

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО НТС ЛАПЛАЗ

Протокол № 3

от 30.08.2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 03.04.01 Прикладные математика и физика  
[2] 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
1	2-3	72- 108	32	32	0	8-44	0	3
2	4	144	30	30	30	18	0	Э
Итого	6-7	216- 252	62	62	30	30	26-62	0

## АННОТАЦИЯ

В курсе изучаются современные понятия, законы, теории, экспериментальные методы и результаты измерений в области физики взаимодействия излучения оптического диапазона с веществом в конденсированном состоянии. Рассмотрены вопросы взаимодействия классических электромагнитных волн и квантовых частиц - фотонов с твердыми аморфными телами, кристаллами, жидкостями, плазмой и сверхплотными газами

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Ознакомить студентов с современными понятиями, законами, теориями, экспериментальными методами и результатами измерений в области физики взаимодействия излучения оптического диапазона с веществом в конденсированном состоянии.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина логически и содержательно-методически связана со следующими дисциплинами: физика твердого тела, взаимодействие излучения с веществом, физические основы технологий обработки поверхности, введение в проблемы синхротронного излучения, методы исследования конденсированных сред и наноструктур с использованием синхротронного излучения, нейтронные методы исследования в физике конденсированного состояния, основы ядерных технологий, низкотемпературная техника в физическом эксперименте, физика сильнокоррелированных систем, полупроводниковые квантовые генераторы.

В курсе даются сведения по физике твёрдого тела, необходимые в деятельности. С точки зрения, прежде всего, экспериментальной физики. Основное внимание обращается на экспериментальные методы исследования и измерения. Овладение данной дисциплиной необходимо выпускникам магистерской программы «Физика твёрдого тела и фотоника» профиля подготовки «Физика конденсированного состояния вещества» для следующих областей профессиональной деятельности по исследованию и разработке:

установок и систем в области физики конденсированного состояния вещества; новых полупроводниковых приборов на основе полупроводниковых гетероструктур;

структурных, спектроскопических и магнитных свойств твердых тел; методов повышения безопасности установок, материалов и технологий; лазерных установок и технологий, обладающих высокой эффективностью, безопасностью и защищенностью.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции ОПК-1 [2] – Способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественно-научную сущность	Код и наименование индикатора достижения компетенции 3-ОПК-1 [2] – Знать современное состояние развития исследований и разработок приборов и систем, технологий производства оптических сред, материалов и устройств фотоники и оптоинформатики
---	--

проблемы, формулировать задачи, определять пути их решения и оценивать эффективность выбора и методов правовой защиты результатов интеллектуальной деятельности с учетом специфики исследований и разработки приборов и систем, технологий производства оптических сред, материалов и устройств фотоники и оптоинформатики	У-ОПК-1 [2] – Уметь выявлять естественнонаучную сущность проблемы, формулировать задачи, определять пути их решения в области фотоники и оптоинформатики В-ОПК-1 [2] – Владеть: приемами оценки эффективности выбранного решения с учетом специфики исследований и разработки приборов и систем, технологий производства оптических сред, материалов и устройств фотоники и оптоинформатики
ОПК-3 [2] – Способен приобретать и использовать новые знания в своей предметной области на основе информационных систем и технологий, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач	З-ОПК-3 [2] – Знать основы информационных технологий У-ОПК-3 [2] – Уметь приобретать и использовать новые знания в своей предметной области; предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач В-ОПК-3 [2] – Владеть навыками решения профессиональных задач с использованием информационных систем и технологий

