 от 02.06.2016 г.

**Согласовано:**

Дирекция образовательных программ

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЦИПЛИНЫ «КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ»

## 1.1. Аннотация содержания дисциплины

Дисциплина «Кинетическая теория газов» представляет раздел физической кинетики, в котором изучаются процессы переноса и релаксации в разреженных газах на основе законов движения и взаимодействия молекул. Является продолжением курса «Статистическая физика». *Цель дисциплины* – сформировать у студентов начальное представление о моделях и методах описания явлений переноса в разреженных газах на молекулярном уровне. *Задача дисциплины* – обосновать переход от динамического описания состояния системы к вероятностно-статистическому и далее к макроскопическому уровню; получить уравнение Больцмана и изучить его свойства; доказать H-теорему; изучить метод Чепмена – Энскога решения кинетического уравнения Больцмана, получить замкнутую систему уравнений сохранения; вычислить коэффициенты переноса.

## 1.2. Язык реализации программы - русский

## 1.3. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Результатом обучения в рамках дисциплины является формирование у студента следующих компетенций:

ОК7 - способность к самоорганизации и самообразованию;

ОПК2 - способность использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей;

ОПК3 - способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач;

ПК1 - способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин;

ПК3 - готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований;

ПК4 - способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин;

ПК5 - способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований;

ДПК2 - способность применять на практике теоретические знания и экспериментальные методы физических исследований в области физики и техники низкотемпературного эксперимента, физики неравновесных процессов в газе, жидкости и твердом теле.

В результате освоения дисциплины студент должен:

Знать: фундаментальные концепции и модели процессов переноса в разреженных газах.

Уметь: вычислять коэффициенты переноса однокомпонентных газов и газовых смесей

Владеть (демонстрировать навыки и опыт деятельности): демонстрировать навыки и опыт вычисления коэффициентов переноса в однокомпонентных газах и газовых смесях.



#### 1.4. Объем дисциплины для очной формы обучения

№ п/п	Виды учебной работы	Объем дисциплины		Распределение объема дисциплины по семестрам (час.)
		Всего часов	В т.ч. контактная работа (час.)*	7
1.	<b>Аудиторные занятия</b>	<b>51</b>	<b>51</b>	<b>51</b>
2.	Лекции	9	9	9
3.	Практические занятия	42	42	42
4.	Лабораторные работы			
5.	<b>Самостоятельная работа студентов, включая все виды текущей аттестации</b>	<b>39</b>	<b>7,65</b>	<b>39</b>
6.	<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>Э,18</b>	<b>2,33</b>	<b>Э,18</b>
7.	<b>Общий объем по учебному плану, час.</b>	108	60,98	108
8.	<b>Общий объем по учебному плану, з.е.</b>	3		3

#### 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Код раздела, темы	Раздел, тема дисциплины*	Содержание
1	Введение	Предмет и задачи курса. Модель разреженного газа.
2	Величины, характеризующие газ	Динамическое описание. Фазовое пространство. Ансамбль Гиббса неравновесной системы. N-частичная функция распределения. Усеченные функции распределения. Гипотеза молекулярного хаоса. Локальная микроскопическая фазовая плотность. Функция распределения для разреженного газа. Средние величины для однокомпонентного газа (числовая плотность молекул, макроскопическая скорость движения газа, температура). Векторы потоков для однокомпонентного газа (поток массы, тензор напряжений, давление, плотность теплового потока). Динамика парных столкновений. Модели межмолекулярных потенциалов. Частота столкновений. Средняя длина свободного пробега молекул.
3	Уравнение Больцмана и его свойства	Физический вывод уравнения Больцмана. Свойство симметрии интеграла столкновений. H-теорема. Принцип детального равновесия. Функция распределения Максвелла. Линеаризованное уравнение Больцмана.
4	Уравнения сохранения	Общее уравнение переноса для отдельного компонента и всей газовой смеси. Уравнение неразрывности. Уравнение сохранения импульса. Уравнение сохранения внутренней энергии. Незамкнутость системы уравнений сохранения.
5	Метод Чепмена-Энскога	Цели и задачи метода. Приведение уравнения Больцмана к безразмерному виду. Число Кнудсена как малый параметр. Разложение функции распределения в степенной ряд по числу Кнудсена. Цепочка интегральных уравнений для функции распределения.

	<p>Уравнение нулевого порядка. Система уравнений Эйлера.  Уравнение первого порядка. Вид общего решения уравнения первого порядка.  Макроскопические потоки и коэффициенты переноса. Механизмы диффузии и теплопереноса в газовых смесях (концентрационная диффузия, бародиффузия, динодиффузия, термодиффузия, теплопроводность, эффект Дюфура).  Замкнутая система уравнений сохранения. Уравнения Навье – Стокса.  Бинарная смесь газов. Уравнения диффузии Фика.  Коэффициент теплопроводности однокомпонентного газа.  Коэффициент вязкости однокомпонентного газа.  Коэффициент взаимной диффузии в бинарной газовой смеси.  Коэффициент термодиффузии в бинарной газовой смеси.  Обсуждение результатов. Сравнение с экспериментом.</p>
--	--

### **3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УЧЕБНОГО ВРЕМЕНИ**

#### **3.1. Распределение аудиторной нагрузки и мероприятий самостоятельной работы по разделам дисциплины для очной формы обучения**

Объем модуля (зач.ед.): 9  
Объем дисциплины (зач.ед.): 3

Раздел дисциплины		Аудиторные занятия (час.)				Самостоятельная работа: виды, количество и объемы мероприятий																								
Код раздела, темы	Наименование раздела, темы	Всего по разделу, теме (час.)	Всего аудиторной работы (час.)	Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	Всего самостоятельной работы студентов (час.)	Подготовка к аудиторным занятиям (час.)					Выполнение самостоятельных внеаудиторных работ (колич.)										Подготовка к контрольным мероприятиям текущей аттестации (колич.)			Подготовка к промежуточной аттестации по дисциплине (час.)	Подготовка в рамках дисциплины к промежуточной аттестации по модулю (час.)			
								Всего (час.)	Лекция	Практ., семинар, занятие	Лабораторное занятие	Н/и семинар, семинар-конференция, коллоквиум (магистратура)	Всего (час.)	Домашняя работа*	Графическая работа*	Реферат, эссе, творч. работа*	Проектная работа*	Расчетная работа, разработка программного продукта*	Расчетно-графическая работа*	Домашняя работа на иностр. языке*	Перевод инояз. литературы*	Курсовая работа*	Курсовой проект*	Всего (час.)	Контрольная работа*			Коллоквиум*		
1	Введение	1,2	1	1	0		0,2	0,2	0,2	0			0	0										0	0					
2	Величины, характеризующие газ	23	13	2	11		10	5	2	3			2	1										3	1					
3	Уравнение Больцмана и его свойства	18	8	2	6		10	5	2	3			2	1										3	1					
4	Уравнения сохранения	13,8	6	2	4		7,8	5,8	1,8	4			2	1										0	0					
5	Метод Чепмена-Энскога	34	23	2	21		11	6	2	4			2	1										3	1					
	<b>Всего (час), без учета подготовки к аттестационным мероприятиям:</b>	<b>90</b>	<b>51</b>	<b>9</b>	<b>42</b>	<b>0</b>	<b>39</b>	<b>22</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>0</b>				
	<b>Всего по дисциплине (час.):</b>	<b>108</b>	<b>51</b>				<b>57</b>	В т.ч. промежуточная аттестация																			<b>0</b>	<b>18</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

\*Суммарный объем в часах на мероприятие указывается в строке «Всего (час.)» без учета промежуточной аттестации

#### 4. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ, САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

##### 4.2. Лабораторные работы

не предусмотрено

##### 4.3. Практические занятия

Код раздела, темы	Номер занятия	Тема занятия	Время на проведение занятия (час.)
2	1	Усеченные функции распределения. Гипотеза молекулярного хаоса.	2
2	2	6-мерное фазовое пространство. Локальная микроскопическая фазовая плотность.	2
2	3	Функция распределения для разреженного газа. Средние величины. Векторы потоков.	2
2	4	Динамика парных столкновений молекул.	2
2	5-6	Модели потенциалов межмолекулярных взаимодействий. Частота столкновений и средняя длина свободного пробега молекул.	3
3	6-7	Вероятность макроскопического состояния газа	2
3	7	Н-теорема Больцмана. Проблема микроскопической обратимости и макроскопической необратимости.	2
3	8	Принцип детального равновесия. Максвелловская функция распределения. Линеаризованное уравнение Больцмана.	2
4	9-10	Уравнения сохранения массы, импульса и энергии.	4
5	11-12	Число Кнудсена. Разложение функции распределения в степенной ряд по числу Кнудсена. Цепочка интегральных уравнений для функции распределения.	3
5	12	Функция распределения в нулевом приближении. Локально-равновесное состояние газа. Система уравнений Эйлера.	1
5	13	Преобразование интегрального уравнения первого приближения. Уравнения Энскога.	2
5	14-15	Общее решение уравнений Энскога.	3
5	15-16	Диффузионная скорость и термодиффузионные отношения.	2
5	16-17	Тензор напряжений. Плотность теплового потока	2
5	17-18	Замкнутая система уравнений баланса массы, импульса и энергии в первом приближении Чепмена-Энскога.	2
5	18-19	Бинарная смесь газов. Законы диффузии Фика.	2
5	19-20	Вычисление коэффициентов вязкости и теплопроводности для однокомпонентного газа.	2
5	20	Вычисление коэффициента взаимной диффузии для бинарной газовой смеси.	1
5	21	Вычисление коэффициента термодиффузии для бинарной газовой смеси. Сравнение теории с	1

		экспериментом. Определение значений потенциальных параметров.	
			<b>Всего:</b> 42

- 4.3. Примерная тематика самостоятельной работы**
- 4.3.1. Примерный перечень тем домашних работ**
1. Доказать, что величина относительной скорости не изменяется при упругих столкновениях. Вычисление средней длины свободного пробега молекул в равновесной газовой смеси.
  2. Функция распределения Максвелла и ее свойства.
  3. Связь между равновесным значением Н-функции и энтропией идеального газа.
  4. Вывод уравнения сохранения энергии. Преобразование уравнения Энскога.
- 4.3.2. Примерный перечень тем графических работ**  
не предусмотрено
- 4.3.3. Примерный перечень тем рефератов (эссе, творческих работ)**  
не предусмотрено
- 4.3.4. Примерная тематика индивидуальных или групповых проектов**  
не предусмотрено
- 4.3.5. Примерный перечень тем расчетных работ (программных продуктов)**  
не предусмотрено
- 4.3.6. Примерный перечень тем расчетно-графических работ**  
не предусмотрено
- 4.3.7. Примерный перечень тем курсовых проектов (курсовых работ)**  
не предусмотрено
- 4.3.8. Примерная тематика контрольных работ**
1. Контрольная работа по разделу 2.
  2. Контрольная работа по разделу 3.
  3. Контрольная работа по разделу 5.
- 4.3.9. Примерная тематика коллоквиумов**  
не предусмотрено

**5. СООТНОШЕНИЕ РАЗДЕЛОВ, ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ПРИМЕНЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБУЧЕНИЯ** [отметить звездочкой или другим символом применяемые технологии обучения по разделам и темам дисциплины]

Код раздела, темы дисциплины	Активные методы обучения						Дистанционные образовательные технологии и электронное обучение					
	Проектная работа	Кейс-анализ	Деловые игры	Проблемное обучение	Командная работа	Другие (указать, какие)	Сетевые учебные курсы	Виртуальные практикумы и тренажеры	Вебинары и видеоконференции	Асинхронные web-конференции и семинары	Совместная работа и разработка контента	Другие (указать, какие)
1-5				*								

**6. ПРОЦЕДУРЫ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ**

## **(Приложение 1)**

### **7. ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ НЕЗАВИСИМОГО ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ (Приложение 2)**

### **8. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (Приложение 3)**

### **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

#### **9.1.Рекомендуемая литература**

##### **9.1.1.Основная литература**

1. Черняк В.Г., Суетин П. Е. Введение в кинетическую теорию разреженного газа. Учебное пособие. Свердловск: Изд-во УрГУ, 1989.
2. Ферцигер Дж., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах. М.: Мир, 1976.
3. Гиршфельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИЛ, 1961.

