

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/423-573.1

от 20.04.2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 14.03.02 Ядерные физика и технологии

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	2	72	30	15	0	27	0	3
Итого	2	72	30	15	0	0	27	0

## АННОТАЦИЯ

В курсе изучаются основные положения физики конденсированного состояния, физики металлов, диэлектриков и полупроводников. Рассматриваются элементы кристаллографического анализа твердого тела, виды межатомных взаимодействий, элементы зонной теории. Подробно разбираются особенности ковалентных кристаллов, определяющие полупроводниковые свойства кристаллов, а также влияние различных структурных несовершенств на основные свойства кристаллов. Также в курсе уделяется внимание рассмотрению вопросов, связанных с тепловыми свойствами кристаллов, элементами статистической физики фононов и электронов. При изложении теории полупроводников уделяется внимание описанию ряда контактных, термоэлектрических и гальваномангнитных явлений.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель курса - ознакомить слушателей курса с основными физическими моделями и математическим аппаратом физики твердого тела и современными достижениями эксперимента.

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

Курс закладывает необходимую базу для описания современных приборов экспериментальной физики. Обсуждаются основные теоретические представления физики твердого тела и достижения эксперимента. Среди обсуждаемых тем - кристаллические и тепловые свойства, зонная теория в твердых телах, спектры квазичастиц, статистика электронов и дырок в полупроводниках.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
ОПК-1 [1] – Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	З-ОПК-1 [1] – Знать базовые законы естественнонаучных дисциплин; основные математические законы; основные физические явления, процессы, законы и границы их применимости; сущность основных химических законов и явлений; методы математического моделирования, теоретического и экспериментального исследования У-ОПК-1 [1] – Уметь выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат В-ОПК-1 [1] – Владеть математическим аппаратом для разработки моделей процессов и явлений, решения

	практических задач профессиональной деятельности; навыками использования основных общефизических законов и принципов
УКЕ-1 [1] – Способен использовать знания естественнонаучных дисциплин, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в поставленных задачах	<p>З-УКЕ-1 [1] – знать: основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования</p> <p>У-УКЕ-1 [1] – уметь: использовать математические методы в технических приложениях, рассчитывать основные числовые характеристики случайных величин, решать основные задачи математической статистики; решать типовые расчетные задачи</p> <p>В-УКЕ-1 [1] – владеть: методами математического анализа и моделирования; методами решения задач анализа и расчета характеристик физических систем, основными приемами обработки экспериментальных данных, методами работы с прикладными программными продуктами</p>

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>
научно-исследовательский			
изучение научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по направлению исследований;	элементарные частицы, атомное ядро и плазма, газообразное и конденсированное состояние вещества, лазеры и их применения, ядерные реакторы, материалы ядерных реакторов, ядерные материалы и системы обеспечения их безопасности, ускорители заряженных частиц, современная электронная схмотехника, электронные системы ядерных и физических установок, системы автоматизированного	<p>ПК-1 [1] - Способен использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>З-ПК-1[1] - знать отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области, ;</p> <p>У-ПК-1[1] - уметь использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные</p>

	управления ядерно-физическими установками,		компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области; В-ПК-1[1] - владеть современными компьютерными технологиями и методами использования информационных ресурсов в своей предметной области
--	--	--	--

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (В19)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для: - формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для: - формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед; - формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной

		<p>позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.</p>
<p>Профессиональное воспитание</p>	<p>Создание условий, обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (B22)</p>	<p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для развития навыков коммуникации, командной работы и лидерства, творческого инженерного мышления, стремления следовать в профессиональной деятельности нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер трудовой деятельности и неслужебного поведения, ответственности за принятые решения через подготовку групповых курсовых работ и практических заданий, решение кейсов, прохождение практик и подготовку ВКР.</p> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для: - формирования производственного коллективизма в ходе совместного решения как модельных, так и практических задач, а также путем подкрепление рационально-технологических навыков взаимодействия в проектной деятельности эмоциональным эффектом успешного взаимодействия, ощущением роста общей эффективности при распределении проектных задач в соответствии с сильными компетентностными и эмоциональными свойствами членов проектной группы.</p>
<p>Профессиональное воспитание</p>	<p>Создание условий, обеспечивающих, формирование культуры безопасности при работе с лазерным излучением (B27)</p>	<p>1.Использование воспитательного потенциала профильных дисциплин и всех видов практик для: - формирования культуры</p>