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

<b>Задача профессиональной деятельности (ЗПД)</b>	<b>Объект или область знания</b>	<b>Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)</b>	<b>Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции</b>
проектно-конструкторский			
анализ состояния научно-технической проблемы, технического задания и постановка цели и задач проектирования приборов и систем фотоники и оптоинформатики на основе подбора и изучения литературных и патентных источников; разработка функциональных и структурных схем приборов и систем фотоники и оптоинформатики и установление технических	существующие и разрабатываемые приборы и экспериментальные установки в области физики твердого тела и фотоники	ПК-5 [2] - способен проектировать и конструировать в соответствии с техническим заданием типовые оптические и оптоинформационные системы  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 26.003	З-ПК-5[2] - Знать: особенности и области применения оптических и оптоинформационных систем; правила оформления проектной и конструкторской документации ; У-ПК-5[2] - Уметь: анализировать технические требования, предъявляемые к разрабатываемым узлам, блокам и системам; проводить концептуальную и проектную проработку типовых систем, приборов, деталей и

<p>требований на отдельные блоки и элементы; проектирование и конструирование различных типов оптических и оптоинформационных систем, блоков и узлов с использованием средств компьютерного проектирования, проведение проектных расчетов и технико-экономическим обоснованием конструкторских решений; оценка технологичности конструкторских решений, разработка технологических процессов сборки и контроля элементов, устройств и систем; составление технической документации, включая инструкции по эксплуатации, программы испытаний, технические условия; участие в наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов.</p>			<p>узлов; представлять и оформлять результаты проектно-конструкторской деятельности ; В-ПК-5[2] - Владеть: навыками проектирования и конструирования типовых оптических и оптоинформационных системы</p>
<p>инновационный;</p>			
<p>сбор и анализ информационных источников и исходных данных для планирования и разработки исследовательских проектов; подготовка исходных данных для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе</p>	<p>научно-технические и организационные решения</p>	<p>ПК-5 [1] - Способен применять физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких</p>	<p>З-ПК-5[1] - Знать физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования, принципы экспертизы продукции для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации</p>

<p>экономического анализа; участие в разработке и реализации проектов исследовательской и инновационной направленности в команде исполнителей.</p>		<p>технологий</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 06.022</p>	<p>новых наукоемких технологий ; У-ПК-5[1] - Уметь применять физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких технологий; В-ПК-5[1] - Владеть навыками теоретического и экспериментального исследования, математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких технологий</p>
<p>педагогический</p>			
<p>проведение семинарских и лабораторных занятий со студентами по курсам из области физики конденсированного состояния вещества: физика твёрдого тела, физика полупроводников, наноструктур, низких температур, сверхпроводимости и взаимодействия излучения с веществом; проведение практикумов и лабораторных работ по учебным курсам, связанным с</p>	<p>занятия по профильным предметам в университете</p>	<p>ПК-22.1 [1] - Способен пользоваться основными теоретическими моделями физики конденсированного состояния вещества, экспериментальными методами исследования структурных и электронных свойств, современными достижениями физики полупроводников и гетероструктур</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 01.003</p>	<p>3-ПК-22.1[1] - знать основные теоретические модели физики конденсированного состояния вещества, современные достижения физики полупроводников и гетероструктур ; У-ПК-22.1[1] - уметь сформулировать теоретическую и математическую модель для задачи физики твердого тела; В-ПК-22.1[1] - владеть экспериментальными методами исследования структурных и электронных свойств</p>

<p>математическим моделированием в физике конденсированного состояния вещества; организация и проведение контрольных и самостоятельных работ, тестирований и других контрольных мероприятий по курсам из области физики конденсированного состояния вещества.</p>			
научно-исследовательский			
<p>проведение научных и аналитических исследований по отдельным разделам (этапам, заданиям) темы (проекта) в рамках предметной области по профилю специализации в соответствии с утвержденными планами и методиками исследований; участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных теоретических моделей, экспериментальных данных и компьютерных технологий; участие в проведении теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых</p>	<p>запланированные этапы исследования; результаты наблюдений и измерений; физические, математические и компьютерные модели явления; компьютерные программы и алгоритмы для научно-исследовательских и прикладных целей.</p>	<p>ПК-22.2 [1] - Способен ориентироваться в последних теоретических и экспериментальных достижениях физики конденсированного состояния, в возможностях современных пучковых, плазменных и лазерных технологий в применении к конкретным методам создания, обработки и исследования различных твердотельных материалов и наноструктур</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 06.022</p>	<p>З-ПК-22.2[1] - знать последние теоретические и экспериментальные достижения физики конденсированного состояния, возможности современных пучковых, плазменных и лазерных технологий в применении к конкретным методам создания, обработки и исследования различных твердотельных материалов и наноструктур; У-ПК-22.2[1] - уметь предложить схему эксперимента для обработки или исследования твердотельных материалов и наноструктур, и сформулировать соответствующую математическую модель; В-ПК-22.2[1] - владеть теоретическими моделями</p>

