

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики  
В.В. Иванов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физика твердого тела
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики и химии наноструктур
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

- лекции: 0 час.
- семинары: 60 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Б.П. Сорокин, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии наноструктур 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Физика твердого тела" предусматривает ознакомление студентов с основами физики твердого тела, в курсе которого рассматриваются упругие, тепловые, электрические и магнитные свойства идеальных и реальных (с дефектами) кристаллических твердых тел (металлов, диэлектриков, полупроводников, магнетиков) с учетом структуры, симметрии и типов химических связей в них, а также базовые приложения различных эффектов и свойств твердых тел.

Задачи курса:

- формирование базовых знаний в области физики твердого тела как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- формирование представления о свойствах твердых тел с учетом их структуры, симметрии и электронного строения;
- приобретение практических умений и навыков в организации экспериментального и теоретического моделирования физических процессов в твердых телах.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

### 1. Методы исследования кристаллической структур

Методы структурных исследований.

Основы структурного анализа.

### 2. Свойства диэлектриков

Типы поляризации твердых тел. Внутреннее поле в диэлектриках.

Диэлектрическая релаксация. Уравнение Дебая.

### 3. Структура и симметрия кристаллов.

Принципы строения конденсированных систем.

Точечная и пространственная симметрия.

Решетки Бравэ.

Обратная решетка и зоны Бриллюэна.

### 4. Теплоемкость диэлектрических кристаллов.

Температурная зависимость теплоемкости твердых тел. Модель Эйнштейна.

Модель Дебая.

Ангармонизм колебаний решетки.

### 5. Типы связей в кристаллах

Кристаллы инертных газов и ионные кристаллы.

Кристаллы с ковалентной, металлической и водородной связью. Рост кристаллов.

### 6. Упругие свойства кристаллов

Закон Гука для анизотропной сплошной среды.

Упругие волны в кристаллах. Уравнение Кристоффеля.

### 7. Фононы и колебания решетки

Колебания одномерной цепочки.

Колебания трехмерного кристалла в гармоническом приближении.

Законы дисперсии фононов.

### 8. Дефекты кристаллической структуры

Типы дефектов в кристаллах.

## 9. Магнитные свойства твердых тел

Диамагнетизм.

Парамагнетизм.

Ферро- и антиферромагнитные состояния в твёрдых телах.

Доменная структура ферромагнетиков. Кривая намагничивания. Гистерезис.

## 10. Низкотемпературная и высокотемпературная сверхпроводимость

Экспериментальные результаты по низко- и высокотемпературной сверхпроводимости.

Теория сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера.

## 11. Полупроводники

Статистика электронов в полупроводниках.

Примесные полупроводники Водородоподобная модель.

Температурные зависимости концентрации носителей заряда и проводимости в собственных и примесных полупроводниках.

## 12. Электроны в металлах

Классические модели газа свободных электронов (теория Друде-Лорентца). Эффект Холла.

Теория Зоммерфельда свободного электронного газа.

Статистика Ферми-Дирака для электронного газа.

Электронная теплоемкость.

## 13. Энергетическая зонная структура

Модель Кронинга-Пенни и модель почти свободных электронов.

Энергетический спектр состояний сильно связанных электронов.

Металлы, полуметаллы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения заполнения зон.

Поверхность Ферми. Эффект де Гааза Ван Альфена.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- ознакомление студентов с основами физики твердого тела, в курсе которого рассматриваются упругие, тепловые, электрические и магнитные свойства идеальных и реальных (с дефектами) кристаллических твердых тел (металлов, диэлектриков, полупроводников, магнетиков) с учетом структуры, симметрии и типов химических связей в них, а также базовые приложения различных эффектов и свойств твердых тел.

### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области физики твердого тела как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- формирование представления о свойствах твердых тел с учетом их структуры, симметрии и электронного строения;
- приобретение практических умений и навыков в организации экспериментального и теоретического моделирования физических процессов в твердых телах.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

<p>решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты</p>	<p>ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели</p>
	<p>ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты</p>

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;  
современные проблемы физики, химии, математики;  
теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;  
принципы симметрии и законы сохранения;  
новейшие открытия естествознания;  
постановку проблем физико-химического моделирования;  
о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;  
представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;  
работать на современном экспериментальном оборудовании;  
абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;  
планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;  
научной картиной мира;  
навыками самостоятельной работы в лаборатории на современном экспериментальном оборудовании;  
математическим моделированием физических задач.