		лазерной безопасности посредством тематического акцентирования в содержании дисциплин и учебных заданий, подготовки эссе, рефератов, дискуссий, а также в ходе практической работы с лазерным оборудованием. - формирования культуры безопасности при работе на экспериментальных и промышленных установках высокой мощности и имеющими повышенный уровень опасности через выполнение студентами практических и лабораторных работ, в том числе на оборудовании для исследования высокотемпературной плазмы.
--	--	--

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (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	16/8/0		25	КИ-8	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1,

							3-УКЕ-1, У-УКЕ-1, В-УКЕ-1
2	Часть 2	9-15	14/7/0		25	КИ-15	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-УКЕ-1, У-УКЕ-1, В-УКЕ-1
	<i>Итого за 6 Семестр</i>		30/15/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 6 Семестр</b>				50	3	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-УКЕ-1,

							У- УКЕ- 1, В- УКЕ- 1
--	--	--	--	--	--	--	-------------------------------------

\* – 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

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>6 Семестр</i>	30	15	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	16	8	0
1 - 2	<b>Строение твердых тел.</b> Кристаллические и аморфные тела. Кристаллическая структура (решетка, базис, операции симметрии, типы решеток Браве). Обозначение кристаллографических направлений и плоскостей в кристалле. Рентгеноструктурный анализ. Анизотропия кристаллов. Классификация кристаллов по типам химических связей: - ионные кристаллы (ионная (гетерополярная) связь); - атомные кристаллы (ковалентная (гомополярная) связь); - металлические кристаллы (металлическая связь); - молекулярные кристаллы (водородная связь). Сопоставление различных типов связей. Ковалентная связь и полупроводниковые свойства кристаллов.	Всего аудиторных часов		
		4	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 4	<b>Дефекты в кристаллах.</b> Дефекты в кристаллах: - междоузлия и вакансии; - дефекты по Шоттки; - дефекты по Френкелю; - дислокации (краевые и винтовые); - примеси внедрения и замещения.	Всего аудиторных часов		
		4	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 8	<b>Тепловые свойства твердых тел. Фононы.</b> Силы, действующие между частицами твердого тела. Характер теплового движения в кристаллах. Гармоническое приближение: - колебания цепочки одинаковых атомов (нормальные колебания решетки, спектр нормаль-ных колебаний);	Всего аудиторных часов		
		8	4	0
		Онлайн		
		0	0	0

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- колебания в цепочке неодинаковых атомов;</li> <li>- акустические и оптические колебания решетки;</li> <li>- фононы.</li> </ul> <p>Теплоемкость твердых тел.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- закон Дюлонга и Пти;</li> <li>- квантовые теории теплоемкости (теория Эйнштейна, модель Дебая).</li> </ul> <p>Теплопроводность твердых тел. Роль ангармоничности колебаний.</p>			
<b>9-15</b>	<b>Часть 2</b>	14	7	0
9 - 11	<p><b>Зонная теория твердых тел.</b></p> <p>Энергетические уровни свободных атомов.</p> <p>Обобществление электронов в металле (энергетические барьеры, туннелирование, расщепление уровней).</p> <p>Энергетические зоны электронов в кристалле:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- примеры образования энергетических зон;</li> <li>- деление на металлы, полупроводники, диэлектрики.</li> </ul> <p>Основы зонной теории:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- адиабатическое приближение;</li> <li>- одноэлектронное приближение;</li> <li>- теорема Блоха.</li> </ul> <p>Модель Кронига-Пенни:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- анализ модели:</li> <li>- зависимость энергии электрона от волнового вектора в разрешенных зонах;</li> <li>- зоны Бриллюэна в задаче Кронига-Пенни;</li> <li>- ограниченность модели.</li> </ul> <p>Эффективная масса электрона, квазиимпульс.</p> <p>Собственные полупроводники. Понятие о дырках.</p> <p>Рекомбинация. Проводимость в собственных полупроводниках.</p> <p>Примесные полупроводники. Доноры и акцепторы.</p> <p>Примеры.</p> <p>Равновесные концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- уровень Ферми в полупроводниках;</li> <li>- Зависимость концентрации свободных носителей от положения уровня Ферми;</li> <li>- концентрация носителей и положение уровня Ферми в собственных полупроводниках;</li> <li>- концентрация носителей и положение уровня Ферми в примесных полупроводниках.</li> </ul>	Всего аудиторных часов		
		8	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
12 - 15	<p><b>Электропроводность в полупроводниках. Контактные явления в полупроводниках.</b></p> <p>Электропроводность невырожденного газа.</p> <p>Подвижность носителей заряда и ее зависимость от температуры.</p> <p>Собственная проводимость полупроводников и ее температурная зависимость.</p> <p>Примесная проводимость полупроводников и ее температурная зависимость.</p> <p>Определение типа проводимости полупроводника.</p>	Всего аудиторных часов		
		6	3	0
		Онлайн		
		0	0	0