<p>процессов и явлений, в проведении аналитических исследований в предметной области по профилю специализации, выбор методов и подходов к решению поставленной научной проблемы, формулировка математической модели явления, аналитические и численные расчеты; участие в разработке новых алгоритмов и компьютерных программ для научно-исследовательских и прикладных целей.</p>			<p>взаимодействия излучения с веществом</p>
--	--	--	---

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практи. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>1 Семестр</i>						
1	Раздел 1	1-8	16/16/0		25	КИ-8	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ОПК-3, У-ОПК-3, В-ОПК-

							3, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, У-ПК-12.1, В-ПК-12.1, 3-ПК-12.2, У-ПК-12.2, 3-ПК-12.1, В-ПК-12.2, В-ПК-5, 3-ПК-5, У-ПК-5
2	Раздел 2	9-16	16/16/0		25	КИ-16	3-ОПК-1, В-ОПК-1, У-ОПК-1, 3-ОПК-3, У-ОПК-3, В-ОПК-3, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-

							ПК-5, 3-ПК- 12.1, У- ПК- 12.1, В- ПК- 12.1, 3-ПК- 12.2, У- ПК- 12.2, В- ПК- 12.2, 3-ПК- 5, У- ПК-5, В- ПК-5
	<i>Итого за 1 Семестр</i>		32/32/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 1 Семестр</b>				50	3	3- ОПК- 1, У- ОПК- 1, В- ОПК- 1, 3- ОПК- 3, У- ОПК- 3, В- ОПК- 3, 3-ПК- 5, У- ПК-5, В- ПК-5, 3-ПК- 5, У- ПК-5,

							В-ПК-5, 3-ПК-12.1, У-ПК-12.1, В-ПК-12.1, 3-ПК-12.2, У-ПК-12.2, В-ПК-12.2
	<i>2 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	16/16/16		25	КИ-8	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ОПК-3, У-ОПК-3, В-ОПК-3, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-12.1, У-

							ПК-12.1, В-ПК-12.1, 3-ПК-12.2, У-ПК-12.2, В-ПК-12.2
2	Часть 2	9-15	14/14/14		25	КИ-15	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ОПК-3, У-ОПК-3, В-ОПК-3, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-12.1, У-ПК-12.1, В-ПК-12.1, 3-ПК-

							12.2, У- ПК- 12.2, В- ПК- 12.2
	<i>Итого за 2 Семестр</i>		30/30/30		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 2 Семестр</b>				50	Э	3- ОПК- 1, У- ОПК- 1, В- ОПК- 1, 3- ОПК- 3, У- ОПК- 3, В- ОПК- 3, 3-ПК- 5, У- ПК-5, В- ПК-5, 3-ПК- 5, У- ПК-5, В- ПК-5, У- ПК- 12.2, В- ПК- 12.2, 3-ПК- 12.1, У- ПК- 12.1, В- ПК- 12.1,

