

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО НТС ИНТЭЛ

Протокол № 2

от 26.04.2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

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
6	4-5	144- 180	30	45	0	24-51	0	Э
7	4	144	32	48	0	28	0	Э
8	3	108	24	24	0	24-33	0	Э
Итого	11-12	396- 432	86	117	0	0 76- 112	0	

## АННОТАЦИЯ

Курс является одним из центральных в обучении бакалавра по профилям, связанным с физикой твердого тела. Даются современные представления о конденсированном состоянии вещества, теоретические модели явлений, методы исследования, применение твердотельных эффектов в основных методах и достижениях экспериментальной физики.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Учебные задачи курса – показать многообразие физических явлений, протекающих в конденсированной фазе вещества. Научить оценивать характерные энергии, длины, времена релаксации различных физических взаимодействий в веществе, познакомить с основными подсистемами кристаллического состояния – решеткой Браве, фононной и электронной подсистемами. Дать ориентацию в различных экспериментальных методиках и теоретических описаниях, исследующих твердое тело.

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

Дисциплина читается на старших курсах. Ожидается, что студент уже освоил курсы общей физики, высшей математики, ТФКП, изучил или начал изучение квантовой механики и статистической физики.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

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

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
математическое моделирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения на базе стандартных пакетов	электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, математические модели	ПК-1 [1] - Способен применять простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники	З-ПК-1[1] - Знание физических и математических моделей типовых приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники. ;

<p>автоматизированного проектирования; участие в планировании и проведении экспериментов по заданной методике, обработка результатов с применением современных информационных технологий и технических средств; анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования; организация защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятий</p>		<p>различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>У-ПК-1[1] - Умение применять физические и математические модели устройств электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения; В-ПК-1[1] - Владение стандартными программными средствами компьютерного моделирования устройств и установок электроники и нанoeлектроники</p>
<p>проектно-конструкторский</p>			
<p>проведение технико-экономического обоснования проектов; сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения; расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования; разработка проектной и</p>	<p>электронные приборы, устройства, установки</p>	<p>ПК-5 [1] - Способен выполнять расчет и проектирование отдельных узлов или элементов электронных приборов, схем и устройств определенного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.007</p>	<p>З-ПК-5[1] - Знание теоретических основ конструирования приборов электроники и нанoeлектроники; У-ПК-5[1] - Умение применять средства автоматизации проектирования отдельных узлов и элементов ; В-ПК-5[1] - Владение методами конструирования и проектирования узлов и элементов схем аналоговой и цифровой электроники</p>

технической документации, оформление законченных проектно-конструкторских работ			
---	--	--	--

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной ответственности за научно-технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (В17)	<p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования чувства личной ответственности за достижение лидерства России в ведущих научно-технических секторах и фундаментальных исследованиях, обеспечивающих ее экономическое развитие и внешнюю безопасность, посредством контекстного обучения, обсуждения социальной и практической значимости результатов научных исследований и технологических разработок.</p> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования социальной ответственности ученого за результаты исследований и их последствия, развития исследовательских качеств посредством выполнения учебно-исследовательских заданий, ориентированных на изучение и проверку научных фактов, критический анализ публикаций в профессиональной области, вовлечения в реальные междисциплинарные научно-исследовательские проекты.</p>
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование коммуникативных навыков в области разработки и производства полупроводниковых изделий (В36)	<p>1.Использование воспитательного потенциала профильных дисциплин «Введение в специальность», «Введение в технику физического эксперимента», «Измерения в микро- и нанoeлектронике», «Информационные технологии в физических исследованиях», «Экспериментальная учебно-исследовательская работа» для: -</p>