##### **9.1.2.Дополнительная литература**

1. Чепмен С., Каулинг Т. Математическая теория неоднородных газов. М.: ИЛ, 1960.
2. Коган М.Н. Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967.
3. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика. М.: Наука, 1982.
4. Силин В.П. Введение в кинетическую теорию газов. М.: Издательство Физического Института им. Лебедева, 1998.
5. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. Теоретическая физика, Т.10. М.: Наука «Физматлит», 2007.
6. Черчиньяни К. Теория и приложения уравнения Больцмана. М.: Мир, 1978.

#### **9.2.Методические разработки**

не используются

#### **9.3.Программное обеспечение**

не используются

#### **9.4. Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

Электронные ресурсы образовательного портала edu.ru.

Портал информационно-образовательных ресурсов УрФУ study.urfu.ru

Зональная научная библиотека УрФУ lib.urfu.ru

#### **9.5.Электронные образовательные ресурсы**

не используются

### **10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

#### **Сведения об оснащённости дисциплины специализированным и лабораторным оборудованием**

Имеются аудитории, оснащенные мультимедийной техникой.

## 6. ПРОЦЕДУРЫ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

6.1. Весовой коэффициент значимости дисциплины – 1

6.2. Процедуры текущей и промежуточной аттестации по дисциплине

<b>1. Лекции: коэффициент значимости совокупных результатов лекционных занятий – 0.2</b>		
<b>Текущая аттестация на лекциях</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
<i>Посещаемость</i>	7, 1 – 8	50
<i>Мини-опрос по теме лекций</i>	7, 1 – 8	50
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по лекциям – 1</b>		
Промежуточная аттестация по лекциям – не предусмотрена		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по лекциям – 0</b>		
<b>2. Практические/семинарские занятия: коэффициент значимости совокупных результатов практических/семинарских занятий – 0.8</b>		
<b>Текущая аттестация на практических/семинарских занятиях</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
<i>Посещаемость</i>	7, 1-8	21
<i>Выполнение домашних работ</i>	7, 3-7	8
<i>Контрольная работа по разделу 2</i>	7, 4	21
<i>Контрольная работа по разделу 3</i>	7, 6	25
<i>Контрольная работа по разделам 4-5</i>	7, 8	25
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по практическим/семинарским занятиям – 0.8</b>		
Промежуточная аттестация по практическим/семинарским занятиям – экзамен		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по практическим/семинарским занятиям – 0.2</b>		
<b>3. Лабораторные занятия: коэффициент значимости совокупных результатов лабораторных занятий – не предусмотрены</b>		

6.3. Процедуры текущей и промежуточной аттестации курсовой работы/проекта не предусмотрены

6.4. Коэффициент значимости семестровых результатов освоения дисциплины

<b>Порядковый номер семестра по учебному плану, в котором осваивается дисциплина</b>	<b>Коэффициент значимости результатов освоения дисциплины в семестре</b>
7	1

\*

## **7. ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ НЕЗАВИСИМОГО ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ**

*Дисциплина и ее аналоги, по которым возможно тестирование, отсутствуют на сайте ФЭПО <http://fepo.i-exam.ru>.*

*Дисциплина и ее аналоги, по которым возможно тестирование, отсутствуют на сайте Интернет-тренажеры <http://training.i-exam.ru>.*

*Дисциплина и ее аналоги, по которым возможно тестирование, отсутствуют на портале СМУДС УрФУ.*

*В связи с отсутствием Дисциплины и ее аналогов, по которым возможно тестирование, на сайтах ФЭПО, Интернет-тренажеры и портале СМУДС УрФУ, тестирование в рамках НТК не проводится.*



**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**  
**к рабочей программе дисциплины**

**8. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**8.1. КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЬНО-ОЦЕНОЧНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ В РАМКАХ БРС**

В рамках БРС применяются утвержденные на кафедре критерии оценивания достижений студентов по каждому контрольно-оценочному мероприятию. Система критериев оценивания, как и при проведении промежуточной аттестации по модулю, опирается на три уровня освоения компонентов компетенций: пороговый, повышенный, высокий.

<b>Компоненты компетенций</b>	<b>Признаки уровня освоения компонентов компетенций</b>		
	<b>пороговый</b>	<b>повышенный</b>	<b>высокий</b>
<b>Знания</b>	Студент демонстрирует знание-знакомство, знание-копию: узнает объекты, явления и понятия, находит в них различия, проявляет знание источников получения информации, может осуществлять самостоятельно репродуктивные действия над знаниями путем самостоятельного воспроизведения и применения информации.	Студент демонстрирует аналитические знания: уверенно воспроизводит и понимает полученные знания, относит их к той или иной классификационной группе, самостоятельно систематизирует их, устанавливает взаимосвязи между ними, продуктивно применяет в знакомых ситуациях.	Студент может самостоятельно извлекать новые знания из окружающего мира, творчески их использовать для принятия решений в новых и нестандартных ситуациях.
<b>Умения</b>	Студент умеет корректно выполнять предписанные действия по инструкции, алгоритму в известной ситуации, самостоятельно выполняет действия по решению типовых задач, требующих выбора из числа известных методов, в предсказуемо изменяющейся ситуации	Студент умеет самостоятельно выполнять действия (приемы, операции) по решению нестандартных задач, требующих выбора на основе комбинации известных методов, в непредсказуемо изменяющейся ситуации	Студент умеет самостоятельно выполнять действия, связанные с решением исследовательских задач, демонстрирует творческое использование умений (технологий)
<b>Личностные качества</b>	Студент имеет низкую мотивацию учебной деятельности, проявляет безразличное, безответственное отношение к учебе, порученному делу	Студент имеет выраженную мотивацию учебной деятельности, демонстрирует позитивное отношение к обучению и будущей трудовой деятельности, проявляет активность.	Студент имеет развитую мотивацию учебной и трудовой деятельности, проявляет настойчивость и увлеченность, трудолюбие,

			самостоятельность, творческий подход.
--	--	--	--

## **8.2. КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЗАВИСИМОГО ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ**

*НТК не предусмотрено*

## **8.3. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

### **8.3.1. Примерные задания для проведения мини-контрольных в рамках учебных занятий**

Письменный опрос по материалу разделу 2

Письменный опрос по материалу раздела 3

Письменный опрос по разделам 4 – 5

### **8.3.2. Примерные контрольные задачи в рамках учебных занятий** не предусмотрено

### **8.3.3. Примерные контрольные кейсы**

не предусмотрено

### **8.3.4. Перечень примерных вопросов для зачета**

не предусмотрено

### **8.3.5. Перечень примерных вопросов для экзамена**

1. Модель разреженного газа. Микроскопические и макроскопические переменные. Равновесные и неравновесные состояния и процессы.
2. Динамическое описание состояния газа и процессов в нем на молекулярном уровне. Совокупность динамических переменных. Принципиальные трудности динамического описания макроскопических систем.
3. Вероятностно-статистическое описание газа как совокупности большого числа хаотически движущихся молекул.  $6N$ -мерное фазовое пространство ( $\Gamma$ -пространство). Фазовые точки и фазовые траектории.
4. Ансамбль Гиббса.  $N$ -частичная функция распределения, ее нормировка. Усеченные функции распределения. Гипотеза молекулярного хаоса.
5.  $6$ -мерное фазовое пространство ( $\mu$ -пространство). Локальная микроскопическая фазовая плотность. Функция распределения для разреженного газа. Физически бесконечно малый элемент объема фазового пространства и промежуток времени. Нормировки функции распределения в  $\mu$ -пространстве и в пространстве скоростей. Локальная числовая плотность молекул.
6. Собственные (или тепловые) скорости молекул. Средние величины для однокомпонентного газа: общее определение для любого молекулярного признака, массовая плотность, макроскопическая скорость движения газа как целого, температура.
7. Векторы потоков однокомпонентного газа: общее определение для любого молекулярного признака, тензор напряжений, бездивергентный тензор напряжений, давление газа, плотность теплового потока. Термическое уравнение состояния, связывающее давление газа, числовую плотность молекул и температуру.
8. Газовые смеси. Парциальные функции распределения молекулярных скоростей. Средние величины для отдельных компонентов и газовой смеси в целом: общее определение, парциальная плотность, закон Дальтона, парциальная скорость движения компонента, среднечисловая скорость смеси, среднемассовая (гидродинамическая) скорость смеси, диффузионная скорость, парциальная и полная температуры смеси.

9. Векторы потоков для отдельных компонентов и всей смеси: общие определения, тензор напряжений, давление, бездивергентный тензор напряжений, плотность теплового потока.
10. Динамика парных столкновений. Законы сохранения массы, импульса и энергии при упругих столкновениях. Сумматорные инварианты (инварианты столкновений). Сохранение модуля относительной скорости взаимодействующих частиц. Закон сохранения момента импульса. Неизменность прицельного расстояния. Угол рассеяния. Дифференциальное и полное сечения рассеяния. Транспортные сечения рассеяния.
11. Потенциал парного взаимодействия. Дальнодействующие силы притяжения и близкодействующие силы отталкивания. Модельные потенциалы: твердые сферические молекулы, точечный центр отталкивания, максвелловские молекулы, потенциал Леннарда-Джонса (6-12). Потенциалы с бесконечным радиусом действия и модель разреженного газа.
12. Частота столкновений и средняя длина свободного пробега молекул в газовой смеси. Расчет этих величин для равновесного газа, состоящего из твердых сферических молекул.
13. Уравнение Больцмана и его свойства. Физический вывод уравнения Больцмана. Свойство симметрии интеграла столкновений. Моменты интеграла столкновений для сумматорных инвариантов.
14. Вероятность состояния газа с заданной функцией распределения. H-функция Больцмана. H-теорема. Ее связь со вторым законом термодинамики. Микроскопическая обратимость и макроскопическая необратимость.
15. Принцип детального равновесия. Максвелловская функция распределения и ее свойства. Абсолютное и локальное равновесие. Связь между минимальным значением H-функции и энтропией идеального газа.
16. Слабонеравновесное состояние газа. Линеаризованное уравнение Больцмана. Интегральные скобки. Свойство коммутативности интегральных скобок.
17. Общие уравнения переноса для компонента и всей газовой смеси.
18. Уравнения неразрывности для числа молекул и массы газа. Уравнение переноса импульса (уравнение движения) для смеси газов. Уравнение переноса внутренней энергии. Незамкнутость системы уравнений переноса.
19. Цель и задачи теории Чепмена – Энскога. Безразмерная форма уравнения Больцмана. Число Кнудсена как малый параметр. Разложение функции распределения в степенной ряд по малому параметру разреженности газа.
20. Вывод из уравнения Больцмана цепочки интегральных уравнений для членов разложения функции распределения.
21. Нулевое приближение. Система уравнений переноса для локально равновесного газа. Уравнение Эйлера и пределы его применимости.
22. Интегральное уравнение первого порядка. Вид общего решения уравнения первого порядка.
23. Диффузионная скорость. Концентрационная диффузия, бародиффузия, динодиффузия, термодиффузия. Коэффициенты диффузии, термодиффузии и термодиффузионные отношения для многокомпонентной смеси.
24. Тензор напряжений. Коэффициент динамической вязкости. Вектор плотности теплового потока в газовой смеси.
25. Коэффициент теплопроводности однородной и неоднородной по концентрациям смеси. Эффект Дюфура.
26. Замкнутая система уравнений переноса в первом приближении метода Чепмена-Энскога. Уравнение движения Навье-Стокса.