							3-ПК-12.2
--	--	--	--	--	--	--	-----------

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
З	Зачет
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Неделя	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>1 Семестр</i>	32	32	0
<b>1-8</b>	<b>Раздел 1</b>	16	16	0
1	<b>Тема 1</b> Введение. Предмет экспериментальной физики твердого тела (ФТТ). Развитие основных представлений ФТТ. Роль ФТТ в развитии новейших областей техники, микроэлектроники и оптоэлектроники.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Тема 2</b> Кристаллические и аморфные (некристаллические) твердые тела. Трансляционная симметрия, элементарная ячейка. Решетка Браве. Сингонии.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
3	<b>Тема 3</b> Обратная решетка. Зона Бриллюэна. Индексы Миллера.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
4	<b>Тема 4</b> Дифракция рентгеновских лучей. Формула Вульфа-Брэгга. Уравнение Лауэ.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	<b>Тема 5</b> Экспериментальные методы исследования кристаллической структуры.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
6	<b>Тема 6</b> Силы связи в кристаллах. Энергия связи. Классификация твердых тел по типу связи.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
7	<b>Тема 7</b> Дефекты кристаллов. Точечные дефекты. Дислокации. Термодинамика дефектов.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0

8	<b>Тема 8</b> Диффузия в твердых телах. Механизм диффузии. Влияние температуры на диффузию. Основные законы диффузии. Распределение примесей диффундирующих в пластину. Методы измерения коэффициента диффузии.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
0		0	0	
<b>9-16</b>	<b>Раздел 2</b>	16	16	0
9	<b>Тема 9</b> Колебания решетки-фононы. Экспериментальные методы исследования. Неупругое рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов. Метод трех кристаллов.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
0		0	0	
10	<b>Тема 10</b> Модели колебаний линейных цепочек (одно - и двухатомных). Акустическая и оптическая ветви колебаний. Локальные колебания.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
0		0	0	
11	<b>Тема 11</b> Теплоемкость решетки. Дебаевская частота. Ангармонизм и тепловое расширение. Теплопроводность. Экспериментальные методы.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
0		0	0	
12	<b>Тема 12</b> Энергетический спектр кристаллов. Уравнение Шредингера и его анализ. Модель Кронига-Пенни. Энергетические зоны. Эффективная масса электронов. Понятие дырки. Экспериментальные методы определения эффективной массы. Метод циклотронного резонанса.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
0		0	0	
13	<b>Тема 13</b> Движение электрона во внешних полях. Приближение эффективной массы. Примесные атомы. Доноры и акцепторы. Экситоны. Энергетический спектр водородоподобных примесей и экситонов. Особенности энергетического спектра конкретных полупроводников - германия, кремния, соединений III-V, II-V, IV-VI.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
0		0	0	
14	<b>Тема 14</b> Распределение Ферми Дирака для электронов. Плотность состояний. Статистика электронов и дырок. Число носителей. Вырожденный электронный (дырочный) газ. Электронная теплоемкость.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
0		0	0	
15	<b>Тема 15</b> Электронейтральность. Уровень Ферми. Собственный и примесный полупроводник. Температурная зависимость концентрации носителей.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
0		0	0	
16	<b>Тема 16</b> Экспериментальные методы определения ширины запрещенной зоны и энергии ионизации примесей. Сильнолегированные полупроводники.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
0		0	0	
	<i>2 Семестр</i>	30	30	30
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	16	16	16
1	<b>Тема 1</b> Неравновесные электроны и дырки. Квазиуровень Ферми. Фотопроводимость. Рекомбинация носителей. Время жизни. Диффузия и дрейф носителей. Основные уравнения. Максвелловское время релаксации.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
0		0	0	