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

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Методы исследования кристаллической структур. Методы структурных исследований. Основы структурного анализа.		4		
2	Свойства диэлектриков. Типы поляризации твердых тел. Внутреннее поле в диэлектриках. Диэлектрическая релаксация. Уравнение Дебая.		6		

3	Структура и симметрия кристаллов. Принципы строения конденсированных систем. Точечная и пространственная симметрия. Решетки Бравэ. Обратная решетка и зоны Бриллюэна.		4		
4	Теплоемкость диэлектрических кристаллов. Температурная зависимость теплоемкости твердых тел. Модель Эйнштейна. Модель Дебая. Ангармонизм колебаний решетки.		4		
5	Типы связей в кристаллах. Кристаллы инертных газов и ионные кристаллы. Кристаллы с ковалентной, металлической и водородной связью. Рост кристаллов.		4		
6	Упругие свойства кристаллов. Закон Гука для анизотропной сплошной среды. Упругие волны в кристаллах. Уравнение Кристоффеля.		4		15
7	Фононы и колебания решетки. Колебания одномерной цепочки. Колебания трехмерного кристалла в гармоническом приближении. Законы дисперсии фононов.		4		
8	Дефекты кристаллической структуры. Типы дефектов в кристаллах.		4		5
9	Магнитные свойства твердых тел. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферро- и антиферромагнитные состояния в твердых телах. Доменная структура ферромагнетиков. Кривая намагничивания. Гистерезис.		4		5
10	Низкотемпературная и высокотемпературная сверхпроводимость. Экспериментальные результаты по низко- и высокотемпературной сверхпроводимости. Теория сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера.		6		5
11	Полупроводники. Статистика электронов в полупроводниках. Примесные полупроводники. Водородоподобная модель. Температурные зависимости концентрации носителей заряда и проводимости в собственных и примесных полупроводниках.		4		5

12	Электроны в металлах. Классические модели газа свободных электронов (теория Друде-Лорентца). Эффект Холла. Теория Зоммерфельда свободного электронного газа. Статистика Ферми-Дирака для электронного газа. Электронная теплоемкость.		6		5
13	Энергетическая зонная структура. Модель Кронинга-Пенни и модель почти свободных электронов. Энергетический спектр состояний сильно связанных электронов. Металлы, полуметаллы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения заполнения зон. Поверхность Ферми. Эффект де Гааза Ван Альфена.		6		5
Итого часов			60		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Методы исследования кристаллической структур. Методы структурных исследований. Основы структурного анализа.

Электронная микроскопия, туннельный и атомно-силовой микроскопы, дифракционные методы. Закон дифракции Брэгга-Вульфа. Нейтронография. Экспериментальные дифракционные методы рентгеноструктурного анализа. Условие дифракции и обратная решетка. Построение Эвальда. Уравнения дифракции Лауэ. Амплитуда рассеянной (дифрагированной) волны рентгеновского излучения. Электронная плотность. Структурный фактор базиса и атомный фактор рассеяния. Законы погасания.

2. Свойства диэлектриков. Типы поляризации твердых тел. Внутреннее поле в диэлектриках. Диэлектрическая релаксация. Уравнение Дебая.

Макроскопическое электрическое поле. Поляризация. Диэлектрическая восприимчивость. Диэлектрическая проницаемость. Локальное поле. Поле Лорентца. Механизмы поляризации в кристаллах с различными типами химических связей. Уравнение Клаузиуса-Мосотти-Лорентца. Электронная поляризуемость. Взаимодействие электромагнитных волн с ионными кристаллами в инфракрасной области спектра. Поперечные и продольные оптические фононы. Поляритоны. Ионная поляризуемость. Соотношение Лиддена-Сакса-Теллера. Ориентационная дипольная поляризуемость. Диэлектрическая релаксация. Уравнение Дебая. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Тангенс диэлектрических потерь. Диэлектрические потери при различных типах поляризации. Сегнето-, пиро- и пьезоэлектрики. Электрострикция. Применения кристаллов – активных диэлектриков в функциональной СВЧ микроэлектронике, акустоэлектронике, пьезотехнике, акусто- и электрооптике и сенсорах.