		<p>формирования навыков безусловного выполнения всех норм безопасности на рабочем месте, соблюдении мер предосторожности при выполнении исследовательских и производственных задач с опасными веществами и на оборудовании полупроводниковой промышленности, а также в помещениях с высоким классом чистоты посредством привлечения действующих специалистов полупроводниковой промышленности к реализации учебных дисциплин и сопровождению проводимых у студентов практических работ в этих организациях, через выполнение студентами практических и лабораторных работ, в том числе с использованием современных САПРов для моделирования компонентной базы электроники, измерительного и технологического оборудования на кафедрах, лабораториях и центрах ИНТЭЛ;</p> <p>2.Использование воспитательного потенциала профильных дисциплин «Спецпрактикум по физике наносистем», «Спецпрактикум по нанотехнологиям», «Специальный практикум по физике наносистем», «Современные проблемы физики конденсированных сред (спецсеминар)», «Экспериментальные методы исследования наноструктур (спецсеминар)», для: - формирования профессиональной коммуникации в научной среде; - формирования разностороннего мышления и тренировки готовности к работе в профессиональной и социальной средах полупроводниковой промышленности - формирования умений осуществлять самоанализ, осмысливать собственные профессиональные и личностные возможности для саморазвития и самообразования, в целях постоянного соответствия требованиям к эффективным и прогрессивным специалистам для</p>
--	--	--

		разработок новых материалов и устройств по направлениям, связанным с СВЧ электроникой, микро- и нанопроцессорами, оптическими модуляторами и применением новых материалов в нанoeлектронных компонентах через организацию практикумов в организациях по разработке и производству полупроводниковых изделий, использование методов коллективных форм познавательной деятельности, ролевых заданий, командного выполнения учебных заданий и защиту их результатов.
--	--	---

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практик. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>6 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	16/24/0		25	КИ-8	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5
2	Часть 2	9-15	14/21/0		25	КИ-15	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-5,

							У-ПК-5, В-ПК-5
	<i>Итого за 6 Семестр</i>		30/45/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 6 Семестр</b>				50	Э	У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-5
	<i>7 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	16/24/0		25	КИ-8	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5
2	Часть 2	9-15	16/24/0		25	КИ-15	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		32/48/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 7 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-5, У-

							ПК-5, В- ПК-5
	<i>8 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	16/16/0		25	КИ-8	3-ПК-1, У- ПК-1, В- ПК-1, 3-ПК-5, У- ПК-5, В- ПК-5
2	Часть 2	9-12	8/8/0		25	КИ-12	3-ПК-1, У- ПК-1, В- ПК-1, 3-ПК-5, У- ПК-5, В- ПК-5
	<i>Итого за 8 Семестр</i>		24/24/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 8 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-1, У- ПК-1, В- ПК-1, 3-ПК-5, У- ПК-5, В- ПК-5

\* – 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:

<b>Обозначение</b>	<b>Полное наименование</b>
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недел и	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем. , час.	Лаб., час.
	<i>6 Семестр</i>	30	45	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	16	24	0
1 - 2	<b>Тема 1. Кристаллические структуры</b> Твердая фаза вещества. Корреляционная функция.. Основные определения, решетка Браве, элементарная ячейка, примитивная ячейка, ячейка Вигнера-Зейтца, базисные векторы. Оси симметрии. Пространственные группы, оси инверсии, классификация решеток. Примеры ОЦК и ГЦК решеток, координационные сферы, коэффициент заполнения. Сложные многоатомные структуры.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>Тема 2. Обратная решетка и условие дифракции</b> Определение, базисные векторы, объем, атомная плоскость, индексы Миллера. Условие дифракции. Построение Эвальда, Бриллюэна. Основные методы определения кристаллических структур из рентгеновского рассеяния (Лауэ, качаний, Дебай-Шерер). Лауэграммы и дебаеграммы.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	<b>Тема 3. Типы химических связей в твердых телах.</b> Классификация твердых тел по типу связей. Молекулярные кристаллы, их основные физические свойства. Потенциал Леннарда-Джонса, когезионная энергия, модуль всестороннего сжатия, коэффициент линейного расширения. Ионные кристаллы, их основные физические свойства. Потенциал Борна-Майера, постоянная Маделунга, модуль всестороннего сжатия. Ковалентные и полупроводниковые кристаллы, их основные физические свойства. Обзор металлических кристаллов, их основных физических свойств. Кристаллы с водородной связью, квантовые кристаллы.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	<b>Тема 4. Дефекты в кристаллах.</b> Фононы. Дефекты по Шоттки, по Френкелю. F – центры. Дефекты в ионных кристаллах. Дислокации. Поляроны и экситоны.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
<b>9-15</b>	<b>Часть 2</b>	14	21	0
9 - 10	<b>Тема 5. Фононы – колебания кристаллической решетки.</b> Гармоническое приближение для энергии кристалла. Спектры фононов. Основные свойства фононных мод. Оптические, акустические ветви, поляризация. Основные симметричные направления трехмерного кристалла. Расчеты фононных мод. Поперечные, продольные ветви колебаний. Способы определения фононных спектров из нейтронного рассеяния. Метод постоянного переданного импульса, постоянной переданной энергии. Взаимодействие с электромагнитной волной. Рассеяние	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0