2	<b>Тема 2</b> Экспериментальные методы определения времени жизни, длины диффузии и подвижности неосновных носителей. Амбиполярный коэффициент диффузии, Фотомагнитный эффект.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
3	<b>Тема 3</b> Р-п переход. Область объемного заряда. Выпрямление. Вольтамперная характеристика. Фотодиод. Принцип работы транзистора.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
4	<b>Тема 4</b> Кинетическое уравнение. Электропроводность, время релаксации. Механизмы рассеяния. Температурная зависимость подвижности. Экспериментальные методы исследования.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
5	<b>Тема 5</b> Эффект Холла. Эффект Холла для смешанной проводимости. Квантовый эффект Холла. Экспериментальные методы измерения на постоянном и переменном токе. Определение концентрации носителей.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
6	<b>Тема 6</b> Сопротивление в магнитном поле. Осцилляции магнитосопротивления в квантовых магнитных полях. Эффект Шубникова-де-Гааза как метод исследования поверхности Ферми металлов, полупроводников.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
7	<b>Тема 7</b> Термоэлектрические явления. Термоэдс. Эффект Пельтье и Томсона. Термоохлаждение.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Тема 8</b> Электропроводность в сильных электрических полях. Отклонение от закона Ома. Подвижность и разогрев носителей. Доменная неустойчивость. Эффект Ганна. Генерация электромагнитных колебаний.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
9-15	<b>Часть 2</b>	14	14	14
9	<b>Тема 9</b> Ударная ионизация. Лавинный пробой. Лавинный и туннельный пробой р-п перехода. Стабилитрон и туннельный диод.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
10	<b>Тема 10</b> Оптические свойства твердых тел. Основные соотношения между оптическими характеристиками. Механизмы поглощения и излучения.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 12	<b>Тема 11</b> Поглощение свободными носителями. Межзонное (фундаментальное) поглощение и излучение. Частотная зависимость. Спектр. Экспериментальные методы исследования.	Всего аудиторных часов		
		4	4	4
		Онлайн		
		0	0	0
13	<b>Тема 12</b> Оптические переходы через примесные и экситонные состояния. Взаимодействие света с колебаниями решетки. Одно- и многофоновые процессы. Комбинационное	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0

	рассеяние. Экспериментальные методы.			
14	<b>Тема 13</b> Модуляционная спектроскопия. Экспериментальные методы. Определение энергетического положения критических точек в зоне Бриллюэна.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
15	<b>Тема 14</b> Диэлектрики и сегнетоэлектрики. Магнитные свойства твердых тел. Диамагнетизм, парамагнетизм. Ферромагнетики и антиферромагнетики. Сверхпроводимость. Новые высокотемпературные сверхпроводники.	Всего аудиторных часов		
		2	2	2
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

#### ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>2 Семестр</i>
1 - 2	<b>Вводная лекция и инструктаж по технике безопасности</b> Вводная лекция по оформлению лабораторных работ, содержанию отдельных лабораторных, эффектам и методам расчета, на которые надо обратить внимание, рекомендуемая литература. Инструктаж по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.
3 - 8	<b>Выполнение лабораторных работ</b> Работы выполняются в подгруппах по 2-3 человека по индивидуальному плану. Каждый студент должен выполнить определенное количество работ из следующего списка:  Ферромагнитный резонанс Эффект Холла Эффект Фарадея в магнитных пленках Твердотельный лазер на неодимовом стекле Полупроводниковый лазер на арсениде галлия Электронный парамагнитный резонанс
9 - 15	<b>Выполнение лабораторных работ</b> Выполнение лабораторных работ по индивидуальному

