

**Министерство науки и высшего образования РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

---

Направление подготовки/специальность: 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная


**Рабочая программа дисциплины**  
**ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА**

<b>Блок:</b>	<b>Блок 1 «Дисциплины (модули)»</b>
<b>Часть образовательной программы:</b>	<b>Часть, формируемая участниками образовательных отношений</b>
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	<b>Б1.Ч.08</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>7 семестр - 6;</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>216 часов</b>
<b>Лекции</b>	<b>7 семестр - 32 часа;</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>7 семестр - 48 часа;</b>
<b>Лабораторные работы</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Консультации</b>	<b>7 семестр - 2 часа;</b>
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>7 семестр - 133,5 часа;</b>
<b>в том числе на КП/КР</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Иная контактная работа</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>включая:</b>	
<b>Контрольная работа</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Экзамен</b>	<b>7 семестр - 0,5 часа;</b>

**Москва 2024**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Макаров П.Г.
	Идентификатор	R9a51899a-MakarovPG-4f257daf

П.Г. Макаров


**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Макаров П.Г.
	Идентификатор	R9a51899a-MakarovPG-4f257daf

П.Г. Макаров

Заведующий выпускающей  
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Пузина Ю.Ю.
	Идентификатор	Re86e9a56-Puzina-4d2acad1

Ю.Ю. Пузина

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** систематизация полученных при изучении базовых дисциплин знаний по основам физики твердого тела – строение и типы химических связей в твердых телах, электронная зонная теория твердых тел, динамика кристаллической решетки, теория электро- и теплопроводности, магнитные свойства твердых тел, физика полупроводников и сверхпроводимость, а также с теория упругости и плазменное состояние конденсированного вещества

### Задачи дисциплины

- изучение строения и типов химических связей в твердых телах;
- изучение электронная зонная теория твердых тел;
- изучение динамики кристаллической решетки;
- изучение теории упругости и фононы;
- изучение теории электро- и теплопроводности твердых тел;
- изучение магнитных свойств твердых тел;
- изучение физики полупроводников;
- изучение физических процессов в сверхпроводниках;
- приобретение навыков выполнения на этой основе инженерных расчетов для решения конкретных прикладных задач.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-2 Готов к расчетно-экспериментальному анализу особенностей процессов в наноразмерных системах	ИД-1 <sub>ПК-2</sub> Владеет основными методами и подходами, применяемыми при анализе работы наноразмерных систем	знать: - методы и подходы, применяемых при анализе твердых тел.  уметь: - оценивать параметры низкоразмерных твердотельных устройств.
ПК-3 Способен к разработке наноразмерных материалов и устройств	ИД-2 <sub>ПК-3</sub> Знает методы определения параметров эффективных низкоразмерных устройств и способен провести их оценку	знать: - основные свойства твердых тел и способы их применения в низкоразмерных устройствах.  уметь: - оценивать строение и типы химических связей в твердых телах.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике (далее – ОПОП), направления подготовки 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать Математика
- знать Физика (общая)
- знать Физика специальная
- знать Термодинамика
- знать Тепломассобмен

- знать Физика конденсированного состояния

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц, 216 часов.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания	
				Контактная работа							СР				
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль		
КПР	ГК	ИККП	ТК												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	Строение и типы химических связей в твердых телах	28	7	4	-	8	-	-	-	-	-	16	-	<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Строение и типы химических связей в твердых телах"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p> <p>[1], 111-148 [2], 5-12 [3], глава 1</p>	
1.1	Типы кристаллов	14		2	-	4	-	-	-	-	-	8	-		
1.2	Типы связей	14		2	-	4	-	-	-	-	-	8	-		
2	Электронный газ в кристаллах и зонная теория твердых тел	28		4	-	8	-	-	-	-	-	16	-		<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Электронный газ в кристаллах и зонная теория твердых тел"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p> <p>[1], 307-350 [2], 5-12 [3], глава 3</p>
2.1	Свободный электронный газ	14		2	-	4	-	-	-	-	-	8	-		
2.2	Периодическая зонная структура	14		2	-	4	-	-	-	-	-	8	-		
3	Динамика кристаллической решетки и фононы. Элементы теории упругости	34	7	6	-	8	-	-	-	-	-	20	-	<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Динамика кристаллической решетки и фононы. Элементы теории упругости"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p> <p>[1], 171-198</p>	
3.1	Кристаллическая решетка и фононы	17		3	-	4	-	-	-	-	-	10	-		
3.2	Статистика и	17		3	-	4	-	-	-	-	-	10	-		

	плотность состояний фононов											[2], 19-29	
4	Теория электро- и теплопроводности твердых тел	38	6	-	12	-	-	-	-	-	20	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Теория электро- и теплопроводности твердых тел" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 249-294 [2], 36-56, 64-78 [4], 32-42, 51-58
4.1	Связь электро- и теплопроводности	19	3	-	6	-	-	-	-	-	10	-	
4.2	Магнитные свойства твердых тел	19	3	-	6	-	-	-	-	-	10	-	
5	Физика полупроводников. Электроны и дырки	28	8	-	6	-	-	-	-	-	14	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Физика полупроводников. Электроны и дырки" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 419-464 [2], 77-92
5.1	Физические явления в полупроводниках	28	8	-	6	-	-	-	-	-	14	-	
6	Физические процессы в сверхпроводниках	24	4	-	6	-	-	-	-	-	14	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Физические процессы в сверхпроводниках" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 171-198 [2], 19-29 [3], глава 5
6.1	Сверхпроводники	24	4	-	6	-	-	-	-	-	14	-	
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	Всего за семестр	216.0	32	-	48	-	2	-	-	0.5	100	33.5	
	Итого за семестр	216.0	32	-	48		2		-	0.5		133.5	

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПП – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

## 3.2 Краткое содержание разделов

### 1. Строение и типы химических связей в твердых телах

#### 1.1. Типы кристаллов

Кристаллические и аморфные тела. Кристаллы инертных газов. Ионные кристаллы и связи. Ковалентные кристаллы.