	Бриллюэна, Рамана.			
11 - 12	<b>Тема 6. Теплоемкость кристаллической решетки. Модели Дебая и Эйнштейна</b> Модели Дебая и Эйнштейна для колебаний кристаллической решетки. Классическая модель теплоемкости. Теплоемкость и способы ее определения. Температурная зависимость. Фононная плотность состояний. Дебаевское приближение. Особенности Ван-Хова. Экспериментальное определение фононной плотности состояний.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
13	<b>Тема 7. Ангармонические явления.</b> Решеточная теплопроводность кристаллов. Температурная зависимость. Процессы переброса. Тепловое расширение. Параметры Грюнайзена.	Всего аудиторных часов		
		2	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
14 - 15	<b>Тема 8. Амплитуда рассеяния.</b> Взаимодействие излучения с периодически расположенными в пространстве центрами рассеяния. Атомный, структурный форм-факторы. Влияние разупорядочения. Фактор Дебая-Валлера. Температурная зависимость. Влияние геометрии.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
	<i>7 Семестр</i>	32	48	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	16	24	0
1 - 2	<b>Тема 1. Металлическая связь</b> Электронный газ и статистика Ферми-Дирака. Плотность электронных состояний. Уровень Ферми. Средняя энергия электронов. Электронный вклад в теплоемкость. Когезионная энергия металла. Обменное взаимодействие. Параметр $r_s$ .	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>Тема 2. Кинетические явления в металле</b> Модель Друде-Лоренца. Электропроводность, диэлектрическая проницаемость. Длина свободного пробега. Скин-эффект. Время релаксации и концентрация примесей. Закон Видемана-Франца. Фононы в металле.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	<b>Тема 3. Движение электрона в периодическом потенциале</b> Блоховские электроны. Зоны Бриллюэна. Понятие о дырке. Эффективная масса. Проводимость в зонной схеме. Металлы и диэлектрики. Приближение эффективной массы. Приближение сильной связи. Узельная схема и закон дисперсии в реальном веществе. Поверхность Ферми.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	<b>Тема 4. Эффект Холла в металле</b> Коэффициент Холла и магнитосопротивление. Угол Холла. Методы измерения и интерпретации экспериментальных данных.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
<b>9-15</b>	<b>Часть 2</b>	16	24	0
9 - 10	<b>Тема 5. Термоэлектрические эффекты</b> Кинетическое уравнение во внешних полях и градиенте температуры. Термоэлектрическая матрица. Эффект Зеебека. Эффект Пельтье. Эффект Томпсона. Вывод формулы для коэффициента термоЭДС, для эффекта Томпсона.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0

11 - 12	<b>Тема 6. Термодинамика полупроводников</b> Собственный полупроводник. Концентрация электронов и дырок. Закон действующих масс. Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике. Подвижность. Температурная зависимость. Примесный полупроводник. Температурная зависимость концентрации носителей. Примесная зона. Полуметаллические состояния.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 14	<b>Тема 7. Генерация и рекомбинация во внешних полях. Нелинейные эффекты</b> Равновесные и неравновесные носители заряда. Время жизни. Квазиуровень Ферми. Рекомбинация. Линейная и квадратичная. Генерация, диффузия и дрейф в примесном полупроводнике. Соотношения Эйнштейна. Полупроводники в сильных электрических полях. Рассеяние на фононах. ВАХ N-типа. Эффект Ганна. Ударная ионизация. Туннельный эффект. Излучательная рекомбинация. Безизлучательная рекомбинация. Кинетика носителей заряда. Время жизни. Глубокие примеси. Рекомбинация ОЖЕ. Диффузия и дрейф	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
15 - 16	<b>Тема 8. Контактные явления в полупроводниках</b> Контакт металл – полупроводник. Область обедненного заряда. Запорный слой. Антизапорный слой. Барьер Шоттки. Элементарные представления о p-n- переходе. Выпрямление. Вывод вольтамперной характеристики. Квазиуровень Ферми на границе раздела. Туннельные диоды. Гетеропереход.	Всего аудиторных часов		
		4	6	0
		Онлайн		
		0	0	0
	<i>8 Семестр</i>	24	24	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	16	16	0
1	<b>Тема 1. Поглощение в полупроводниках</b> Прямые, не прямые переходы. Экситонное поглощение. Примеси и свободные носители.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Тема 2. Фотопроводимость</b> Фотомагнитный эффект. Вывод формулы для ЭДС фотомагнитного эффекта. Фотомагнитомеханический эффект. Люминесценция. Флюоресценция. Механизмы люминесценции в полупроводниках	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
3	<b>Тема 3. Сегнетоэлектричество</b> Сегнетова соль. Физические основы. Применение	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
4	<b>Тема 4. Эффект Холла в полупроводниках</b> Коэффициент Холла и магнитосопротивление. Температурная и полевая зависимость. Методы измерения и интерпретации экспериментальных данных. Эффект Эттингсгаузена Особенности поведения магнитосопротивления для многозонных веществ.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	<b>Тема 5. Гетероструктуры на основе полупроводников</b> Уровни размерного квантования и двумерный электронный газ. Сверхрешетки. Квантовый эффект Холла	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
6	<b>Тема 6. Циклотронный резонанс</b>	Всего аудиторных часов		