Эффект Холла в образце со смешанной проводимостью и его температурная зависимость. энерация, диффузия и дрейф в полупроводнике, близком к собственному. Коэффициент биполярной диффузии. Излучательная рекомбинация. Поверхностная рекомбинация. Безизлучательная рекомбинация. Уровни прилипания. Уровни рекомбинации. Эффект Холла в образце со смешанной проводимостью.			
--	--	--	--

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 ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>6 Семестр</i>
1 - 2	<b>Строение твердых тел.</b> Строение твердых тел. Кристаллические и аморфные тела. Кристаллическая структура (решетка, базис, операции симметрии, типы решеток Браве). Обозначение кристаллографических направлений и плоскостей в кристалле. Классификация кристаллов по типам химических связей. Дефекты в кристаллах.
3 - 4	<b>Дифракция</b> Методы исследования кристаллов с помощью дифракции. Условие Вульфа-Брэгга. Условие Лауэ.
5 - 6	<b>Тепловые свойства твердых тел.</b> Силы, действующие между частицами твердого тела. Характер теплового движения в кристаллах. Гармоническое приближение. Фононы. Теплоемкость твердых тел. Теплоемкость металлов. Теплопроводность твердых тел. Роль ангармоничности колебаний атомов.
7 - 8	<b>Элементы физической статистики.</b> Модель свободных электронов и ее применение к металлам. Классическая электронная теория металлов. Квантовая теория электронов в металле. Теплоемкость металлов (квантовый вариант). Теплопроводность металлов.
9 - 10	<b>Электропроводность в полупроводниках.</b> Подвижность носителей заряда и ее зависимость от

	температуры. Собственная проводимость полупроводников и ее температурная зависимость. Примесная проводимость полупроводников и ее температурная зависимость. Основы сверхпроводимости.
11	<b>Неравновесные электроны и дырки.</b> Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Биполярная генерация носителей заряда под действием света. Фотопроводимость. Время жизни неравновесных носителей заряда. Уравнение непрерывности в полупроводниках. Диффузионный и дрейфовый токи. Соотношение Эйнштейна.
12	<b>Зонная теория твердых тел.</b> Эффективная масса электрона, квазиимпульс. Собственные полупроводники. Понятие о дырках. Рекомбинация. Проводимость в собственных полупроводниках. Примесные полупроводники. Равновесные концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках. Плотность состояний в зоне. Уровень Ферми в полупроводниках; Закон действующих масс. Зависимость концентрации свободных носителей и положения уровня Ферми в собственных полупроводниках от температуры. Зависимость концентрации носителей и положения уровня Ферми в примесных полупроводниках от температуры.

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия в виде лекций, а также самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении заданий, повторении изученного материала и подготовке к контрольным мероприятиям. Для того чтобы дать современное состояние физики твердого тела, 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 ежегодных конференций 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)
ОПК-1	З-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-15
	У-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-15
	В-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-15

ПК-1	З-ПК-1	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-1	З, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-1	З, КИ-8, КИ-15
УКЕ-1	З-УКЕ-1	З, КИ-8, КИ-15
	У-УКЕ-1	З, КИ-8, КИ-15
	В-УКЕ-1	З, 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 – <i>«отлично»</i>	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 – <i>«хорошо»</i>	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 – <i>«удовлетворительно»</i>	E	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 – <i>«неудовлетворительно»</i>	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.