плану

## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>1 Семестр</i>
1 - 2	<b>Тема 1 - Введение</b> Достижения физики твёрдого тела. Конденсированное состояние вещества. Экспериментальные достижения. Кристаллическое и аморфное состояния. Кристаллизация. Сверхкритические жидкости.
3 - 4	<b>Тема 2 - Кристаллические решетки</b> Кристаллические решётки. Решётка Браве. Сингонии. Кубическая сингония. Решётка алмаза, графитовая плоскость, фуллерены и нанотрубки. Вектора трансляции, элементарная ячейка, базис. Плотность упаковки, координационные числа. Квазикристаллы. Структурные переходы.
5 - 6	<b>Тема 3 - Исследование кристаллов при помощи дифракции рентгеновского излучения</b> Кристаллические плоскости, индексы Миллера. Исследование кристаллов при помощи дифракции рентгеновского излучения. Формула Вульфа-Брэгга. Построение Лауэ. Обратная решётка.
7 - 8	<b>Тема 4 - Типы связи между атомами в твердом теле</b> Типы связи между атомами в кристаллах. Молекулярная связь, ковалентная, ионная. Потенциал "6-12" Леннарда-Джонса. Валентность атомов.
9 - 10	<b>Тема 5 - Дефекты кристаллической решетки</b> Моно- и поликристаллы. Дефекты кристаллической решётки. Точечные, линейные и плоские дефекты. Термодинамика дефектов. Тонкие плёнки.
11 - 12	<b>Тема 6 - Колебания атомов решетки</b> Колебания атомов решётки - фононы. Модель одномерной цепочки атомов. Двухатомная цепочка. Акустические и оптические ветви колебаний. Зоны Бриллюэна. Ангармонизм и тепловое расширение.
13 - 14	<b>Тема 7 - Теплоемкость диэлектрика</b> Теплоёмкость диэлектрика. Статистика фононов. Распределение Бозе-Эйнштейна. Модель Дебая. Температура Дебая. Модель Эйнштейна. Плотность состояний фононов. Экспериментальные данные. Особенности теплоёмкости при структурных превращениях.
15 - 16	Эффект Мёссбауэра. Энергия отдачи. Фактор Дебая-Валлера. Особенности экспериментального применения эффекта Мёссбауэра.
	<i>2 Семестр</i>
1	<b>Тема 1 - Свободный электронный газ</b> Свободный электронный газ. Распределение Ферми-Дирака. Энергия Ферми. Влияние температуры. Средняя тепловая скорость электрона. Численные оценки.

2	<p><b>Тема 2 - Плотность квантовых состояний</b>  Плотность состояний электронного газа. Зависимость уровня Ферми от температуры. Теплоёмкость электронного газа. Численные оценки.</p>
3	<p><b>Тема 3 - Закон Ома</b>  Закон Ома. Длина пробега электрона. Частота столкновений, время релаксации. Дрейфовая скорость. Влияние температуры и качества образца. Остаточное сопротивление. Численные оценки. Кинетическое уравнение.</p>
4	<p><b>Тема 4 - Внешние поля</b>  Явления в магнитном поле. Эффект Холла. Магнитосопротивление. Явления в переменном поле. Плазменная частота. Диэлектрическая проницаемость. Прозрачность металлов при высоких частотах. Скин-эффект. Численные оценки.</p>
5	<p><b>Тема 5 - Электроны в кристаллическом поле</b>  Электроны в кристаллическом поле. Теорема Блоха. Квантование квазиимпульса. Задача Кронига-Пенни. Приведенная зонная картина. Эффективная масса. Электроны, дырки. Экспериментальные факты.</p>
6	<p><b>Тема 6 - Поверхность Ферми</b>  Поверхность Ферми. Вид поверхности Ферми для некоторых металлов. Влияние валентности атома и типа решётки. Экспериментальные методы определения поверхности Ферми. Циклотронный резонанс. Циклотронная масса.</p>
7	<p><b>Тема 7 - Зонная теория</b>  Энергетические зоны для случаев полупроводника, диэлектрика, полуметалла. Положение уровня Ферми. Зона проводимости, валентная зона. Типичные значения ширины запрещённой зоны и эффективных масс. Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Плотность состояний. Закон действующих масс. Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике и зависимость от температуры. Численные оценки.</p>
8	<p><b>Промежуточный контроль</b>  Промежуточный контроль</p>
9	<p><b>Тема 8 - Собственные и несобственные полупроводники</b>  Собственные и несобственные полупроводники. Примесные уровни. Спектр водородоподобного атома. Влияние валентности примеси на тип легирования. Типичные концентрации легирующих примесей. Уравнение для уровня Ферми в примесном полупроводнике. График зависимости уровня Ферми от температуры. Температуры, при которой примесный полупроводник станет собственным. Явление компенсации.</p>
10	<p><b>Тема 9 - Диффузия носителей</b>  Диффузия носителей. Соотношение Эйнштейна между коэффициентом диффузии и подвижностью. Уравнение</p>