	Циклотронный резонанс, эксперимент Азбеля-Каннера. Эффективная циклотронная масса. Получение информации о зонной структуре.	2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
7	<b>Тема 7. Эффект де-Гааза-ван-Альфена</b> Уровни Ландау. Условия проведения эксперимента. Построение поверхностей Ферми. Гигантские квантовые осцилляции поглощения ультразвука в металлах. Восстановление зонной структуры.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Тема 8. Гамма-резонансная спектроскопия</b> Эффект Мессбауэра, «мессбауэровские» изотопы. Интерпретация мессбауэровских спектров. Изомерный сдвиг. Квадрупольное расщепление, расщепление уровней ядра в магнитном поле соседних электронов. Фактор Лэмба-Мессбауэра. Влияние температуры на мессбауэровские спектры	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Тема 9. Аннигиляция позитронов в веществе</b> Аннигиляция позитронов в веществе – диагностика электронной структуры. Основы метода. Источники позитронов. Схема эксперимента для измерений двухквантовой аннигиляции позитронов. Интерпретация экспериментальных данных. Комптоновское рассеяние как альтернатива аннигиляционного метода.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-12	<b>Часть 2</b>	8	8	0
9	<b>Тема 10. Метод ядерного магнитного резонанса в физике твердого тела</b> Основы метода. Спектры ЯМР. Продольная и поперечная релаксация. Ядра, представляющие интерес для ЯМР-спектроскопии. Интерпретация спектров ЯМР: положение, интенсивность, дисперсия тонкой структуры. Сдвиг Найта	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
9	<b>Тема 11. Метод электронного парамагнитного резонанса</b> Основы метода. Отличия метода ЭПР от ЯМР-метода. Спектры ЭПР, спин-решеточная и спин-спиновая релаксация. Интерпретация спектров ЭПР.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
10	<b>Тема 12. Двойные резонансы</b> Акустический парамагнитный резонанс, акустический ядерный магнитный резонанс, двойной электронно-ядерный резонанс. Общие представления.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
11	<b>Тема 13. Фотоэмиссия и EXAFS</b> Фотоэмиссионные и инверсные фотоэмиссионные спектры. Методы XANES, EXAFS – исследование электронной подсистемы твердого тела.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
12	<b>Тема 14. Жидкие кристаллы</b> Смектики и нематики. Элементарное описание. Применение.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		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 СЕМИНАРОВ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>6 Семестр</i>
1	<p><b>Тема 1. Фазовая диаграмма однокомпонентного вещества</b></p> <p>Фазовое равновесие, агрегатные состояния и аллотропные фазы. Кривые возгонки-сублимации, плавления-затвердевания, кипения-конденсации. Тройная точка. Критическое состояние. Пример фазовой диаграммы простого металла. Фазовая диаграмма гелия. Кристаллы и аморфные вещества, жидкости, газы, жидкие кристаллы. Методы выращивания кристаллов: спонтанная кристаллизация, вытягивание из расплава, гидротермальный синтез, электрохимическое осаждение, зонная плавка.</p>
2	<p><b>Тема 2. Атом как основа твердого тела.</b></p> <p>Строение атома: размер ядра, внутренние и внешняя оболочки, радиус атома, радиус иона, ковалентный радиус. Потенциал ионизации, край поглощения, характеристическое излучение, рост энергии внутренних электронных оболочек с увеличением атомного номера. Количество частиц в твердом теле, эффективность статистического усреднения процессов. Общее выражение для энергии кристалла и ее разделение на энергию решетки и энергию электронной системы. Приближение, используемые для описания этих энергий и взаимодействия решетки с электронной системой. Концепция квазичастиц или элементарных возбуждений.</p>
3 - 4	<p><b>Тема 3. Трансляционная инвариантность как основа описания свойств твердых тел</b></p> <p>Кристаллическая структура: решетка и базис. Простые и сложные структуры. Основные типы структур однокомпонентных веществ (анализ структуры элементов периодической таблицы): ПК, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура алмаза. Построение их примитивных ячеек, расчет координационных чисел и радиусов первой координационной сферы. Построение ячейки Вигнера-Зейтца на примере ОЦК структуры.</p>
5 - 6	<p><b>Тема 4. Обратная решетка.</b></p> <p>Параметры решетки и межатомные расстояния. Определение плотности вещества по параметрам</p>