27. Бинарная смесь газов. Коэффициенты взаимной диффузии и термодиффузии. Диффузионная скорость. Самодиффузия. Первый и второй законы диффузии Фика для бинарной смеси.
28. Коэффициент вязкости однокомпонентного газа. Омега-интегралы Чепмена-Каулинга.
29. Коэффициент теплопроводности однокомпонентного газа, его связь с коэффициентом вязкости.
30. Коэффициент взаимной диффузии бинарной газовой смеси.
31. Коэффициент термодиффузии бинарной смеси. Приведенная температура. Температура инверсии.
32. Восстановление потенциальных параметров из экспериментальных данных по коэффициентам переноса. Комбинационные правила.

**8.3.6. Ресурсы АПИМ УрФУ, СКУД УрФУ для проведения тестового контроля в рамках текущей и промежуточной аттестации**

не используются

**8.3.7. Ресурсы ФЭПО для проведения независимого тестового контроля**

не используются

**8.3.8. Интернет-тренажеры**

не используются

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.  
Ельцина»

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

<b>Перечень сведений о рабочей программе дисциплины</b>	<b>Учетные данные</b>
<b>Модуль</b> Кинетические явления в материальных средах	<b>Код модуля</b> 1108188
<b>Образовательная программа</b> Физика	<b>Код ОП</b> 03.03.02/01.02
<b>Направление подготовки</b> Физика	<b>Код направления и уровня подготовки</b> 03.03.02
<b>Уровень подготовки</b> бакалавриат	
<b>ФГОС ВО</b>	<b>Реквизиты приказа Минобрнауки РФ об утверждении ФГОС ВО:</b> 07.08.2014 № 937

Екатеринбург, 2016

Рабочая программа дисциплины составлена авторами:

<b>№ п/п</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, ученое звание</b>	<b>Должность</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Подпись</b>
1	Германенко А.В.	Доктор физико-математических наук	Зав. кафедрой	компьютерной физики	

**Руководитель модуля**

А.В. Германенко

**Рекомендовано учебно-методическим советом Института естественных наук**

Председатель учебно-методического совета

Е.С. Буянова

Протокол № 49 от 02.06.2016 г.

**Согласовано:**

Дирекция образовательных программ

## **1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЦИПЛИНЫ Кинетические явления в полупроводниках**

### **1.1. Аннотация содержания дисциплины**

Дисциплина «Кинетические явления в полупроводниках» входит в модуль «Кинетические явления в твердых телах». Дисциплина формирует у студентов современное представление о фундаментальных физических свойствах полупроводниковых и диэлектрических материалов. Дает представление и прививает навыки получения фундаментальных знаний о природе физических явлений на примере полупроводников. На основе анализа экспериментальных данных, используя современные теоретические модели, дает представление об энергетическом спектре электронов и дырок, статистических закономерностях и кинетических эффектах в полупроводниках. Знакомит с основными экспериментальными результатами и достижениями в физике полупроводников и диэлектриков. Изучает структурные и динамические свойства идеальных и примесных диэлектрических кристаллов.

### **1.2. Язык реализации программы - русский**

### **1.3. Планируемые результаты обучения по дисциплине**

Результатом обучения в рамках дисциплины является формирование у студента следующих компетенций:

ОК7 - способность к самоорганизации и самообразованию;

ОПК3 - способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач;

ПК1 - способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин;

ПК4 - способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин;

ДПК2 - способность применять на практике теоретические знания и экспериментальные методы физических исследований в области физики и техники низкотемпературного эксперимента, физики неравновесных процессов в газе, жидкости и твердом теле;

ДПК4 - владеть основами экспериментальных методов теплофизических и электромагнитных измерений.

В результате освоения дисциплины студент должен:

Знать основы кинетических явлений в полупроводниках;

Уметь применять полученные знания для решения практических задач, постановки, проведения и интерпретации физического эксперимента при исследовании свойств полупроводниковых материалов;

Владеть методами решения физических задач применительно к полупроводникам и диэлектрикам и владеть навыками проведения физико-математического моделирования свойств кристаллов полупроводников с использованием современных компьютерных технологий.

#### 1.4. Объем дисциплины

№ п/п	Виды учебной работы	Объем дисциплины		Распределение объема дисциплины по семестрам (час.)
		Всего часов	В т.ч. контактная работа (час.)*	6
1.	<b>Аудиторные занятия</b>	<b>51</b>	<b>51</b>	<b>51</b>
2.	Лекции	9	9	9
3.	Практические занятия	42	42	42
4.	Лабораторные работы			
5.	<b>Самостоятельная работа студентов, включая все виды текущей аттестации</b>	<b>17</b>	<b>7,65</b>	<b>17</b>
6.	<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>3,4</b>	<b>0,25</b>	<b>3,4</b>
7.	<b>Общий объем по учебному плану, час.</b>	<b>72</b>	<b>58,90</b>	<b>72</b>
8.	<b>Общий объем по учебному плану, з.е.</b>	<b>2</b>		<b>2</b>

#### 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Код раздела, темы	Раздел, тема дисциплины*	Содержание
1	История. Основные свойства полупроводников.	История открытия полупроводников. Ранние исследования. Основные свойства полупроводников. Применение полупроводников в науке и технике. Классификация полупроводников (по составу, по ширине запрещенной зоны, разделение на прямозонные и непрямозонные материалы, по магнитным свойствам).
2	Спектр полупроводников. Зонная структура	Элементы зонной теории. Формулировка общей квантово-механической задачи. Роль кулоновского взаимодействия в формировании спектра. Адиабатическое приближение и его применимость. Одноэлектронное приближение. Простейшие модели: одномерный ящик и модель Кронига-Пенни. Теорема Блоха. Предсказания моделей и их соответствие реальной ситуации. Зонный характер спектра в модели Кронига-Пенни. Волновая функция электрона в периодическом потенциале. Форма краев зон. Характер движения электрона в периодическом потенциале (движение во внешнем электрическом поле). Понятие групповой скорости. Эффективная масса. Типы зонной структуры в кристаллических телах: металлы, полуметаллы, диэлектрики. Зонная структура конкретных полупроводников: германий, кремний, полупроводники со структурой цинковой обманки. Бесщелевые и узкозонные полупроводники. Полуметаллы. Модель Кейна (характерные особенности и различные предельные случаи). Модель Латтинжера. Лёгкие и тяжёлые дырки. Энергетический спектр твердых растворов на HgCdTe и их магнитных аналогов HgMnTe. Влияние одноосного и всестороннего сжатия на спектр носителей.
3	Дефекты в полупроводниках	Энергетический спектр реальных полупроводников. Классификация дефектов. Различные виды дефектов (примеси замещения, внедрения, вакансии, наличие границы). Мелкие примесные уровни (водородоподобная примесь). Спектр и волновые функции мелких



		донорных и акцепторных состояний. Спектр слабо- и сильнолегированных полупроводников. Переход Мотта.
4	Статистика полупроводников	Статистика полупроводников. Распределение Ферми-Дирака. Уровень Ферми. Вырожденный и невырожденный электронный газ. Плотность состояний. Плотность состояний в анизотропной зоне. Эффективная масса плотности состояний. Концентрация носителей заряда в зонах и на локальных уровнях. Интегралы Ферми. Решение уравнения электронейтральности для собственного полупроводника. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике. Решение уравнения электронейтральности в полупроводнике с одним типом однозарядных доноров. Температурная зависимость концентрации электронов в полупроводнике с одним типом однозарядных доноров. Решение уравнения электронейтральности и температурная зависимость концентрации электронов при одновременном наличии донорной и акцепторной примеси.
5	Явления переноса	Явления электронного переноса. Электропроводность. Подвижность. Транспортное время релаксации импульса. Закон Ома в анизотропных полупроводниках. “Дрейфовая” эффективная масса. Эффект Холла (один тип носителей, двигающихся с одинаковой скоростью, малые магнитные поля). Характер движения электронов и дырок в скрещенных электрическом и магнитном полях. Тензор электропроводности, эффект Холла и магнитосопротивление в произвольном магнитном поле. Эффект Холла и магнитосопротивление для двух типов носителей заряда – электронов и дырок. Температурная и магнитополевая зависимость коэффициента Холла.
6	Уравнение Больцмана.	Уравнение Больцмана. Правило усреднения времени релаксации импульса. Эффект Холла и магнитосопротивление для невырожденного и вырожденного электронного газа. Холл-фактор. Коэффициент магнитосопротивления. Время релаксации и вероятность квантовых переходов. Рассеяние на ионизированной примеси. Зависимость времени релаксации от энергии для различных механизмов рассеяния. Температурная зависимость подвижности.
7	Магнитные квантовые эффекты	Магнитные квантовые эффекты. Энергетический спектр электронов и дырок в магнитном поле. Плотность состояний. Учет спина. Осцилляции Шубникова-де Гааза. Условия наблюдения. Определение концентрации и эффективной массы из осцилляций Шубникова-де Газа. Магнитофононный резонанс (МФР). Определение эффективной массы из МФР. Межзонное и примесное магнитное вымораживание носителей. Циклотронный резонанс (классическое рассмотрение).

### 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УЧЕБНОГО ВРЕМЕНИ

#### 3.2. Распределение аудиторной нагрузки и мероприятий самостоятельной работы по разделам дисциплины

Для очной формы обучения



#### 4. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ, САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

##### 4.1. Лабораторные работы

Не предусмотрено

##### 4.4. Практические занятия

Код раздела,	Номер занятия	Тема занятия	Время на проведение занятия (час.)
1	1-3	Классификация полупроводников. Технологии выращивания полупроводниковых материалов и гетероструктур.	6
2	4-6	Решение задачи о нахождении энергетического спектра одномерной периодической решетки. Анализ спектра в модели Латтинжера. Исследование влияния одноосного и всестороннего сжатия на спектр носителей.	6
3	7-9	Спектр и волновые функции мелких донорных и акцепторных состояний. Спектр слабо- и сильнолегированных полупроводников.	6
4	10-12	Статистика полупроводников. Решение уравнения электронейтральности в полупроводнике с одним типом однозарядных доноров. Температурная зависимость концентрации электронов в полупроводнике с одним типом однозарядных доноров. Решение уравнения электронейтральности и температурная зависимость концентрации электронов при одновременном наличии донорной и акцепторной примеси.	6
5	12-15	Анализ эффект Холла при наличии одного и двух типов носителей заряда в полупроводнике.	6
6	16-18	Расчет температурных зависимостей подвижности носителей заряда при различных механизмах рассеяния.	6
7	19-21	Определение концентрации и эффективной массы из осцилляций Шубникова-де Газа. Определение эффективной массы из МФР.	6
<b>Всего:</b>			<b>42</b>

4.4. Примерная тематика самостоятельной работы

4.4.1. Примерный перечень тем домашних работ

не предусмотрено

4.4.2. Примерный перечень тем графических работ

не предусмотрено

4.4.3. Примерный перечень тем рефератов (эссе, творческих работ)

не предусмотрено

4.4.4. Примерная тематика индивидуальных или групповых проектов

не предусмотрено

4.3.5. Примерный перечень тем расчетных работ (программных продуктов)

не предусмотрено

4.3.6. Примерный перечень тем расчетно-графических работ

не предусмотрено

4.3.7. Примерный перечень тем курсовых проектов (курсовых работ)

не предусмотрено

#### 4.3.8. Примерная тематика контрольных работ

1. Спектр свободных и локализованных состояний.
2. Статистика полупроводников. Явления переноса.