3. Структура и симметрия кристаллов. Принципы строения конденсированных систем. Точечная и пространственная симметрия. Решетки Бравэ. Обратная решетка и зоны Бриллюэна.

Ближний и дальний порядок, функция радиального распределения частиц, пространственная когерентность. Трансляции. Элементарная ячейка и базис. Точечная и пространственная симметрия. Предельные группы симметрии. Принцип симметрии Кюри. Типы пространственных решеток. Принципы плотной и валентной упаковок. Индексы Миллера. Обратная решетка и межплоскостные расстояния. Зоны Бриллюэна.

4. Теплоемкость диэлектрических кристаллов. Температурная зависимость теплоемкости твердых тел. Модель Эйнштейна. Модель Дебая. Ангармонизм колебаний решетки.

Температурная зависимость теплоемкости твердых тел. Закон Дюлонга-Пти. Функция распределения Планка для фононов. Модель Эйнштейна теплоемкости твердых тел. Плотность мод. Циклические граничные условия Борна-Кармана. Приближение Дебая и теория теплоемкости твердых тел. Температура Дебая. Ангармонизм колебаний решетки, тепловое расширение и теплопроводность твердых тел.

5. Типы связей в кристаллах. Кристаллы инертных газов и ионные кристаллы. Кристаллы с ковалентной, металлической и водородной связью. Рост кристаллов.

Энергия химической связи. Кристаллы инертных газов. Происхождение сил Ван-дер-Ваальса – Лондона. Природа сил отталкивания. Принцип Паули. Потенциал Ленарда-Джонса. Ионные кристаллы. Энергия Маделунга. Метод ячеек Эвьена. Метод Эвальда. Объемный модуль упругости кубических кристаллов. Энергия связи ковалентного кристалла. Полиморфизм. Степень ионности связи в кристаллах бинарных соединений. Металлическая связь и ее особенности. Энергия связи металлов. Кристаллохимические атомные и ионные радиусы. Кристаллы с водородными связями. Природа водородной связи и ее особенности. Рост кристаллов. Технологии синтеза объемных, пленочных и одномерных кристаллов.

6. Упругие свойства кристаллов. Закон Гука для анизотропной сплошной среды. Упругие волны в кристаллах. Уравнение Кристоффеля.

Определение тензора деформаций. Тензор механических напряжений, его внутренняя симметрия. Закон Гука для анизотропной сплошной среды. Постоянные упругой податливости и упругой жесткости. Энергия упругой деформации. Тензор упругих модулей для кубического кристалла. Объемный модуль упругости и упругие постоянные кубического кристалла. Уравнение движения упругой анизотропной сплошной среды. Типы упругих волн и закон дисперсии фононов в континуальном приближении. Экспериментальное определение упругих постоянных.

7. Фононы и колебания решетки. Колебания одномерной цепочки. Колебания трехмерного кристалла в гармоническом приближении. Законы дисперсии фононов.

Квантование энергии колебаний атомов решетки. Квазиимпульс. Законы сохранения энергии и импульса. Квазиупругая сила. Силовые постоянные. Колебания одномерной цепочки. Цепочка с базисом. Колебания трехмерного кристалла в гармоническом приближении. Квантование энергии колебаний атомов решетки. Квазиимпульс. Законы сохранения энергии и импульса.

Семестр: 2 (Весенний)

8. Дефекты кристаллической структуры. Типы дефектов в кристаллах.

Вакансии: дефекты по Шоттки, дефекты по Френкелю. Термодинамическое равновесие и диффузия точечных дефектов. Энергия активации. Ионная проводимость. Центры окраски в ионных кристаллах. Процессы упорядочения в сплавах. Дислокации. Вектор Бюргерса. Границы зерен. Влияние дислокационной структуры на механические свойства кристаллов и сплавов. Кривая деформации растяжения. Упрочнение. Бездислокационные кристаллы (усы).

9. Магнитные свойства твердых тел. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферро- и антиферромагнитные состояния в твёрдых телах. Доменная структура ферромагнетиков. Кривая намагничивания. Гистерезис.