	<p>элементарной ячейки. Атомные плоскости и направления кристаллической решетки. Семейства и системы плоскостей, эквивалентные направления. Главные направления в кубических решетках. Обратная решетка как следствие трансляционной инвариантности кристаллической структуры. Основные соотношения, связывающие параметры прямой и обратной решеток. Связь векторов обратной решетки с атомными плоскостями: построение плоскости по индексам Миллера и нахождение индексов Миллера плоскости, проходящей через заданные узлы решетки. Связь межплоскостного расстояния с длиной вектора обратной решетки. Выражение межплоскостных расстояний кубической решетки через индексы Миллера.</p>
7 - 8	<p><b>Тема 5. Дифракционные методы изучения кристаллической структуры</b> Рентгеноструктурный анализ, нейтронные исследования магнитных веществ, дифракция медленных электронов в тонких слоях. Оценка энергии используемого рентгеновского излучения, нейтронов и электронов. Методы получения рентгеновского излучения: тормозное, характеристическое и синхротронное излучение. Формула Брэгга-Фульфа. Применение метода Лауэ для определения типа симметрии кристаллической структуры основных направлений кристалла. Порошковый метод определения параметров кристаллической структуры. Основные факторы, определяющие интенсивность и уширение дифракционных пиков, статические и динамические искажения решетки. Устройство дифрактометра и основные погрешности измерения параметров решетки. Определение числа дифракционных пиков с помощью построения Эвальда.</p>
9 - 10	<p><b>Тема 6. Энергия связи кристалла</b> Потенциал парного взаимодействия атомов/ионов. Решеточная сумма и энергия взаимодействия атома/иона с решеткой. Положение равновесия и межатомные расстояния. Вычисление сил взаимодействия атома/иона с решеткой. Влияние давления на межатомные расстояния. Модуль всестороннего сжатия. Методы создания высокого давления.</p>
11	<p><b>Тема 7. Ангармонизм</b> Разложение потенциала взаимодействия атома/иона с решеткой вблизи положения равновесия. Ангармонизм и его влияние на динамические и статические параметры решетки. Расчет коэффициента линейного расширения и оценка его величины на примере потенциала Леннарда-Джонса. Дилатометрия и регистрация структурных переходов при измерении температурного поведения коэффициента линейного расширения</p>
12	<p><b>Тема 8. Дефекты</b> Энтропия решетки и точечные дефекты в кристаллах. Равновесные концентрации дефектов по Шоттки и по</p>