#### 4.3.9. Примерная тематика коллоквиумов

не предусмотрено

### 5. СООТНОШЕНИЕ РАЗДЕЛОВ, ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ПРИМЕНЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБУЧЕНИЯ

Код раздела, темы дисциплины	Активные методы обучения						Дистанционные образовательные технологии и электронное обучение					
	Проектная работа	Кейс-анализ	Деловые игры	Проблемное обучение	Командная работа	Другие (указать, какие)	Сетевые учебные курсы	Виртуальные практикумы и тренажеры	Вебинары и видеоконференции	Асинхронные web-конференции и семинары	Совместная работа и разработка контента	Другие (указать, какие)
1-7				*								

### 6. ПРОЦЕДУРЫ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ (Приложение 1)

### 7. ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ НЕЗАВИСИМОГО ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ (Приложение 2)

### 8. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (Приложение 3)

### 9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 9.1.Рекомендуемая литература

##### 9.1.1.Основная литература

- А.И. Ансельм. Введение в теорию полупроводников. Лань. 2008. – 624 с.  
К.В. Шалимова. Физика полупроводников. Лань. 2010. – 400 с.  
Питер Ю, Мануэль Кардона. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит. 2002. - 373 с.

##### 9.1.2.Дополнительная литература

- Й. Имри. Введение в мезоскопическую физику.: Физматлит. 2002. - 304 с.  
Б.И.Шкловский, А.Л.Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука. 1979. – 416 с.  
Блейкмор Д. Физика твердого тела : Пер. с англ. / Д. Блейкмор ; Ред. пер. Д. Г. Андрианов, К. Зеегер. Физика полупроводников. М.: Мир. 1977. – 615 с.  
П.С. Киреев. Физика полупроводников. М.: Высшая школа. 1975. – 584 с.  
Дж. Блекмор. Статистика электронов в полупроводниках. М.: Мир, 1964.  
Р. Смит. Полупроводники. М.: Мир, 1982.  
Дж.Займан, Принципы теория твердого тела, М.: Мир, 1966

Ч.Киттель, Введение в физику твердого тела, М.: Наука, 1978  
В.Л.Бонч-Бруевич, С.Г.Калашников, Физика полупроводников, М.: Наука, 1977.  
В.Л.Бонч-Бруевич, Сборник задач по физике полупроводников, М.: Наука, 1987

### **9.2.Методические разработки**

не используются

### **9.3.Программное обеспечение**

Пакет MathCAD

### **9.4. Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

Электронная библиотека УрФУ [oras.urfu.ru](http://oras.urfu.ru)

Портал информационно-образовательных ресурсов УрФУ [study.urfu.ru](http://study.urfu.ru)

Зональная научная библиотека УрФУ [lib.urfu.ru](http://lib.urfu.ru)

Электронные ресурсы образовательного портала [edu.ru](http://edu.ru).

### **9.5.Электронные образовательные ресурсы**

Не используются

## **10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Сведения об оснащённости дисциплины специализированным и лабораторным оборудованием**

Аудитории, оборудованные мультимедийной техникой. Компьютерный класс с установленным пакетом MathCAD.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**  
**к рабочей программе дисциплины**

**6. ПРОЦЕДУРЫ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**6.1. Весовой коэффициент значимости дисциплины –1**

**6.2. Процедуры текущей и промежуточной аттестации по дисциплине**

<b>1. Лекции: коэффициент значимости совокупных результатов лекционных занятий – 0.5</b>		
<b>Текущая аттестация на лекциях</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
Посещение лекций	7, 1-17	20
Контрольная работа № 1	7, 8	40
Контрольная работа № 2	7, 16	40
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по лекциям – 0.6</b>		
<b>Промежуточная аттестация по лекциям – зачет</b>		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по лекциям – 0.4</b>		
<b>2. Практические/семинарские занятия: коэффициент значимости совокупных результатов практических/семинарских занятий – 0.5</b>		
<b>Текущая аттестация на практических/семинарских занятиях</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
Посещение занятий	7, 1-17	20
Выполнение заданий на занятиях	7, 2-16	80
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по практическим/семинарским занятиям - 1.0</b>		
<b>Промежуточная аттестация по практическим/семинарским занятиям – не предусмотрена</b>		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по практическим/семинарским занятиям – 0</b>		
<b>3. Лабораторные занятия: не предусмотрены</b>		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по лабораторным занятиям - 0</b>		

**6.3. Процедуры текущей и промежуточной аттестации курсовой работы/проекта не предусмотрена.**

**6.4. Коэффициент значимости семестровых результатов освоения дисциплины**

<b>Порядковый номер семестра по учебному плану, в котором осваивается дисциплина</b>	<b>Коэффициент значимости результатов освоения дисциплины в семестре</b>
7	1

## **7. ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ НЕЗАВИСИМОГО ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ**

Дисциплина и ее аналоги, по которым возможно тестирование, отсутствуют на сайте ФЭПО <http://fepo.i-exam.ru>.

Дисциплина и ее аналоги, по которым возможно тестирование, отсутствуют на сайте Интернет-тренажеры <http://training.i-exam.ru>.

Дисциплина и ее аналоги, по которым возможно тестирование, отсутствуют на портале СМУДС УрФУ.

В связи с отсутствием Дисциплины и ее аналогов, по которым возможно тестирование, на сайтах ФЭПО, Интернет-тренажеры и портале СМУДС УрФУ, тестирование в рамках НТК не проводится.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**  
**к рабочей программе дисциплины**

**8. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**8.1. КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЬНО-ОЦЕНОЧНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ В РАМКАХ БРС**

В рамках БРС применяются утвержденные на кафедре критерии оценивания достижений студентов по каждому контрольно-оценочному мероприятию. Система критериев оценивания, как и при проведении промежуточной аттестации по модулю, опирается на три уровня освоения компонентов компетенций: пороговый, повышенный, высокий.

Компоненты компетенций	Признаки уровня освоения компонентов компетенций		
	пороговый	повышенный	высокий
<b>Знания</b>	Студент демонстрирует знание-знакомство, знание-копию: узнает объекты, явления и понятия, находит в них различия, проявляет знание источников получения информации, может осуществлять самостоятельно репродуктивные действия над знаниями путем самостоятельного воспроизведения и применения информации.	Студент демонстрирует аналитические знания: уверенно воспроизводит и понимает полученные знания, относит их к той или иной классификационной группе, самостоятельно систематизирует их, устанавливает взаимосвязи между ними, продуктивно применяет в знакомых ситуациях.	Студент может самостоятельно извлекать новые знания из окружающего мира, творчески их использовать для принятия решений в новых и нестандартных ситуациях.
<b>Умения</b>	Студент умеет корректно выполнять предписанные действия по инструкции, алгоритму в известной ситуации, самостоятельно выполняет действия по решению типовых задач, требующих выбора из числа известных методов, в предсказуемо изменяющейся ситуации	Студент умеет самостоятельно выполнять действия (приемы, операции) по решению нестандартных задач, требующих выбора на основе комбинации известных методов, в непредсказуемо изменяющейся ситуации	Студент умеет самостоятельно выполнять действия, связанные с решением исследовательских задач, демонстрирует творческое использование умений (технологий)
<b>Личностные качества</b>	Студент имеет низкую мотивацию учебной деятельности, проявляет безразличное, безответственное отношение к учебе, порученному делу	Студент имеет выраженную мотивацию учебной деятельности, демонстрирует позитивное отношение к обучению и будущей трудовой деятельности, проявляет активность.	Студент имеет развитую мотивацию учебной и трудовой деятельности, проявляет настойчивость и увлеченность, трудолюбие, самостоятельность, творческий подход.



## **8.2. КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЗАВИСИМОГО ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ**

НТК не применяется

## **8.3. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

### **8.3.1. Примерные задания для проведения мини-контрольных в рамках учебных занятий**

не предусмотрено

### **8.3.2. Примерные контрольные задачи в рамках учебных занятий**

1. Основные свойства полупроводников. Основные открытия и достижения в науке и технологии, которые сыграли решающую роль в достижении современного состояния физики полупроводников, как фундаментальной науки. Методы получения полупроводниковых материалов. Методы легирования. Рост самоорганизующихся квантовых точек. Методы получения тонких слоев.

2. Формулировка общей квантово-механической задачи о спектре твердого тела. Основные приближения, позволяющие значительно упростить многочастичный гамильтониан. Эффекты, которые были потеряны при адиабатическом и одноэлектронном приближениях. Рассчитать спектр квантовой частицы в одномерном потенциальном ящике. Сделать оценки расстояния между энергетическими уровнями при разной степени заполнения ящика. Доказать теорему Блоха. Свести одномерное уравнение Шредингера к уравнению для блоховских множителей. Найти спектр первых трех зон в одномерном кристалле, найти эффективные массы закона дисперсия вблизи экстремум зон. Построить зависимость эффективной массы от энергии в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  с содержанием кадмия 20%. Используя табличные параметры спектра, найти эффективные массы плотности состояний для электронов в Ge и Si. Построить изоэнергетические поверхности для легких и тяжелых дырок в валентной зоне Si, Ge и GaAs. Проследить эволюцию спектра валентной зоны при приложении одноосного давления вдоль главных кристаллографических направлений.

3. Найти энергию ионизации мелких донорных состояний в GaAs. Найти энергию ионизации акцепторных состояний в GaAs, InSb, учитывая вырожденный характер валентной зоны. Найти энергию ионизации акцептора в бесщелевом полупроводнике HgTe, обсудить необычность ситуации и возможные последствия с точки зрения поведения электропроводности и эффекта Холла при изменении температуры. Оценить концентрацию перехода Мотта для электронов и дырок в арсениде галлия.

4. Построить функцию Ферми-Дирака при различных температурах. Вывести формулы и построить зависимость плотности состояний от энергии для параболического и кейновского законов дисперсии. Построить зависимость заселенности электронных состояний для вырожденного и невырожденного распределения электронов. Написать программу для расчета интегралов Ферми. Оценить погрешность, возникающую при использовании приближенных формул из учебника по физике полупроводников в области промежуточного вырождения электронного газа. Решить уравнение электронейтральности для собственного арсенида галлия и построить температурную зависимость уровня Ферми и концентрации электронов (дырок). Построить примерный ход уровня Ферми в примесном полупроводнике при наличии и отсутствии компенсирующей примеси. Обсудить получившееся отличие. Построить качественную температурную зависимость электронов в примесном полупроводнике при разной степени компенсации. Обсудить характерные особенности. Построить качественный ход температурной зависимости концентрации электронов и дырок

в полупроводниках n- и p-типов в широкой области температур. Построить температурную зависимость концентрации электронов и дырок в бесщелевом полупроводнике HgTe. Обсудить различие с полупроводниками с открытой щелью.