Напряженность и индукция магнитного поля. Магнитная восприимчивость. Намагниченность. Диамагнетизм атомов. Прецессия Лармора. Формула Ланжевена. Квантовая теория диамагнетизма и парамагнетизма. Закон Кюри. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм. Приближение молекулярного поля. Модель ферромагнетизма Гейзенберга. Спонтанная намагниченность. Температурная зависимость магнитной восприимчивости (закон Кюри-Вейсса). Точка Кюри. Ферромагнетики. Антиферромагнетики. Точка Нееля. Ферромагнитные домены. Кривая намагничивания ферромагнетиков в переменном поле. Гистерезис. Намагниченность насыщения. Остаточная намагниченность. Коэрцитивная сила. Применения ферро- и ферромагнитных материалов в электро и радиотехнике, электронике, устройствах хранения информации.

10. Низкотемпературная и высокотемпературная сверхпроводимость. Экспериментальные результаты по низко- и высокотемпературной сверхпроводимости. Теория сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера.

Экспериментальные результаты по низко- и высокотемпературной сверхпроводимости. Разрушение сверхпроводимости магнитным полем. Идеальный диамагнетизм (эффект Мейсснера). Теплоемкость. Энергетическая щель. Температурное поведение проводимости в ВТСП. Понятие о теории сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера. Эффект Джозефсона. Гипотезы о природе ВТСП. Применения сверхпроводников в криоэлектронике и электроэнергетике.

11. Полупроводники. Статистика электронов в полупроводниках. Примесные полупроводники. Водородоподобная модель. Температурные зависимости концентрации носителей заряда и проводимости в собственных и примесных полупроводниках.

Собственные полупроводники. Запрещенная зона. Фотопроводимость. Прямые и не прямые процессы поглощения фотонов. Дрейфовая скорость. Подвижность. Концентрация электронов (дырок) в зоне проводимости (валентной зоне). Закон действующих масс. Водородоподобная модель. Донорные и акцепторные примеси. Электронная и дырочная проводимость. Температурная ионизация примесных центров. Методы определения знака носителей тока в полупроводниках (эффект Холла, термоэлектродвижущая сила). Температурная зависимость проводимости в примесном полупроводнике.

Применения полупроводников в микроэлектронике, инжекционных лазерах, фотоприемниках и преобразователях солнечной энергии, сенсорах.

12. Электроны в металлах. Классические модели газа свободных электронов (теория Друде-Лорентца). Эффект Холла. Теория Зоммерфельда свободного электронного газа. Статистика Ферми-Дирака для электронного газа. Электронная теплоемкость.

Классические модели газа свободных электронов Друде и Лорентца. Электронная проводимость, теплоемкость, теплопроводность металлов. Движение электронов в металле в магнитном поле. Циклотронная частота. Статическое магнетосопротивление. Эффект Холла в металлах. Несостоятельность классических моделей. Статистика Ферми-Дирака для электронного газа. Уравнение Шредингера и волновые функции свободных электронов. Энергетические уровни и плотность электронных состояний. Температурная зависимость функции распределения Ферми-Дирака. Энергия Ферми и ее температурная зависимость. Поверхность Ферми. Электронная теплоемкость. Модель металлической проводимости Зоммерфельда. Теплопроводность металлов. Закон Видемана-Франца.



13. Энергетическая зонная структура. Модель Кронинга-Пенни и модель почти свободных электронов. Энергетический спектр состояний сильно связанных электронов. Металлы, полуметаллы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения заполнения зон. Поверхность Ферми. Эффект де Гааза Ван Альфена.

Модель Кронинга-Пенни. Модель почти свободных электронов (ПСЭ). Дифракция Брэгга для электронов на границе зоны Бриллюэна. Зоны разрешенных и запрещенных энергий в модели ПСЭ. Теорема Блоха. Волновое уравнение для электрона в поле периодического потенциала. Энергетический спектр состояний сильно связанных электронов (оценка методом линейной комбинации атомных орбиталей). Эффективная масса и ширина разрешенной зоны. Схема приведенных зон. Особенности на границе зоны Бриллюэна. Число энергетических уровней в зоне. Металлы, полуметаллы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения заполнения зон. Строение поверхности Ферми. Эффект де Гааза- Ван Альфена. Электроны и дырки. Физическая интерпретация эффективной массы.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Василевский А.С. Физика твердого тела. Уч. пособие. 2010 г.
2. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. 2006 г.
3. Зиненко В.И., Сорокин Б.П., Турчин П.П. Основы физики твердого тела. —М.: Физматлит, 2001 г.
4. Верещагин И.К., Коклин В.А. и др. Физика твёрдого тела. 2-е изд. испр.2001 г.
5. Воронов В.К., Подоплелов А.В. Современная физика. Конденсированные состояния. Уч. пособие. 2008 г.