	Френкелю. Независимость энергии точечного дефекта от положения в идеальном кристалле. Диффузия дефектов. Центры окраски в ионных кристаллах. Механизм образования и диффузии F – центров.
13	<p><b>Тема 9. Фононы</b></p> <p>Разложение потенциала взаимодействия атома/иона с решеткой вблизи положения равновесия: описание динамики решетки в гармоническом приближении. Особенности оптических колебаний ионных кристаллов. Поляризация и средний дипольный момент, их зависимость от частоты, соотношение Клазиуса-Мосотти. Инфракрасное поглощение ионных кристаллов. Соотношение Лиддана-Сокса-Теллера. Взаимодействие фононных мод ковалентных кристаллов с электромагнитным излучением. Рамановское и бриллюэновское рассеяние. Температурная зависимость амплитуд стоксовой и антистоксовой компонент рамановского рассеяния. Соотношение волновых векторов излучения и фононов. Роль электронных процессов в рамановском и бриллюэновском рассеянии.</p>
14	<p><b>Тема 10. Термодинамика фононов</b></p> <p>Энергия колебаний решетки в приближении независимых классических осцилляторов. Температурная зависимость теплоемкости как тест описания динамики решетки. Крах классического описания теплоемкости. Энергия колебаний решетки в приближении независимых квантовых осцилляторов. Вычисление температурной зависимости теплоемкости в модели Эйнштейна. Высокотемпературный и низкотемпературный пределы. Применение модели Эйнштейна для описания теплоемкости оптических мод колебаний. Энергия колебаний решетки в модели Дебая. Анализ модели Дебая на примере расчета теплоемкости цепочки осцилляторов. Граничные условия Борна-Кармана и число состояний в зоне Бриллюэна. Плотность фононных состояний. Температура Дебая. Связь параметров модели Дебая с экспериментально измеряемыми характеристиками кристалла. Ангармонизм и линейный рост высокотемпературной теплоемкости.</p>
15	<p><b>Тема 11. Ангармонизм</b></p> <p>Скорость звука. Продольные и поперечные моды звуковой волны, зависимость скорости от направления в кристалле, средняя скорость. Затухание звуковой волны. Теплопроводность диэлектриков. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности. Длина свободного пробега фононов, теплопроводность кристаллов и стекол. Величины теплопроводности теплоизоляторов и сапфира.</p>

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторские занятия, а также самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашнего задания, изучении пройденного материала. Для того чтобы показать современное физическое состояние 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.

## 7. 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)	Аттестационное мероприятие (КП 3)
ПК-1	З-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-12
ПК-5	У-ПК-5	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-12
	З-ПК-5	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-5	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-15	Э, КИ-8, КИ-12

## 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
75-84		C	
70-74		D	

			существенных неточностей в ответе на вопрос.
65-69	3 – «удовлетворительно»	Е	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	Ф	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.

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

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ С 89 Дифракционный структурный анализ : учебное пособие для вузов, Москва: Юрайт, 2021
2. 53 И83 Задачи по общей физике : учебное пособие для вузов, Москва: Бинوم. Лаборатория знаний, 2014
3. ЭИ Е 92 Квантовая механика : учебное пособие для вузов, Москва: Юрайт, 2022
4. 53 И83 Квантовая физика : основные законы, Москва: Бинوم. Лаборатория знаний, 2014
5. ЭИ К 93 Курс физики Т. 3 Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц, : , 2022
6. ЭИ Д 30 Математические основы квантовой механики : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022
7. ЭИ К31 Методы Монте-Карло для физических систем : учебное пособие, Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
8. ЭИ К31 Методы точной диагонализации в квантовой физике : учебное пособие, Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
9. ЭИ С 12 Основы теоретической физики. В 2-х тт. Том 2. Квантовая механика : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022

10. ЭИ И 85 Расшифровка кристаллической структуры материала по дифракционному спектру методом Ритвельда : Лабораторная работа, Москва: НИЯУ МИФИ, 2019
11. ЭИ С50 Сборник задач по физике конденсированного состояния : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
12. ЭИ З-24 Сборник задач по физическому материаловедению : учебно-методическое пособие, Москва: НИЯУ МИФИ, 2021
13. 539.2 С 87 Структура и свойства твердых тел : учеб. пособие, Москва: НИЯУ МИФИ, 2018
14. 53 Л22 Теоретическая физика Т.5 Статистическая физика. Ч.1, Москва: Физматлит, 2013
15. 539.2 Н 62 Технология конструкционных материалов. Анализ поверхности методами атомной физики : учеб. пособие для вузов, Москва: Юрайт, 2020
16. ЭИ К 31 Численные методы квантовой статистики : учебное пособие, Москва: Физматлит, 2010
17. 539.2 К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.1 Целый и дробный квантовые эффекты Холла, , Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
18. 530 Л22 Теоретическая физика Т.3 Квантовая механика. Нерелятивистская теория, , Москва: Физматлит, 2008
19. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, , : МИФИ, 2007
20. ЭИ К31 Современные проблемы физики конденсированного состояния : , В. А. Кашурников, А. В. Красавин, Москва: МИФИ, 2008
21. 536 К31 Численные методы квантовой статистики : , В. А. Кашурников, А. В. Красавин, Москва: Физматлит, 2010
22. ЭИ Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : , И. Н. Николаев, А. И. Маймистов, Москва: МИФИ, 2009