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

### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. ЭИ Н99 Solid-State Physics : An Introduction to Principles of Materials Science, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009
2. ЭИ И 83 Квантовая физика. Основные законы : учебное пособие, Москва: Лаборатория знаний, 2021
3. 538.9 П30 Основы физики конденсированного состояния : учебное пособие, Долгопрудный: Интеллект, 2013
4. ЭИ Ш 18 Физика полупроводников : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022
5. 530 Л22 Теоретическая физика Т.3 Квантовая механика. Нерелятивистская теория, , Москва: Физматлит, 2008
6. ЭИ К31 Современные проблемы физики конденсированного состояния : , В. А. Кашурников, А. В. Красавин, Москва: МИФИ, 2008
7. 539.2 Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : , И. Н. Николаев, А. И. Маймистов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2009
8. ЭИ Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : , И. Н. Николаев, А. И. Маймистов, Москва: МИФИ, 2009

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. 53 Л22 Теоретическая физика Т.5 Статистическая физика. Ч.1, Москва: Физматлит, 2013
2. 539.2 К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.1 Целый и дробный квантовые эффекты Холла, , Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
3. 621.38 Г95 Твердотельная электроника : учебное пособие для вузов, В. А. Гуртов, Москва: Техносфера, 2008
4. 621.3 С49 Основы материаловедения и технологии полупроводников : Учеб. пособие для вузов, И. А. Случинская, Москва: МИФИ, 2002
5. 537 Г68 материаловедение полупроводников и диэлектриков : учебник для вузов, С. С. Горелик, М. Я. Дашевский, М.: МИСИС, 2003
6. 539.2 К45 Введение в физику твердого тела : , Ч. Киттель , М.: МедиаСтар, 2006

### **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:**

Специальное программное обеспечение не требуется

### **LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:**

<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 усвоить основные физические характеристики конденсированного состояния вещества, определяющие свойства металлов, диэлектриков и полупроводников. Необходимо освоить основные элементы кристаллографического анализа, уметь различать основные типы кристаллических структур по соотношению длин и направлений основных векторов элементарных ячеек. Уметь чётко определять направления и плоскости в кубических кристаллах, иметь чёткое представление о физических явлениях, лежащих в основе рентгеноструктурного анализа. Понимать связь внешней симметрии кристаллов с внутренней симметрией элементарных ячеек.

Надлежит понимать природу межатомных и межмолекулярных взаимодействий, определяющих классификацию кристаллов по типам химической связи.

Для лучшего усвоения теории атомарных и молекулярных орбиталей и образования гибридных орбиталей рекомендуется использование интерактивного ресурса в сети Интернет «Галерея атомных и молекулярных орбиталей»: (<http://winter.group.shef.ac.uk/orbitron/>). На основании сравнения различных типов химической связи осознать, что свойства насыщенности и направленности ковалентной связи дают начало полупроводниковым свойствам кристаллов.

Необходимо чётко усвоить классификацию структурных несовершенств по размерному признаку, знать причины и условия их возникновения, понимать, какие свойства кристаллов наиболее чувствительны к дефектам каждого типа. Знать физическую природу взаимодействия дефектов. Уметь объяснять, почему точечные дефекты являются термодинамически равновесными, а другие типы дефектов – неравновесными.

Нужно знать физические основы теплового движения атомов или ионов в кристаллах, понимать связь между типом химической связи и характером сил, действующих между частицами в кристаллах. Уметь получать дисперсионные зависимости в гармоническом приближении в непрерывной струне и в одномерных цепочках одинаковых и различных атомов. Знать, что дискретность расположения атомов в цепочке порождает ограниченность сверху частоты колебаний, а наличие в цепочке атомов двух типов – появление акустической и оптической ветвей колебаний. Знать основные элементы физической статистики, применяемые для описания макроскопических систем. Знать определение фонона, понимать структуру фононного спектра. Знать основы квантовых теорий теплоёмкости твёрдого тела. Уметь чётко формулировать упрощающие предположения, положенные в основу теорий Дебая и Эйнштейна.

Необходимо осознать, что тепловое расширение тел обусловлено агармоничностью колебаний.

Нужно знать основы зонной теории: постановку задачи нахождения собственных значений энергии и волновых функций электронов в кристалле, понимать, какие упрощающие предположения лежат в основе адиабатического и одноэлектронного приближения. Понять, какие предпосылки позволили найти вид волновой функции электрона в кристалле (сформулировать теорему Блоха). Следует понять смысл и необходимость введения понятия эффективной массы. Знать суть метода эффективных масс, его основные преимущества и ограничения. Знать принцип экспериментальных методов определения компонентов тензора эффективных масс.

Иметь чёткое представление о способах анализа легированных полупроводников. Понимать особенности применения способа рассмотрения примесей III и V групп в Si как водородоподобного атома, находящегося в среде с эффективной диэлектрической проницаемостью. Знать определение энергетического уровня Ферми. Уметь анализировать концентрации свободных носителей заряда по поведению уровня Ферми в зависимости от внешних воздействий (температуры, внешнего электрического поля).