### Дополнительная литература

1. Гинзбург И.Ф. Введение в физику твердого тела. 2003 г.
2. Павлов П.В., Хохлов А.Г. Физика твердого тела – М: Высшая школа, 2000.
3. Елманов Г.Н., Залужный А.Г., Скрытний В.И.,Смирнов Е.А.,Яльцев В.Н. Физика твёрдого тела. Том 1 серии ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ(Учебник для вузов под общ. ред. Б.А. Калина. МИФИ,2007 г.
4. Перлин, Вартанян, Федоров Физика твёрдого тела. Оптика полупроводников, диэлектриков, металлов. Учебное пособие. 2008 г.
5. Сирота Д.И. Физика твердого тела. Сборник задач с подробными решениями. Изд..2, испр. 2010 г.
6. Каганов М.И. Электроны, фононы, магноны. Изд.2. 2008. 192 с.
7. Журналы по физике твердого тела (Физика твердого тела, Кристаллография, ЖТФ, Письма в ЖТФ, Physica Status Solidi b, Physical Review B и др.)

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Доступные через Internet научные и научно-технические журналы, электронные конспекты лекций, учебные пособия и сборники задач, разработанные для данного курса.

Обеспечение самостоятельной работы - базы данных по журналам Physica Status Solidi b, Physical Review

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

не предусмотрены.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики и химии наноструктур
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	Б.П. Сорокин, д-р физ.-мат. наук, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика твердого тела» обучающийся должен:

### знать:

место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;  
современные проблемы физики, химии, математики;  
теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;  
принципы симметрии и законы сохранения;  
новейшие открытия естествознания;  
постановку проблем физико-химического моделирования;  
о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

### уметь:

эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;  
представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;  
работать на современном экспериментальном оборудовании;  
абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;  
планировать оптимальное проведение эксперимента.

### владеть:

планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента;  
научной картиной мира;  
навыками самостоятельной работы в лаборатории на современном экспериментальном оборудовании;  
математическим моделированием физических задач.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачета:

1. Трансляции. Элементарная ячейка и базис
2. Точечная и пространственная симметрия, классы точечной симметрии и федоровские группы
3. Категории и сингонии. Предельные группы симметрии, принцип симметрии Кюри
4. Типы пространственных решеток Бравэ