5. По имеющимся величинам подвижности и концентрации электронов найти удельное сопротивление материала. Зная геометрию образца и его параметры, найти падение напряжения, возникающее на нем при пропускании электрического тока определенной силы. Объяснить физический смысл понятия подвижность. Объяснить разницу между понятиями транспортное время релаксации импульса и время релаксации импульса. Показать, что электропроводность германия и кремния является скалярной величиной, несмотря на то, что минимумы зоны проводимости в этих материалах являются анизотропными. Объяснить эффект Холла. Уметь найти эдс Холла в материале с заданными параметрами, если задана геометрия эксперимента и его условия (магнитное поле и сила тока, протекающего через образец). Объяснить смену знака эффекта Холла при изменении температуры в узкозонных полупроводниках p-типа. Объяснить отсутствие такой смены в полупроводниках n-типа. Построить температурную зависимость коэффициента Холла (в малых магнитных полях) и проводимости в конкретных материалах с заданным уровнем легирования, используя знания энергетического спектра.

6. Построить зависимость тензоров сопротивления и проводимости от магнитного поля в случае вырожденного полупроводника. Объяснить явление магнитосопротивления в невырожденном электронном газе. Объяснить возникновение зависимости от магнитного поля сопротивления и коэффициента Холла в вырожденном полупроводнике с двумя (или более) типами носителей заряда. Построить температурную зависимость подвижности электронов в арсениде галлия с заданной концентрацией ионизированной примеси. Сравнить расчет с экспериментальными данными. Объяснить имеющееся различие (или совпадение). Найти по заданной величине подвижности время транспортное время релаксации. Зная величину коэффициента Холла и удельное сопротивление образца заданного материала, найти концентрацию носителей, подвижность и время релаксации импульса.

7. Построить уровни Ландау для электронов и дырок в арсениде галлия (легкие и тяжелые дырки считать невзаимодействующими). Построить зависимость ширины запрещенной зоны в HgCdTe от магнитного поля. Объяснить особенности плотности состояний в магнитном поле. К каким особенностям в спектре электрона в магнитном поле приводит учет спина. Объяснить природу возникновения осцилляций Шубникова-де Газа. Объяснить, почему не осциллирует коэффициент Холла. Условия наблюдения осцилляций Шубникова-де Газа. Определить по экспериментальным осцилляционным кривым концентрацию электронов и их эффективной массы. Объяснить природу магнитофононного резонанса (МФР). Как определяется эффективная масса в экспериментах по МФР. Построить зависимость концентрации электронов от магнитного поля в области примесной и собственной проводимости.

### 8.3.3. Примерные контрольные кейсы

не предусмотрено

### 8.3.4. Перечень примерных вопросов для зачета

1. Модель Латтинжера. Легкие и тяжелые дырки.
2. Найти транспортное время релаксации импульса электронов в кусочке интимонида индия, проводимость которого равна  $5 \text{ (Ом см)}^{-1}$ , коэффициент Холла, измеренный на этом кусочке равен  $R_H = -6250 \text{ см}^3/\text{Кл}$ .
3. Простейшие модели спектра: одномерный ящик и модель Блоха. Предсказания моделей и их соответствие реальной ситуации.
4. Зависимость энергии Ферми от температуры в полупроводнике n-типа. Рассмотреть случаи нулевой и ненулевой компенсации.

5. Магнитофононный резонанс (МФР). Определение эффективной массы их экспериментаов по МФР.
6. Решение уравнения электронейтральности и температурная зависимость концентрации электронов в полупроводнике с одним типом однозарядных доноров.
7. Эффект Холла (один тип носителей, двигающихся с одинаковой скоростью, малые магнитные поля). Угол Холла. Характер движения электронов и дырок в скрещенных электрических и магнитных полях.
8. Ранние исследования и основные свойства полупроводников. Применение полупроводников.
9. Распределение Ферми-Дирака. Уровень Ферми. Вырожденный и невырожденный электронный газ.
10. Характер движения электрона в периодическом потенциале при наличии внешнего электрического поля. Понятие групповой скорости. Эффективная масса.
11. Построить примерный вид зависимости коэффициента Холла от магнитного поля для полупроводника со следующими параметрами:  $n=10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $p=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_n=10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$ ,  $\mu_p=10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$ .
12. Решение уравнения электронейтральности и температурная зависимость концентрации электронов при одновременном наличии донорной и акцепторной примеси. Считать  $N_D > N_A$ .
13. Тензор электропроводности, эффект Холла и магнитосопротивление в произвольном магнитном поле. Рассмотреть случаи вырожденного и невырожденного распределения носителей заряда, сильные и слабые магнитные поля.
14. Зонная структура полупроводников со структурой цинковой обманки. Бесщелевые и узкощелевые полупроводники. Спектр твердых растворов теллурида кадмия-ртути при различной концентрации ртути.
15. Магнитосопротивление для вырожденного и невырожденного полупроводника. Коэффициент магнитосопротивления, его зависимость от механизма рассеяния.
16. Зависимость времени релаксации импульса от энергии для различных механизмов рассеяния. Температурная зависимость подвижности.
17. Типы зонной структуры в кристаллических веществах. Зонная структура германия и кремния.
18. Эффект Холла и магнитосопротивление и их зависимости от магнитного поля для двух типов носителей заряда – электронов и дырок.
19. Энергетический спектр электронов и дырок в магнитном поле. Плотность состояний. Модификация спектра и плотности состояний при учете спина.
20. Элементы зонной теории. Формулировка общей квантово-механической задачи о нахождении электронного спектра. Адиабатическое приближение и его применимость. Одноэлектронное приближение.
21. Задача. Через образце GaAs? Вдоль бруска квадратного сечения  $1 \times 1 \text{ мм}^2$  пропускается электрический ток силой 1 мА. Оценить и сравнить между собой тепловую и дрейфовую скорость электронов при комнатной температуре. Концентрация электронов равна  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , их подвижность равна  $5000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$ .
22. Решение уравнения электронейтральности для собственного полупроводника. Температурная зависимость концентрации носителей заряда и уровня Ферми в собственном полупроводнике.
23. Зависимость ширины запрещенной зоны от магнитного поля. Обсудить возможные следствия с точки зрения измеряемых физических величин.
24. Классификация полупроводников. Методы выращивания полупроводников.
25. Электропроводность. Подвижность. Транспортное время релаксации импульса. Закон Ома в анизотропных полупроводниках.
26. Уравнение Больцмана. Правило усреднения времени релаксации импульса.
27. Эффект Холла для невырожденного и вырожденного электронного газа. Холл-фактор.
28. Межзонное и примесное магнитное вымораживание носителей.

29. Время релаксации и вероятность квантовых переходов. Рассеяние на ионизованной примеси. Температурная зависимость подвижности при рассеянии на ионизованной примеси.
30. Плотность состояний в изотропной и анизотропной зоне. Эффективная масса плотности состояний. Концентрация носителей заряда в зонах и на локальных уровнях. Интегралы Ферми.
31. Зонный характер спектра в модели Блоха. Волновая функция электрона в периодическом потенциале. Форма краев зон.
32. Модель Кейна.
33. Решение уравнения электронейтральности и температурная зависимость концентрации электронов в полупроводнике с одним типом однозарядных доноров.
34. Энергетический спектр реальных полупроводников. Классификация дефектов. Мелкие примесные уровни. Спектр и волновые функции мелких донорных и акцепторных состояний.

#### **8.3.5. Перечень примерных вопросов для экзамена**

не предусмотрено

#### **8.3.6. Ресурсы АПИМ УрФУ, СКУД УрФУ для проведения тестового контроля в рамках текущей и промежуточной аттестации**

не используются

#### **8.3.7. Ресурсы ФЭПО для проведения независимого тестового контроля**

не используются

#### **8.3.8. Интернет-тренажеры**

не используются

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н.Ельцина»

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**КИНЕТИКА И ТЕРМОДИНАМИКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ЖИДКОСТЬ - ГАЗ**

<b>Перечень сведений о рабочей программе дисциплины</b>	<b>Учетные данные</b>
<b>Модуль</b> Кинетические явления в материальных средах	<b>Код модуля</b> 1108188
<b>Образовательная программа</b> Физика	<b>Код ОП</b> 03.03.02/01.02
<b>Направление подготовки</b> Физика	<b>Код направления и уровня подготовки...</b>
<b>Уровень подготовки</b> бакалавриат	03.03.02
<b>ФГОС ВО</b>	<b>Реквизиты приказа Минобрнауки РФ об утверждении ФГОС ВО:</b> 07.08.2014 № 937

Екатеринбург, 2016

Рабочая программа дисциплины составлена авторами:

<b>№ п/п</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, ученое звание</b>	<b>Должность</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Подпись</b>
1	Мельникова Нина Владимировна	кандидат физико- математических наук, доцент	доцент	Кафедра физики низких температур	

**Руководитель модуля**

А.В. Германенко

**Рекомендовано учебно-методическим советом Института естественных наук**

Председатель учебно-методического совета

Е.С. Буянова

Протокол № 49 от 02.06.2016 г.

**Согласовано:**

Дирекция образовательных программ

## 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЦИПЛИНЫ

*Кинетика и термодинамика фазовых превращений жидкость – газ*

### 1.2. Аннотация содержания дисциплины

Дисциплина является частью модуля «Кинетические явления в неупорядоченных средах». Изучение дисциплины направлено на формирование знаний в области кинетики и термодинамики фазовых переходов, процессов возникновения новой фазы при фазовых превращениях, фазовых переходов жидкость – газ в т.ч. в условиях низких температур. Данная дисциплина опирается на такие дисциплины, изученные студентами ранее, как «Молекулярная физика», «Химия», «Дифференциальные уравнения», «Математическая физика», «Теория вероятностей и математическая статистика». Все лекционные и практические занятия проводятся с обязательным использованием электронных презентаций в специализированных аудиториях, лабораториях, криогенной станции, с осуществлением опытов, демонстрирующих свойства некоторых криогенных жидкостей, демонстрацией работы новейшей криогенной аппаратуры.

### 1.2. Язык реализации программы - русский

### 1.3. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Результатом обучения в рамках дисциплины является формирование у студента следующих компетенций:

ОК7 - способность к самоорганизации и самообразованию;

ОПК2 - способность использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей;

ОПК3 - способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач;

ПК1 - способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин;

ПК3 - готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований;

ПК4 - способность применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин;

ПК5 - способность пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований;

ДПК2 - способность применять на практике теоретические знания и экспериментальные методы физических исследований в области физики и техники низкотемпературного эксперимента, физики неравновесных процессов в газе, жидкости и твердом теле;

ДПК4 - владеть основами экспериментальных методов теплофизических и электромагнитных измерений.

В результате освоения дисциплины студент должен:

Знать:

основы теории процессов в неравновесных средах, кинетики фазовых переходов первого рода, термодинамики фазовых переходов.