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 538.9 Б87 Квазичастицы в физике конденсированного состояния : , Москва: Физматлит, 2016
2. ЭИ К 89 Материаловедение: монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы : учебное пособие для вузов, Москва: Юрайт, 2022
3. ЭИ А47 Нейтронные методы в физике конденсированного состояния : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
4. 539.1 И 85 Расшифровка кристаллической структуры материала по дифракционному спектру методом Ритвельда : Лабораторная работа, Москва: НИЯУ МИФИ, 2019
5. ЭИ Р 15 Электротехническое материаловедение : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022

6. 539.2 А98 Физика твердого тела Т.1 , , М.: Мир, 1979

7. 539.2 А98 Физика твердого тела Т.2 , , М.: Мир, 1979

8. 539.2 Г95 Физика твердого тела : учеб. пособие для техн. ун-тов, А.Г. Гуревич, СПб: Невский диалект; БХВ-Петербург, 2004

9. 621.3 С49 Основы материаловедения и технологии полупроводников : Учеб. пособие для вузов, И. А. Случинская, Москва: МИФИ, 2002

10. 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>)

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

<http://library.mephi.ru/>

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

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

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

При изучении курса необходимо твердо усвоить современные представления о кристаллических структурах, о методах их экспериментального определения, о фононной и электронной подсистемах твердого тела, о классификации твердых тел. Следует изучить основные методы определения фононного спектра, плотности фононных состояний. Понимать значение фактора Дебая-Валлера в амплитуде рассеяния. Иметь представление о дефектах структуры, об элементарных возбуждениях. Знать особенности ионной связи, расчета постоянной Маделунга.

Необходимо уметь оценивать характерные параметры различных подсистем в конденсированной фазе, уметь ориентироваться в многообразии физических явлений твердого состояния. Знать особенности электронной подсистемы твердого тела, вид блоховской волновой функции, особенности зонной структуры и движения блоховского электрона во внешних полях. Уметь объяснить различие металла и диэлектрика, полуметалла и полупроводника. Рассчитывать статистику электронов и дырок, понимать значение эффективной массы для динамики носителей заряда. Знать основные методы определения

концентрации носителей и знака их заряда, методы расчета зонной структуры, примесных состояний.

Необходимо владеть современными теоретическими представлениями при описании взаимодействий атомов и электронных оболочек в кристалле, о термодинамических, оптических, магнитных и электрофизических свойствах твердых тел, а также представлять основные резонансно-магнитные и другие экспериментальные методы.

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

Необходимо дать студентам основные представления об электронной и фононной подсистемах твердого тела.

Курс опирается на материал следующих дисциплин, читаемых студентам физико-математических специальностей: уравнения математической физики, квантовая механика, макроэлектродинамика, теория вероятностей, статистическая физика и термодинамика. Для успешного освоения дисциплины необходимы знания по курсам общей физики и университетскому курсу математики. Необходимо проверить умение работать с операторами, знать дифференциальное и интегральное исчисление, тензорный и векторный анализ, статистику и термодинамику, электричество и магнетизм, в том числе в материальных средах. Необходимо, чтобы студенты ориентировались в задачах квантовой механики и статистической физики, основные квантовые и классические распределения, элементы квантовой статистики. В процессе освоения материала следует дать основные представления об электронной и фононной подсистемах твердого тела, о классификации межатомных связей, слагающих конденсированное состояние, о различных методах экспериментального исследования этих подсистем. Следует рассказать об основных общепринятых теоретических представлениях о физических процессах в твердых телах, об отличии твердого состояния от других агрегатных состояний вещества. Необходимо научить понятию о дальнем и ближнем порядке, о дефектах кристаллической структуры, о кинетических и термодинамических свойствах и моделях, описывающих эти свойства.

Автор(ы):

Кашурников Владимир Анатольевич, д.ф.-м.н.,  
профессор

Кузнецов Алексей Владимирович, к.ф.-м.н.

Конюхов Игорь Юрьевич