5. Закон рациональности параметров, феноменологическое и математическое определение индексов Миллера направлений и плоскостей
6. Обратная решетка и межплоскостные расстояния
7. Ячейка Вигнера-Зейтца. Зоны Бриллюэна
8. Методы микроструктурных исследований: электронная микроскопия, туннельный и атомно-силовой микроскопы, дифракционные методы
9. Закон дифракции Брэгга-Вульфа. Границы применимости
10. Экспериментальные дифракционные методы рентгеноструктурного анализа
11. Условие дифракции и обратная решетка. Построение Эвальда
12. Уравнения дифракции Лауэ
13. Представление о силах связи электростатической и квантово-механической природы. Основные условия образования кристаллов
14. Энергия химической связи. Кристаллы инертных газов. Происхождение сил Ван-дер-Ваальса – Лондона
15. Природа сил отталкивания. Принцип Паули. Потенциал Ленарда-Джонса
16. Ионные кристаллы. Энергия Маделунга. Объемный модуль упругости кубических кристаллов
17. Энергия ковалентного кристалла. Степень ионности связи в кристаллах бинарных соединений
18. Металлические кристаллы. Металлическая связь и ее особенности. Энергия связи металлического кристалла
19. Кристаллы с водородными связями. Природа водородной связи и ее особенности
20. Квантование энергии колебаний атомов решетки
21. Неупругое рассеяние фотонов и нейтронов на акустических фононах. Квазиимпульс. Законы сохранения энергии и импульса
22. Неупругое рассеяние нейтронов на фононах как метод изучения фононного спектра в твердых телах
23. Квазиупругая сила. Силовые постоянные. Уравнение движения атомной плоскости
24. Закон дисперсии в случае колебания решетки одинаковых атомов
25. Первая зона Бриллюэна. Взаимосвязь зон Бриллюэна с типами обратной решетки
26. Особенности колебаний решетки на границе зоны Бриллюэна
27. Континуальное приближение
28. Колебания примитивной решетки с двумя атомами в базисе. Оптические и акустические фононные ветви. Предельная частота акустической моды. Запрещенная область частот
29. Температурная зависимость теплоемкости твердых тел. Закон Дюлонга-Пти
30. Функция распределения Планка для фононов. Модель Эйнштейна теплоемкости твердых тел
31. Приближение Дебая для акустических типов колебаний твердого тела
32. Плотность фононных мод. Циклические граничные условия Борна-Кармана
33. Теория теплоемкости твердых тел Дебая. Температура Дебая
34. Ангармонизм колебаний решетки. Тепловое расширение
35. Теплопроводность твердых тел
36. Определение тензора деформаций. Бесконечно малые и конечные деформации. Однородные и неоднородные деформации
37. Тензор механических напряжений, его внутренняя симметрия
38. Закон Гука для анизотропной сплошной среды
39. Постоянные упругой податливости и упругой жесткости
40. Энергия упругой деформации
41. Тензор упругих модулей для кубического кристалла. Объемный модуль упругости и упругие постоянные кубического кристалла
42. Уравнение движения упругой анизотропной сплошной среды
43. Уравнения Кристоффеля. Скорости упругих волн и константы упругости кубического кристалла
44. Уравнения Максвелла для описания свойств диэлектриков
45. Макроскопическое и микроскопическое электрические поля в диэлектрике
46. Поляризация. Поляризационные заряды
47. Диэлектрическая восприимчивость. Диэлектрическая проницаемость

48. Поле Лорентца. Связь макро- и микроскопических свойств диэлектриков
49. Уравнение Клаузиуса-Мосотти-Лорентца
50. Механизмы поляризации в кристаллах с различными типами химических связей
51. Электронная поляризация (статическая поляризуемость, частотная зависимость)
52. Взаимодействие электромагнитных волн с ионными кристаллами в инфракрасной области спектра
53. Ионная поляризация (статическая поляризуемость, частотная зависимость)
54. Соотношение Лиддена-Сакса-Теллера
55. Дипольная упругая поляризация (поляризуемость, температурная зависимость)
56. Диэлектрическая релаксация. Уравнение Дебая
57. Комплексная диэлектрическая проницаемость
58. Тангенс диэлектрических потерь
59. Диэлектрические потери при различных типах поляризации

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена:

1. Типичные свойства металлов. Классические модели газа свободных электронов Друде и Лорентца
2. Электронная проводимость, теплоемкость, теплопроводность металлов
3. Несостоятельность классических моделей
4. Статистика Ферми-Дирака для электронного газа
5. Уравнение Шредингера и волновые функции свободных электронов. Энергетические уровни и плотность электронных состояний
6. Температурная зависимость функции распределения Ферми-Дирака
7. Энергия Ферми. Поверхность Ферми
8. Электронная теплоемкость и ее сравнение с решеточной теплоемкостью
9. Модель металлической проводимости в квантовом приближении Зоммерфельда
10. Теплопроводность металлов. Закон Видемана-Франца
11. Отражение электромагнитных волн от металла. Плазменные колебания электронного газа
12. Теорема Блоха
13. Волновое уравнение для электрона в поле периодического потенциала
14. Модель почти свободных электронов
15. Энергетический спектр состояний сильно связанных электронов
16. Эффективная масса и ширина разрешенной зоны
17. Дифракция Брэгга для электронов на границе зоны Бриллюэна
18. Схема приведенных зон
19. Число энергетических уровней в зоне
20. Металлы, полуметаллы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения заполнения зон
21. Примеры зонных структур (алмаз, графит)
22. Строение поверхности Ферми и методы ее исследования (циклотронный резонанс, затухание ультразвука)
23. Эффект де Газа- ван Альфена
24. Динамика движения электронов. Электроны и дырки
25. Физическая интерпретация эффективной массы
26. Термоэлектронная эмиссия. Закон Ричардсона-Дэшмана
27. Электростатическое экранирование
28. Электрон-электронные столкновения
29. Движение электронов в металле в магнитном поле. Циклотронная частота
30. Статическое магнетосопротивление
31. Электрон-фононное взаимодействие в ковалентных кристаллах
32. Деформационный потенциал. Электрон-фононное взаимодействие в ионных кристаллах
33. Потенциал Фрелиха. Поляроны
34. Эффект Холла в металлах
35. Собственные полупроводники. Некристаллические полупроводники