Уметь:

анализировать кинетические процессы на межфазной границе жидкость – газ;

использовать базовые теоретические знания для решения профессиональных задач;

проводить расчеты основных физических величин, характеризующих равновесные и неравновесные свойства твердых тел, жидкостей и газов на основе существующих моделей;

применять методы безопасности при работе с оборудованием, работающим под давлением, криогенными жидкостями;

Владеть (демонстрировать навыки и опыт деятельности): методами решения практических задач, связанных с получением и применением криогенных температур, экспериментальными и теоретическими методами исследования процессов переноса и релаксации в твердых телах, жидкостях и газах.

#### 1.4 Объем дисциплины

№ п/п	Виды учебной работы	Объем дисциплины		Распределение объема дисциплины по семестрам (час.)
		Всего часов	В т.ч. контактная работа (час.)*	6
1.	<b>Аудиторные занятия</b>	<b>51</b>	<b>51</b>	<b>51</b>
2.	Лекции	9	9	9
3.	Практические занятия	42	42	42
4.	Лабораторные работы			
5.	<b>Самостоятельная работа студентов, включая все виды текущей аттестации</b>	<b>75</b>	<b>7,65</b>	<b>75</b>
6.	<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>Э,18</b>	<b>2,33</b>	<b>Э,18</b>
7.	<b>Общий объем по учебному плану, час.</b>	144	60,98	144
8.	<b>Общий объем по учебному плану, з.е.</b>	4		4

### 3. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Код раздела, темы	Раздел, тема дисциплины*	Содержание
1	<i>Термодинамические особенности процесса охлаждения в низкотемпературной области Низкотемпературные проблемы и возможности ожижения газов. Методы ожижения газов. Воздухоразделение.</i>	Основные понятия. Термодинамика и кинетика. Физическая кинетика фазовых переходов первого и второго рода. Температура и энтропия. Фазовые диаграммы. Газ и пар. Тройная точка. Критическая температура. Общие принципы охлаждения. Закон Нернста. Получение низких температур. Ожижение газов. Хладоагенты современной криогенной техники. Холодильные процессы и циклы. Коэффициент охлаждения. Методы ожижения газов (поршневой и турбодетандер, дросселирование, положительный и отрицательный эффект Джоуля-Томсона, температура инверсии, выхлоп). Термодинамические особенности процесса охлаждения в низкотемпературной области. Холодильные термодинамические циклы. Холодопроизводительность, холодильный коэффициент, термодинамический КПД. Процесс дросселирования идеального и реального газа. Изображение процесса на диаграмме температура-энтропия. Основы расчета дроссельных систем. Условия получения положительного и отрицательного эффектов Джоуля-Томсона. Условия получения максимального охлаждения. Холодопроизводительность процесса дросселирования. Процесс



		<p>расширения идеального и реального газа при условии постоянства внутренней энергии. Равновесное адиабатическое расширение газа с совершением внешней работы; сравнительная характеристика термодинамической эффективности этого процесса по отношению к процессу дросселирования. Холодопроизводительность процесса. Расчет основных параметров процесса. Использование термодинамических диаграмм. Поршневые детандеры. Принципиальное устройство. Основные характеристики. Теоретическая и действительная индикаторные диаграммы. Изображение процессов на диаграмме температура-энтропия. Основные виды потерь в поршневых детандерах. Турбодетандеры. Принципиальное устройство и основные разновидности. Изображение процессов на диаграммах энтальпия-энтропия. Основные виды потерь. Процесс свободного выпуска газа из баллона. Минимальная работа криогенной системы. Основные термодинамические характеристики холодильного цикла. Характеристики реальных криогенных циклов. Идеальные циклы криогенных систем: криогенное термостатирование, охлаждение, ожижение. Циклы с предварительным охлаждением, дросселированием и детандированием. Термодинамические характеристики наиболее распространенных схем. Циклы с параллельным включением детандеров. Циклы с турбодетандерами. Детандерные циклы. Простой детандерный цикл. Детандирование с двумя ступенями охлаждения. Комбинированные дроссельно-детандерные циклы. Циклы Клода-Гейландта среднего и высокого давлений. Цикл низкого давления с турбодетандером. Циклы Коллинса, влияние числа ступеней на термодинамическую эффективность цикла. Циклы с дросселированием. Цикл Линде-Хемпсона. Роль регенеративного теплообмена. Цикл с предварительным охлаждением и дросселированием. Циклы для ожижения водорода и гелия. Каталитическая конверсия водорода в ожижительном цикле. Цикл ожижения гелия со встроенным водородным циклом. Водородный цикл Капицы-Кокрофта. Циклы с двойным дросселированием, их термодинамическая эффективность. Гелиевый рефрижератор Гиффорда-Мак-Магона. Основы термодинамического расчета криогенных систем. Метод энергетического баланса для расчета криогенных систем. Уравнения энергетического баланса для отдельных ступеней охлаждения: ступени предварительного охлаждения, детандирования, дросселирования. Ступени рефрижераторных и ожижительных циклов. Принципы получения продуктов разделения воздуха. Состав воздуха (концентрация газов, входящих в состав воздуха). Практическая значимость продуктов разделения воздуха. Объемы получаемых основных продуктов разделения воздуха в масштабе мирового производства. Основные методы получения продуктов разделения воздуха: криогенный (подробное описание метода), адсорбционный, диффузионный. Принцип работы криогенных воздуходелительных установок.</p>
2	<p><i>Свойства криогенных жидкостей (азот, водород, гелий). Характерные температуры, теплота испарения, особенности жидкого гелия (He-4,</i></p>	<p>Азот. Свойства газообразного и жидкого азота. Способы получения жидкого азота. Применение жидкого азота в криогенной и ракетно-космической технике. Применение водорода в криогенной технике. Основные промышленные методы его получения. Орто- и пара- модификации водорода. Влияние орто- и пара- конверсий на свойства водорода как криогенного хладагента. Дейтерий и тритий как криогенные жидкости. Распространенность He-4 и He-3 в природе. Методы и технологии получения газообразных He-4 и He-3 в промышленных масштабах.</p>

	<p><i>He-3, сверхтекучесть).</i></p>	<p>Области практического применения гелия. He-4: диаграмма состояния и физические характеристики при низких температурах. Особенности применения He-4 в качестве криогенного хладагента. Твердый He-4. Эксперименты по его получению. Диаграмма состояния He-4 в области кристаллизации. Основные физические свойства твердого He-4.</p> <p>Диаграмма состояний и физические свойства He-3 в низкотемпературной области. Применение He-3 в качестве криогенного хладагента.</p> <p>Физические свойства жидких He-4 и He-3.</p> <p>Характер изменения физических свойств He-4 в области -перехода. Основополагающие эксперименты и экспериментальные данные по изменению плотности, давления насыщенного пара, теплоты испарения, теплоемкости, теплопроводности, вязкости, электрических характеристик жидкого гелия. Влияние давления на -переход.</p> <p>Гелий-II.(He-II). Физические свойства. Сверхтекучесть He-II. Течение He-II в капиллярах и тонких пленках. Сверхщель.</p> <p>Основные положения двухжидкостной модели, ее экспериментальные подтверждения. Особенности переноса тепла в He-II. Проявление этих особенностей в физическом эксперименте. Роль сверхтекучей и нормальной компонент в переносе тепла.</p> <p>Механокалориметрический и термомеханический эффекты. Эффект "фонтанирования". Распространение акустических колебаний в He-II. Первый, второй и четвертый звук.</p> <p>Конденсация Бозе-Эйнштейна и сверхтекучесть гелия. Квантовая природа явления сверхтекучести. Возникновение сверхпоток в других физических системах. Основы квантово-механической теории сверхтекучести.</p> <p>Волновая функция конденсата. Потенциальный характер сверхтекучего течения. Уравнение для скорости сверхтекучей компоненты.</p> <p>Элементарные возбуждения в сверхтекучем гелии. Ротонный спектр. Критерий сверхтекучести Ландау. Критическая скорость сверхтекучего течения гелия, ее экспериментальное измерение.</p> <p>Аэродинамическая труба для сверхтекучей жидкости.</p> <p>Вращение сверхтекучей жидкости. Квантование циркуляции. Образование вихрей в сверхтекучем гелии. Структура и взаимодействие вихрей. Упругие свойства вихревых нитей. Экспериментальные методы обнаружения квантовых вихрей в сверхтекучем гелии. Вихревые нити во вращающемся He-II. Критическая скорость образования вихря. Вихревая структура вращающегося He-II. Верхняя критическая скорость.</p> <p>He-3 как ферми-жидкость. Сверхтекучесть He-3, основные экспериментальные результаты. Фазовая диаграмма сверхтекучих фаз He-3. Сверхтекучий He-3 в магнитном поле.</p>
<p><b>3</b></p>	<p><i>Методы получения сверхнизких температур (температур криогенного диапазона). Современные методы получения температур ниже 1 К: адиабатическое размагничивание</i></p>	<p>Адиабатическое размагничивание парамагнитных солей. Растворение He-3 в He-4. Рефрижераторы растворения He-3 в He-4. Физические основы работы, Конструкция, рабочие характеристики и особенности эксплуатации рефрижераторов растворения Сжатие твердого He-3 (эффект Померанчука). Использование эффекта Померанчука для получения низких температур.</p>

	<i>парамагнитной соли, растворение He-3 в He-4, адиабатическая кристаллизация He-3.</i>	
4	<i>Сосуды для хранения криогенных жидкостей. Криостаты для работы с ними и криокулеры. Конструкции, способы уменьшения тепловых нагрузок. Устройства для переливания криожидкостей (сифоны) и измерение их уровня.</i>	Принципиальное устройство криостатов, особенности их эксплуатации, рабочие вещества, эксплуатационные характеристики. Криостаты с многоступенчатым охлаждением. Переливание криогенных жидкостей. Термоакустические колебания в трубах. Лабораторная система заливки гелия в криостаты. Методы и системы измерения уровня криогенных жидкостей.
5	<i>Термометрия в криогенике. Первичные и вторичные термометры.</i>	Термодинамические принципы построения температурной шкалы. Практические температурные шкалы. Национальные и международные температурные шкалы. Единственность ПТШ. Абсолютная термодинамическая шкала температур. Возможность ее воспроизведения. Первичные и вторичные термометры. Методы и приборы для измерения температуры в интервале 13.81-273.16 К. Государственный первичный эталон в этом диапазоне. Методы и приборы для измерения температуры в интервале 5.2-13.81К. Государственный первичный эталон в этом интервале. Государственный специальный эталон в диапазоне 1.5-4.2 К. Вторичные термометры.
6	<i>Физическая кинетика фазовых переходов первого рода. Фазовые переходы жидкость – газ.</i>	Фазовые переходы 1 и 2 рода. Определение. Особенности. Основные понятия термодинамики и кинетики фазовых переходов. Фазовые переходы жидкость – газ и газ – жидкость. Критические явления. Метастабильные состояния системы. Бинодаль. Спинодаль. Устойчивость метастабильного состояния. Процесс образования зародышей. Термодинамика процесса. Теория зарождения новой фазы Фольмера-Вебера-Френкеля. Теория зарождения Беккера-Деринга-Зельдовича. Уравнение Фоккера-Планка. Общий вывод уравнения Фоккера-Планка. Решение уравнения. Условия применимости. Кинетика роста новой фазы. Теория Лифшица-Слезова. Зависимость скорости зародышеобразования от пересыщения. Полная система уравнений, определяющих кинетику фазового перехода, в теории Лифшица-Слезова