	непрерывности.
11	<b>Тема 10 - Неравновесные носители</b> Неравновесные носители. Переходы "зона-зона". Фундаментальный край поглощения. Темп генерации и темп рекомбинации. Тепловая генерация, оптическая генерация, оптическая рекомбинация. Безызлучательная рекомбинация. Рекомбинация через глубокие уровни. Типичные времена рекомбинации. Линейная и квадратичная рекомбинация. Инжекция носителей. Квазиуровни Ферми.
12	<b>Тема 11 - Контактные явления</b> Контактные явления. "р-п" переход. Диод Шоттки. Диффузия носителей и выравнивание уровня Ферми. Искривление зон. Обедненный слой в "р-п" переходе. Вольт-амперная характеристика диода. Численные оценки.
13	<b>Тема 12 - Термоэлектрические явления</b> Термоэлектрические явления. ТермоЭДС. Эффект Пельтье.
14	<b>Тема 13 - Сильные поля</b> Сильные поля. Отклонение от закона Ома. Ударная ионизация. "Горячие" электроны. Вольт-амперная характеристика S- и N-типа. Эффект Ганна. Численные оценки.
15	<b>Тема 14 - Современные полупроводниковые приборы</b> Современные полупроводниковые приборы. Гетероструктуры. Сверхрешётки. Потенциальный рельеф. Накопление заряда, искривление потенциала. Поверхностные уровни. Основные характеристики. Методы исследования.

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторские занятия и самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашнего задания, изучении литературы и прослушанного материала. Для того чтобы дать современное состояние экспериментальной физики конденсированного состояния вещества, предусмотрено широкое использование современных научных работ и публикаций по данной теме, посещение лабораторий НИЯУ МИФИ. Рекомендуется посещение студентами научных семинаров и конференций, в том числе, проводимых в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, а также в других московских университетах и институтах.

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)	Аттестационное мероприятие (КП 2)
ОПК-1	З-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
ОПК-3	З-ОПК-3	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ОПК-3	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ОПК-3	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-5	З-ПК-5	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-5	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-5	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-22.1	З-ПК-22.1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-22.1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-22.1	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-22.2	З-ПК-22.2	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-22.2	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-22.2	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-5	З-ПК-5	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-5	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-5	З, КИ-8, КИ-16	Э, КИ-8, КИ-15

### Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные
60-64			

			формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ Y91 Fundamentals of Semiconductors : Physics and Materials Properties, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010
2. ЭИ А47 Нейтронные методы в физике конденсированного состояния : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
3. ЭИ Б 91 Основы полупроводниковой электроники : учебное пособие, Москва: Физматлит, 2012
4. ЭИ Ш 18 Физика полупроводников : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2010
5. ЭИ Ф50 Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2014
6. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
7. 537 Ш18 Физика полупроводников : учебник, К. В. Шалимова , Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2010
8. 539.3/.6 Д26 Свойства дефектов и их ансамблей, радиационная физика твердого тела : учебное пособие для вузов, Н. Н. Дегтяренко, Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 53 С12 Курс общей физики Кн.5 Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц, , Москва: Астрель, АСТ, 2007
2. 53 С12 Курс общей физики Кн.5 Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц, , Москва: Наука, 1998

3. 539.2 А98 Физика твердого тела Т.1 , , М.: Мир, 1979
4. 539.2 А98 Физика твердого тела Т.2 , , М.: Мир, 1979
5. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, , : МИФИ, 2007
6. 539.2 Б33 Одномерные модели ФТТ. Модель Кронига-Пенни : Учеб. пособие, А. М. Башаров, А. И. Маймистов, В. А. Гридин, М.: МИФИ, 1988
7. 539.2 Г95 Физика твердого тела : учеб. пособие для техн. ун-тов, А.Г. Гуревич, СПб: Невский диалект; БХВ-Петербург, 2004
8. 537 Б81 Физика полупроводников : Учеб. пособие для вузов, Бонч-Бруевич В.Л.,Калашников С.Г., М.: Наука, 1977
9. 537 Б81 Физика полупроводников : Учеб. пособие для вузов, Бонч-Бруевич В.Л.,Калашников С.Г., М.: Наука, 1990
10. 537 3-47 Физика полупроводников : , Зеегер К.;Пер.с англ., М.: Мир, 1977
11. 621.3 С49 Основы материаловедения и технологии полупроводников : Учеб. пособие для вузов, И. А. Случинская, Москва: МИФИ, 2002
12. ЭИ Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : , И. Н. Николаев, А. И. Маймистов, Москва: МИФИ, 2009
13. 621.38 С72 Физические основы твердотельной электроники : учебное пособие для вузов, О. П. Спиридонов, Москва: Высшая школа, 2008
14. 539.2 Ф50 Физика твердого тела : Учеб. пособие для вузов, ред. : И. К. Верещагин, М.: Высш. школа, 2001
15. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Ч. Киттель , М.: МедиаСтар, 2006