36. Запрещенная зона
37. Фотопроводимость
38. Прямые и непрямые процессы поглощения фотонов
39. Экситоны
40. Тепловая и дрейфовая скорости электронов. Подвижность
41. Закон действующих масс
42. Донорные и акцепторные примеси
43. Модель водородоподобного атома для примесного центра
44. Электронная и дырочная проводимость
45. Температурная ионизация примесных центров
46. Методы определения знака носителей тока в полупроводниках (эффект Холла, термоэлектродвижущая сила)
47. Температурная зависимость проводимости в примесном полупроводнике
48. Барьер Шоттки
49. 48. Электронно-дырочные (p-n) переходы
50. Полупроводниковые гетероструктуры
51. Уравнения Максвелла для магнетиков
52. Напряженность и индукция магнитного поля
53. Магнитная восприимчивость. Намагниченность
54. Диа-, пара- и ферромагнетики
55. Диамагнетизм атомов. Прецессия Лармора
56. Формула Ланжевена. Электронный парамагнетизм. Закон Кюри
57. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм. Молекулярное поле.
58. Спонтанная намагниченность. Температурная зависимость магнитной восприимчивости ферромагнетиков (закон Кюри-Вейсса). Точка Кюри
59. Модель ферромагнетизма Гейзенберга. Обменное взаимодействие
60. Спиновые волны (магноны)
61. Домены. Кривая намагничивания ферромагнетиков в переменном поле. Коэрцитивная сила и гистерезис
62. Ферримагнетики. Антиферромагнетики. Точка Неля
63. Ядерный магнитный резонанс. Уравнения движения для ядерной намагниченности. Спин-решеточная релаксация
64. Уравнения Блоха. Ширина резонансной линии
65. Ферромагнитный резонанс
66. Электронный парамагнитный резонанс
67. Инфракрасная спектроскопия твердых тел
68. Поглощение ИК излучения на колебательных переходах
69. ИК спектры и микроскопические параметры полосы поглощения
70. Комбинационное рассеяние света (классическое описание)
71. Результаты квантовой теории КРС. Тензор КРС. Параметры колебаний из спектров КРС
72. Правила отбора для симметрии колебаний, активных в ИК и КРС
73. Методы классификации колебаний. Общий метод Багавантама. Метод позиционной симметрии
74. Зависимость спектра от механических напряжений. Гидростатическое давление
75. Определение структуры кристаллов по колебательным спектрам. Характеристические частоты колебаний в спектрах
76. Локальные колебания. Резонансное КРС
77. Гигантское (усиленное поверхностью) КРС (SERS)
78. Гиперкомбинационное рассеяние света (ГКР)
79. Особенности оптической спектроскопии наноструктур
80. Фононы в наноструктурах. Конфайнмент фононов. Поверхностные фононы
81. Сверхрешетки
82. Сложение зон
83. Фонон-фононное взаимодействие. Кубическая аангармоничность
84. Бифононы. Ферми-резонанс

## Примеры экзаменационных билетов.

### Пример 1.

1. Запрещенная зона
2. Домены. Кривая намагничивания ферромагнетиков в переменном поле. Коэрцитивная сила и гистерезис

### Пример 2.

1. Уравнения Блоха. Ширина резонансной линии
2. Напряженность и индукция магнитного поля

## Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 бала - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 бала - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 бала - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 бал - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## 5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности



При проведении устного дифференцированного зачета и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном дифференцированном зачете и экзамене не должен превышать одного астрономического часа.