#### 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УЧЕБНОГО ВРЕМЕНИ

##### 3.3. Распределение аудиторной нагрузки и мероприятий самостоятельной работы по разделам дисциплины для очной формы обучения

Раздел дисциплины		Аудиторные занятия (час.)					Самостоятельная работа: виды, количество и объемы мероприятий																					
Код раздела, темы	Наименование раздела, темы	Всего по разделу, теме (час.)	Всего аудиторной работы (час.)	Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	Всего самостоятельной работы студентов (час.)	Подготовка к аудиторным занятиям (час.)				Выполнение самостоятельных внеаудиторных работ (колич.)							Подготовка к контрольным мероприятиям текущей аттестации (колич.)		Подготовка к промежуточной аттестации и по дисциплине (час.)	Подготовка в рамках дисциплины к промежуточной аттестации и по модулю (час.)						
								Всего (час.)	Лекция	Практ., семинар, занятие	Лабораторное занятие И/ли семинар, семинар-конфер., коллоквиум (магистратура)	Всего (час.)	Домашняя работа*	Графическая работа*	Реферат, эссе, творч. работа*	Проектная работа*	Расчетная работа, разработка программного продукта*	Расчетно-графическая работа*	Домашняя работа на иностр. языке*	Перевод инояз. литературы*			Курсовая работа*	Курсовой проект*	Всего (час.)	Контрольная работа*	Коллоквиум*	
																												Зачет
P1	Термодинамические особенности процесса охлаждения в низкотемпературной области. Низкотемпературные проблемы и возможности ожижения газов. Методы ожижения газов. Воздухоразделение.	27	10	2	8	17	11	2	9	0																		
P2	Свойства криогенных жидкостей (азот, водород, гелий). Характерные температуры, теплота испарения, особенности жидкого гелия (He-4, He-3, сверхтекучесть).	29	12	2	10	17	17	2	15	0																		
P3	Методы получения сверхнизких температур (температур криогенного диапазона). Современные методы получения температур ниже 1 К: адиабатическое размагничивание парамагнитной соли, растворение He-3 в He-4, адиабатическая кристаллизация He-3.	10	4		4	6	6	0	6	0																		
P4	Сосуды для хранения криогенных жидкостей. Криостаты для работы с ними и криокулеры. Конструкции, способы уменьшения тепловых нагрузок. Устройства для переливания криожидкостей (сифоны) и измерение их уровня.	11	4		4	7	7	0	7	0																		
P5	Термометрия в криогенике. Первичные и вторичные термометры.	11	4		4	7	7	0	7	0																		
P6	Физическая кинетика фазовых переходов первого рода. Фазовые переходы жидкость – газ.	38	17	5	12	21	15	5	10	0														6	1			
	<b>Всего (час.)</b> , без учета промежуточной аттестации:	<b>126</b>	<b>51</b>	<b>9</b>	<b>42</b>	<b>0</b>	<b>75</b>	<b>63</b>	<b>9</b>	<b>54</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	<b>Всего по дисциплине (час.):</b>	<b>144</b>	<b>51</b>				<b>93</b>																					
В т.ч. промежуточная аттестация																							<b>0</b>	<b>18</b>	<b>0</b>	<b>0</b>		

\*Суммарный объем в часах на мероприятие **44**

указывается в строке «Всего (час.)» без учета промежуточной аттестации

## 5. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ, САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

### 4.5. Лабораторные работы

Не предусмотрено.

### 4.6. Практические занятия

Код раздела, темы	Номер занятия	Тема занятия	Время на проведение занятия (час.)
1	1	Расчет основных параметров для различных методов охлаждения: детандирования, дросселирования, выхлопа. Изображение процессов охлаждения на диаграмме температура-энтропия.	2
1	2	Основы термодинамического расчета криогенных систем. Метод энергетического баланса для расчета криогенных систем.	2
1	3	Уравнения энергетического баланса для отдельных ступеней охлаждения.	2
1	4	Воздухоразделение, продукты воздухоразделения, сосуды для хранения жидких криоагентов (криогенная станция).	2
2	5	Азот. Свойства газообразного и жидкого азота. Способы получения жидкого азота.	2
2	6	Применение водорода в криогенной технике. Основные промышленные методы его получения. Орто- и парамодификации водорода. Влияние орто- и параконверсий на свойства водорода как криогенного хладагента. Дейтерий и тритий как криогенные жидкости.	2
2	7	Физические свойства жидких He-4 и He-3. Характер изменения физических свойств He-4 в области $\lambda$ -перехода. Влияние давления на $\lambda$ -переход. Гелий-II.(He-II). Физические свойства. Сверхтекучесть He-II. Элементарные возбуждения в сверхтекучем гелии. Ротонный спектр. Критерий сверхтекучести Ландау.	2
2	8	Основные положения двухжидкостной модели, ее экспериментальные подтверждения. Особенности переноса тепла в He-II. Проявление этих особенностей в физическом эксперименте. Роль сверхтекучей и нормальной компонент в переносе тепла.	2
2	9	Вращение сверхтекучей жидкости. Квантование циркуляции. Образование вихрей в сверхтекучем гелии. Вихревые нити во вращающемся He-II. Критическая скорость образования вихря. Вихревая структура вращающегося He-II.	2
3	10	He-3 как ферми-жидкость. Сверхтекучесть He-3, основные экспериментальные результаты. Фазовая диаграмма сверхтекучих фаз He-3. Сверхтекучий He-3 в магнитном поле. Методы получения сверхнизких температур. Растворение He-3 в He-4.	2
3	11	Гелиевый криостат на основе криокулера, с циклом Гиффорда-Мак-Магона (лаборатории КФНТ)	2
4	12	Сосуды для хранения криогенных жидкостей. Криостаты для работы с ними и криокулеры. (криогенная станция).	2
4	13	Конструкции, способы уменьшения тепловых нагрузок.	2

		Устройства для переливания криожидкостей (сифоны) и измерение их уровня. (криогенная станция).	
5	14	Методы и приборы для измерения температуры в интервале 13.81-273.16 К.	2
5	15	Методы и приборы для измерения температуры в интервале 5.2-13.81 К .	2
6	16	Процесс образования зародышей. Термодинамика процесса. Применение теории зарождения новой фазы Фольмера-Вебера-Френкеля.	2
6	17	Применение теории зарождения Беккера-Деринга-Зельдовича. Уравнение Фоккера-Планка. Общий вывод уравнения Фоккера-Планка.	2
6	18	Решение уравнения Фоккера-Планка для поиска функции распределения зародышей по размерам.	2
6	19	Нестационарное и гетерогенное зарождение.	2
6	20	Зависимость скорости зародышеобразования от пересыщения. Полная система уравнений, определяющих кинетику роста новой фазы, в теории Лифшица-Слезова.	2
6	21	Решение задач по изученным темам курса	2
<b>Всего:</b>			<b>42</b>

#### 4.3. Примерная тематика самостоятельной работы

##### 4.4.5. Примерный перечень тем домашних работ

Не предусмотрено.

##### 4.4.6. Примерный перечень тем графических работ

Не предусмотрено.

##### 4.4.7. Примерный перечень тем рефератов (эссе, творческих работ)

Не предусмотрено.

##### 4.4.8. Примерная тематика индивидуальных или групповых проектов

Не предусмотрено.

##### 4.3.9. Примерный перечень тем расчетных работ (программных продуктов)

Не предусмотрено.

##### 4.3.10. Примерный перечень тем расчетно-графических работ

Не предусмотрено.

##### 4.3.11. Примерный перечень тем курсовых проектов (курсовых работ)

Не предусмотрено.

##### 4.3.12. Примерная тематика контрольных работ

Контрольная работа №1.

Расчет основных параметров для следующих методов охлаждения: детандирования, дросселирования, выхлопа. Изображение процессов охлаждения на диаграмме температура-энтропия .

Контрольная работа №2.

Нахождение стационарной функции распределения зародышей по размерам в процессе фазовых переходов 1 рода.

##### 4.3.9. Примерная тематика коллоквиумов

Не предусмотрено.

## 6. СООТНОШЕНИЕ РАЗДЕЛОВ, ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ПРИМЕНЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБУЧЕНИЯ

Код раздела, темы	Активные методы обучения	Дистанционные
-------------------	--------------------------	---------------

дисциплины							образовательные технологии и электронное обучение					
	Проектная работа	Кейс-анализ	Деловые игры	Проблемное обучение	Командная работа	Другие (указать, какие)	Сетевые учебные курсы	Виртуальные практикумы и тренажеры	Вебинары и видеоконференции	Асинхронные web-конференции и семинары	Совместная работа и разработка контента	Другие (указать, какие)
1				*			*					
2				*	*		*					
3-6				*			*					

## 6. ПРОЦЕДУРЫ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ (Приложение 1)

## 7. ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ НЕЗАВИСИМОГО ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ (Приложение 2)

## 8. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (Приложение 3)

## 9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 9.1.Рекомендуемая литература

#### 9.1.1.Основная литература

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: учеб. Пособие. Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2010. 368 с.
2. Базаров И.П. Термодинамика. Учебник. Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2010. 384 с.
3. П. И. Дячек . Холодильные машины и установки: Учеб. пособие. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. 424 с.
4. Архаров А.М., Кунис И.Д. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов. М.: Изд-во МБТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 252 с

#### 9.1.2.Дополнительная литература

- 1 Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. Молекулярная физика и термодинамика. М.:Астрель-АСТ, 2005. 208 с.
- 2 СивухинД. В. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит. 2006. 544 с.
- 3 Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика в 10 томах. Том 10. Е.М.Лифшиц Л.П.Питаевский Физическая кинетика. М.: Физматлит, 2002. 535 с.
- 4 Куинн Т. Температура.- М.: Мир, 1985. 447 с.
- 5 А. М. Архаров, И. В. Марфенина, Е. И. Микулина. Криогенные системы: Учебник для вузов. Т. 1. Основы теории и расчета / - 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1988. — 463 с.
- 6 Орлова Н.П., Погорелова О.Ф., Улыбин С.А. Низкотемпературная термометрия. М.: Энергоатомиздат, 1987. 279 с.
- 7 Гинзбург В.Л. О науке, о себе и о других. М.: Физматлит, 1997. 272 с. (гл. 6 и 7 в этой книге посвящены сверхпроводимости и сверхтекучести).
- 8 Гинзбург В.Л. О сверхпроводимости и сверхтекучести. Автобиография. М.: Физматлит, 2006.

## **9.2.Методические разработки**

Инновационные технологии получения технических газов. Теоретические основы современных методов разделения воздуха.

[http://study.urfu.ru/view/aid\\_view.aspx?AidId=12153](http://study.urfu.ru/view/aid_view.aspx?AidId=12153)

## **9.3 Программное обеспечение**

1. Программа управления терморегулятором криогенных температур в гелиевом криостате.
2. Программа, обеспечивающая работу блока измерения импеданса RCL, в режимах измерителя и анализатора импеданса, автоматическое сканирование в заданном диапазоне частот и возможность записи результатов измерений в память компьютера.
3. Программное обеспечение, в том числе обеспечивающее работу оборудования, для научных исследований кафедры физики низких температур.
4. Операционные системы Windows XP, Vista, Linux, Windows 7, MS "Office". Компиляторы языков программирования.