Иметь представление об электронной и дырочной проводимости в собственных и примесных полупроводниках. Знать определение подвижности носителей заряда и уметь объяснять её температурную зависимость. Уметь анализировать температурную зависимость собственной и примесной проводимости.

Знать способы экспериментального определения типа проводимости полупроводника. Знать физические основы эффекта Холла, уметь объяснять температурное поведение Холловской разности потенциалов. Иметь качественное представление о гальвано-магнитных явлениях, которые могут сопровождать Холловские измерения.

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

Необходимо дать студентам возможность усвоить основные физические характеристики конденсированного состояния вещества, определяющие свойства металлов, диэлектриков и полупроводников. Следует познакомить студентов с основными элементами кристаллографического анализа кристаллов. Научить определять направления и плоскости в кубических кристаллах, дать чёткое представление о физических явлениях, лежащих в основе рентгеноструктурного анализа. Указать на связь внешней симметрии кристаллов (огранки) с внутренней симметрией элементарных ячеек.

Следует дать представление о природе межатомных и межмолекулярных взаимодействий, определяющих классификацию кристаллов по типам химической связи.

Для лучшего усвоения теории атомарных и молекулярных орбиталей и образования гибридных орбиталей рекомендуется использование интерактивного ресурса в сети Интернет «Галерея атомных и молекулярных орбиталей»: (<http://winter.group.shef.ac.uk/orbitron/>). На основании сравнения различных типов химической связи показать, что свойства насыщенности и направленности ковалентной связи дают начало полупроводниковым свойствам кристаллов.

Дать классификацию структурных несовершенств по размерному признаку, выявить причины их возникновения. Показать, какие свойства кристаллов наиболее чувствительны к дефектам каждого типа. Дать представление о природе взаимодействия дефектов. Объяснить, почему точечные дефекты являются термодинамически равновесными, а другие типы дефектов

– неравновесными. Привести характерные примеры использования дефектов (формирование скрытого изображения на фотоплёнке и другие).

Познакомить студентов с физическими основами теплового движения атомов и ионов в кристаллах, указав на связь между типом химической связи и характером сил, действующих между частицами в кристаллах. Вывести и графически изобразить дисперсионные зависимости в гармоническом приближении в непрерывной струне и в одномерных цепочках одинаковых и различных атомов. Обратить внимание на то, что дискретность расположения атомов в цепочке порождает ограниченность сверху частоты колебаний, а наличие в цепочке атомов двух типов – появление акустической и оптической ветвей колебаний. Напомнить основные элементы физической статистики, применяемые для описания макроскопических систем. Дать определение фонона, объяснить структуру фононного спектра. Дать основы квантовых теорий теплоёмкости твёрдого тела.

Показать математически, что тепловое расширение тел обусловлено асгармоничностью колебаний.

Дать основы зонной теории: поставить задачу нахождения собственных значений энергии и волновых функций электронов в кристалле, вводя упрощающие предположения, лежащие в основе адиабатического и одноэлектронного приближения. Показать основные предпосылки, позволившие найти вид волновой функции электрона в кристалле (сформулировать теорему Блоха).

Разъяснить смысл и необходимость введения понятия эффективной массы, а также суть метода эффективных масс, его основные преимущества и ограничения. Познакомить студентов с экспериментальными методами определения компонентов тензора эффективных масс.

Рассказать о способах анализа легированных полупроводников. Обратить внимание на особенности применения способа рассмотрения примесей III и V групп в Si как водородоподобного атома, находящегося в среде с эффективной диэлектрической проницаемостью. Знать определение энергетического уровня Ферми. Научить анализировать концентрации свободных носителей заряда по поведению уровня Ферми в зависимости от внешних воздействий (температуры, внешнего электрического поля).

Дать представление об электронной и дырочной проводимости в собственных и примесных полупроводниках. Дать определение подвижности носителей заряда и объяснять её температурную зависимость. Провести анализ температурной зависимости собственной и примесной проводимости.

Познакомить студентов с экспериментальными способами определения типа проводимости полупроводника. Выявить физические основы эффекта Холла, объяснить температурное поведение Холловской разности потенциалов. Дать краткое описание гальваномагнитных явлений, которые могут сопровождать Холловские измерения.

Автор(ы):

Маврицкий Олег Борисович