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

1. Freemat (<http://freemat.sourceforge.net>)
2. Компилятор Fortran (<http://gcc.gnu.org/wiki/GFortran>)

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. сайт кафедры №70 НИЯУ МИФИ (<http://kaf70.mephi.ru/>)
2. сайт Американского физического общества (<http://www.aps.org>)
3. сайт издательства Elsevier ()
4. сайт издательства Elsevier (<https://elsevier.com/>)
5. сайт журнала "Успехи физических наук" (УФН) (<https://www.ufn.ru/>)

<https://online.mephi.ru/>

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Следует учесть тот факт, что этот курс в первую очередь является фундаментом для изучения дальнейших специализирующих курсов. В связи с этим, необходимо с особым вниманием отнестись к изучению разделов, посвященных физике полупроводников (зонная теория твердых тел, собственные полупроводники, проводимость в собственных полупроводниках, примесные полупроводники – донорные и акцепторные полупроводники, равновесные концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках, плотность состояний (уровней) в зоне, уровень Ферми в полупроводниках и в металлах, закон действующих масс, зависимость концентрации свободных носителей и положения уровня Ферми полупроводниках от температуры, электропроводность невырожденного газа, подвижность носителей заряда и ее зависимость от температуры, собственная и примесная проводимости полупроводников и их температурные зависимости, контактные явления, р-п переход).

При подготовке к лабораторным работам необходимо проработать соответствующее учебное пособие и теоретический материал, понять суть явления и схему установки, задачи каждого элемента установки, порядки величин и основные расчетные формулы.

Работа состоит из допуска (ответа на вопросы по содержанию прочитанного практикума, теории эффекта и схеме установки), выполнения лабораторной работы и защиты отчета с полученными результатами.

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Следует учесть тот факт, что этот курс в первую очередь является фундаментом для изучения дальнейших специализирующих курсов. В связи с этим, необходимо с особым вниманием отнестись к изучению разделов, посвященных физике полупроводников (зонная теория твердых тел, собственные полупроводники, проводимость в собственных полупроводниках, примесные полупроводники – донорные и акцепторные полупроводники, равновесные концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках, плотность состояний (уровней) в зоне, уровень Ферми в полупроводниках и в металлах, закон действующих масс, зависимость концентрации свободных носителей и положения уровня Ферми полупроводниках от температуры, электропроводность невырожденного газа, подвижность носителей заряда и ее зависимость от температуры, собственная и примесная проводимости полупроводников и их температурные зависимости, контактные явления, р-п переход).

Порядок выполнения лабораторных работ и конкретное распределение студентов по подгруппам определяются с учётом тематики и профиля НИР студентов.

Перед началом каждой лабораторной работы проводится теоретический допуск, проверяется знакомство с теоретическим материалов и соответствующим учебным пособием,

студентов просят объяснить понять суть явления и схему установки, задачи каждого элемента установки, проверяется ориентация в порядках величин и знание основных расчетных формул.

Результаты выполнения работы необходимо оформить в виде отчёта и защитить, для чего ответить на дополнительные вопросы.

Автор(ы):

Карцев Петр Федорович, к.ф.-м.н.

Митягин Юрий Алексеевич, к.ф.-м.н., с.н.с.