## **9.4. Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

Электронная библиотека УрФУ [opac.urfu.ru](http://opac.urfu.ru)

Портал информационно-образовательных ресурсов УрФУ [study.urfu.ru](http://study.urfu.ru)

Зональная научная библиотека УрФУ [lib.urfu.ru](http://lib.urfu.ru)

Электронные ресурсы образовательного портала [edu.ru](http://edu.ru).

## **9.5.Электронные образовательные ресурсы**

1. Инновационные технологии получения технических газов. Теоретические основы современных методов разделения воздуха. [http://study.urfu.ru/view/aid\\_view.aspx?AidId=12153](http://study.urfu.ru/view/aid_view.aspx?AidId=12153)
2. Новые функциональные материалы и методы их исследования в системе «Гиперметод». [http://learn.urfu.ru/lesson/list/index/subject\\_id/2827/switcher/my](http://learn.urfu.ru/lesson/list/index/subject_id/2827/switcher/my)

## **10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Сведения об оснащённости дисциплины специализированным и лабораторным оборудованием**

- 1 Аудитории, оснащенные мультимедийным оборудованием на 24 места (317, 338, 102).
- 2 Компьютерный класс на 15 мест (334).
- 3 Лаборатории. Учебно-производственная лаборатория «Криогенная станция», лаборатория физики низких температур.
- 4 Автономный криостат замкнутого цикла с двухступенчатым криогенным рефрижератором DE-204SL, основанным на цикле Гиффорда-МакМагона.
- 5 Лабораторное оснащение, приборы, материалы - оборудование для научных исследований кафедры физики низких температур.]



**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**  
**к рабочей программе дисциплины**

**6. ПРОЦЕДУРЫ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**6.1. Весовой коэффициент значимости дисциплины –1**

**6.2. Процедуры текущей и промежуточной аттестации по дисциплине**

<b>1. Лекции: коэффициент значимости совокупных результатов лекционных занятий – 0.5</b>		
<b>Текущая аттестация на лекциях</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
Посещение лекций	6, 1-5	10
Мини-контроль по темам лекций	6, 1-5	70
Тест по материалам лекций	6, 5	20
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по лекциям – k тек.лек.=0.6</b>		
<b>Промежуточная аттестация по лекциям – экзамен</b>		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по лекциям – k пром.лек.=0.4</b>		
<b>2. Практические занятия: коэффициент значимости совокупных результатов практических занятий – 0.5</b>		
<b>Текущая аттестация на практических занятиях</b>	<b>Сроки – семестр, учебная неделя</b>	<b>Максимальная оценка в баллах</b>
Посещение практических занятий	6,1-18	21
Выполнение контрольной работы №1 на занятии	6, 4	39
Выполнение контрольной работы №2 на занятии	6, 16	40
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по практическим/семинарским занятиям – 1</b>		
<b>Промежуточная аттестация по практическим/семинарским занятиям – не предусмотрена</b>		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов промежуточной аттестации по практическим/семинарским занятиям - 0</b>		
<b>3. Лабораторные занятия: не предусмотрены</b>		
<b>Весовой коэффициент значимости результатов текущей аттестации по лабораторным занятиям – 0</b>		

**6.3. Процедуры текущей и промежуточной аттестации курсовой работы/проекта**  
Не предусмотрено.

**6.4. Коэффициент значимости семестровых результатов освоения дисциплины**

<b>Порядковый номер семестра по учебному плану, в котором осваивается дисциплина</b>	<b>Коэффициент значимости результатов освоения дисциплины в семестре</b>
Семестр 6	1

## **7. ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ В РАМКАХ НЕЗАВИСИМОГО ТЕСТОВОГО КОНТРОЛЯ**

*Дисциплина и ее аналоги, по которым возможно тестирование, отсутствуют на сайте ФЭПО <http://fepo.i-exam.ru>.*

*Дисциплина и ее аналоги, по которым возможно тестирование, отсутствуют на сайте Интернет-тренажеры <http://training.i-exam.ru>.*

*Дисциплина и ее аналоги, по которым возможно тестирование, отсутствуют на портале СМУДС УрФУ.*

*В связи с отсутствием Дисциплины и ее аналогов, по которым возможно тестирование, на сайтах ФЭПО, Интернет-тренажеры и портале СМУДС УрФУ, тестирование в рамках НТК не проводится.*

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**  
**к рабочей программе дисциплины**

**8. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**8.1. КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЬНО-ОЦЕНОЧНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ В РАМКАХ БРС**

В рамках БРС применяются утвержденные на кафедре критерии оценивания достижений студентов по каждому контрольно-оценочному мероприятию. Система критериев оценивания, как и при проведении промежуточной аттестации по модулю, опирается на три уровня освоения компонентов компетенций: пороговый, повышенный, высокий.

<b>Компоненты компетенций</b>	<b>Признаки уровня освоения компонентов компетенций</b>		
	<b>пороговый</b>	<b>повышенный</b>	<b>высокий</b>
<b>Знания</b>	Студент демонстрирует знание-знакомство, знание-копию: узнает объекты, явления и понятия, находит в них различия, проявляет знание источников получения информации, может осуществлять самостоятельно репродуктивные действия над знаниями путем самостоятельного воспроизведения и применения информации.	Студент демонстрирует аналитические знания: уверенно воспроизводит и понимает полученные знания, относит их к той или иной классификационной группе, самостоятельно систематизирует их, устанавливает взаимосвязи между ними, продуктивно применяет в знакомых ситуациях.	Студент может самостоятельно извлекать новые знания из окружающего мира, творчески их использовать для принятия решений в новых и нестандартных ситуациях.
<b>Умения</b>	Студент умеет корректно выполнять предписанные действия по инструкции, алгоритму в известной ситуации, самостоятельно выполняет действия по решению типовых задач, требующих выбора из числа известных методов, в предсказуемо изменяющейся ситуации	Студент умеет самостоятельно выполнять действия (приемы, операции) по решению нестандартных задач, требующих выбора на основе комбинации известных методов, в непредсказуемо изменяющейся ситуации	Студент умеет самостоятельно выполнять действия, связанные с решением исследовательских задач, демонстрирует творческое использование умений (технологий)
<b>Личностные качества</b>	Студент имеет низкую мотивацию учебной деятельности, проявляет безразличное, безответственное отношение к учебе, порученному делу	Студент имеет выраженную мотивацию учебной деятельности, демонстрирует позитивное отношение к обучению и будущей трудовой деятельности, проявляет активность.	Студент имеет развитую мотивацию учебной и трудовой деятельности, проявляет настойчивость и увлеченность, трудолюбие,

			самостоятельность, творческий подход.
--	--	--	--

## **8.2. КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЗАВИСИМОГО ТЕСТОВОГО КОТРОЛЯ**

– НТК не проводится

## **8.3. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

### **8.3.1. Примерные задания для проведения мини-контрольных в рамках учебных занятий**

Сравнение эффектов понижения температуры в различных процессах охлаждения. За какое время указанная доля ортоводорода (в мольных долях) перейдет в парамодификацию, если ортопараконверсия происходит с или без катализатора, постоянная скорости реакции задана. В начальный момент времени при комнатной температуре ортоводород составляет 75% , а параводород 25%.

### **8.3.2. Примерные контрольные задачи в рамках учебных занятий**

Найти стационарную функцию распределения зародышей по размерам в процессе выпадения вещества из перенасыщенного раствора.

### **8.3.3. Примерные контрольные кейсы**

Не предусмотрено.

### **8.3.4. Перечень примерных вопросов для зачета**

Не предусмотрено.

### **8.3.5. Перечень примерных вопросов для экзамена**

1. Температура и энтропия. Фазовые диаграммы. Газ и пар. Тройная точка. Критическая температура. Общие принципы охлаждения. Закон Нернста.
2. Холодильные процессы и циклы. Коэффициент охлаждения. Методы ожижения газов (поршневой и турбодетандер, дросселирование, положительный и отрицательный эффект Джоуля- Томсона, температура инверсии, выхлоп).
3. Термодинамические особенности процесса охлаждения в низкотемпературной области. Холодильные термодинамические циклы. Холодопроизводительность, холодильный коэффициент, термодинамический КПД.
4. Изотермическое сжатие реального газа как составная часть криогенного цикла. Компрессоры. Процесс дросселирования идеального и реального газа. Изображение процесса на диаграмме температура-энтропия.
5. Процесс расширения идеального и реального газа при условии постоянства внутренней энергии. Равновесное адиабатическое расширение газа с совершением внешней работы; сравнительная характеристика термодинамической эффективности этого процесса по отношению к процессу дросселирования.
6. Классические схемы криогенных рефрижераторов и ожижителей. Криогенное разделение газовых смесей. Принципы осуществления, основные технические характеристики и области применения.
7. Принципы получения низких температур. Принципы работы воздухоразделительной установки.
8. Физические свойства жидких He-4 и He-3.

9. Гелий-II.(He-II). Физические свойства. Сверхтекучесть He-II. Течение He-II в капиллярах и тонких пленках.
10. Механокалориметрический и термомеханический эффекты. Эффект "фонтанирования".
11. Распространение акустических колебаний в He-II. Первый, второй и четвертый звук.
12. Конденсация Бозе-Эйнштейна и сверхтекучесть гелия. Квантовая природа явления сверхтекучести.
13. Вращение сверхтекучей жидкости. Квантование циркуляции. Образование вихрей в сверхтекучем гелии
14. Принципы работы криостатов на He-3. Рефрижераторы растворения. Физические основы функционирования.
15. Охлаждение по методу Померанчука. Физические основы метода и его экспериментальная реализация.
16. Термометрия в криогенике. Первичные и вторичные термометры
17. Низкотемпературная термометрия. Температурные зависимости сопротивления металлов и полупроводников. Датчики температуры различных типов (азотные и гелиевые температуры).
18. Методы и приборы для измерения температуры в интервале 5.2-13.81К. Государственный первичный эталон в этом интервале
19. Термометры сопротивления на основе полупроводников. Особенности конструкции и основные эксплуатационные характеристики.
20. Фазовые переходы 1 и 2 рода. Определение. Особенности. Основные понятия термодинамики и кинетики фазовых переходов. Фазовые переходы жидкость – газ и газ – жидкость. Критические явления.
21. Метастабильные состояния системы. Бинодаль. Спинодаль. Устойчивость метастабильного состояния.
22. Процесс образования зародышей. Термодинамика процесса. Теория зарождения новой фазы Фольмера- Вебера-Френкеля.
23. Теория зарождения Беккера-Деринга-Зельдовича.
24. Ур-е Фоккера-Планка. Общий вывод уравнения Фоккера-Планка. Решение уравнения. Условия применимости.
25. Кинетика роста новой фазы. Теория Лифшица-Слёзова. Зависимость скорости зародышеобразования от пересыщения.
26. Полная система уравнений, определяющих кинетику фазового перехода, в теории Лифшица-Слёзова.

### **8.3.6. Ресурсы АПИМ УрФУ, СКУД УрФУ для проведения тестового контроля в рамках текущей и промежуточной аттестации**

Не предусмотрено

### **8.3.7. Ресурсы ФЭПО для проведения независимого тестового контроля**

Не используются

### **8.3.8. Интернет-тренажеры**

Не используются

### **8.3.9.**

Тесты в системе «Гиперметод».

[http://learn.urfu.ru/lesson/list/index/subject\\_id/2827/switcher/my](http://learn.urfu.ru/lesson/list/index/subject_id/2827/switcher/my)