#### 1.2. Типы связей

Металлическая связь. Водородные связи. Атомные радиусы.

### 2. Электронный газ в кристаллах и зонная теория твердых тел

#### 2.1. Свободный электронный газ

Статистика Ферми-Дирака. Плотность числа состояний. Теплоемкость электронного газа. Модель почти свободных электронов. Блоховские волны.

#### 2.2. Периодическая зонная структура

Металлы. Полуметаллы. Диэлектрики. Полупроводники.

### 3. Динамика кристаллической решетки и фононы. Элементы теории упругости

#### 3.1. Кристаллическая решетка и фононы

Колебания кристаллической решетки: один и два атома в ячейке. Акустические и оптические моды в кристалле. Фононы в конденсированном теле и их основные свойства.

#### 3.2. Статистика и плотность состояний фононов

Теплоемкость кристаллической решетки. Элементы теории упругости.

### 4. Теория электро- и теплопроводности твердых тел

#### 4.1. Связь электро- и теплопроводности

Электропроводность электронного газа и закон Ома. Теплопроводность электронов и закон Видемана-Франца. Фононная теплопроводность и механизмы рассеяния. Общая теплопроводность кристаллов.

#### 4.2. Магнитные свойства твердых тел

Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм.

### 5. Физика полупроводников. Электроны и дырки

#### 5.1. Физические явления в полупроводниках

Собственная проводимость полупроводников. Закон действующих масс. Электроны и дырки в полупроводниках. Перенос заряда и энергии в полупроводниках. Поглощение и отражение света в полупроводниках. Транзисторный эффект.

### 6. Физические процессы в сверхпроводниках

#### 6.1. Сверхпроводники

Сверхпроводники и их свойства. Эффект Мейснера. Сверхпроводники первого рода. Термодинамика перехода в сверхпроводящее состояние. Уравнение Лондонов.

Микроскопическая модель Бардина-Купера-Шриффера. Теория Гинзбурга Ландау и сверхпроводники второго рода. Вихри Абрикосова.

### **3.3. Темы практических занятий**

1. Магнитные свойства твердых тел;
2. Теория Гинзбурга Ландау и сверхпроводники второго рода. Вихри Абрикосова;
3. Сверхпроводники первого рода. Термодинамика перехода в сверхпроводящее состояние;
4. Поглощение и отражение света в полупроводниках;
5. Электропроводность электронного газа и закон Ома;
6. Электроны и дырки в полупроводниках;
7. Задачи теории упругости;
8. Фононы в твердых телах;
9. Электроны в кристаллических решетках;
10. Фононная теплопроводность и механизмы рассеяния;
11. Кристаллографический анализ и типы кристаллических решеток.

### **3.4. Темы лабораторных работ**

не предусмотрено

### **3.5 Консультации**

#### *Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)*

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Строение и типы химических связей в твердых телах"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Электронный газ в кристаллах и зонная теория твердых тел"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Динамика кристаллической решетки и фононы. Элементы теории упругости"
4. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Теория электро- и теплопроводности твердых тел"
5. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Физика полупроводников. Электроны и дырки"
6. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Физические процессы в сверхпроводниках"

### **3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ**

Курсовой проект/ работа не предусмотрены



### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)						Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	3	4	5	6	
<b>Знать:</b>								
методы и подходы, применяемых при анализе твердых тел	ИД-1пк-2				+	+	+	Контрольная работа/Строение и типы химических связей в твердых телах Контрольная работа/Фононы в твердом теле и перенос тепла
основные свойства твердых тел и способы их применения в низкоразмерных устройствах	ИД-2пк-3	+	+	+				Контрольная работа/Строение и типы химических связей в твердых телах Контрольная работа/Фононы в твердом теле и перенос тепла
<b>Уметь:</b>								
оценивать параметры низкоразмерных твердотельных устройств	ИД-1пк-2				+	+	+	Контрольная работа/Электроны в кристаллических решетках Контрольная работа/Электроны и дырки в полупроводниках
оценивать строение и типы химических связей в твердых телах	ИД-2пк-3	+	+	+				Контрольная работа/Электроны в кристаллических решетках Контрольная работа/Электроны и дырки в полупроводниках

#### **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

##### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

7 семестр

Форма реализации: Проверка задания

1. Строение и типы химических связей в твердых телах (Контрольная работа)
2. Фононы в твердом теле и перенос тепла (Контрольная работа)
3. Электроны в кристаллических решетках (Контрольная работа)

Форма реализации: Устная форма

1. Электроны и дырки в полупроводниках (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

##### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

*Экзамен (Семестр №7)*

Итоговая оценка по курсу выставляется на основе оценки за промежуточную аттестацию. Возможен случай, когда в силу значительно отличающейся текущей оценки может быть применен повышающий или понижающий коэффициент

В диплом выставляется оценка за 7 семестр.

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

#### **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

##### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Синкевич, О. А. Физика твердого тела : учебное пособие по курсам "Физика твердого тела", "Термодинамика", "Статистическая физика" по направлению "Теплофизика" / О. А. Синкевич, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2017 . – 244 с. - ISBN 978-5-7046-1817-1 .  
<http://elib.mpei.ru/elib/view.php?id=9682>;
2. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела : пер. с англ. / Ч. Киттель . – 2-е изд., стер перепеч. с изд. 1978г . – М. : МедиаСтарт, 2006 . – 792 с.;
3. Дмитриев, А. С. Основы криофизики конденсированных систем : учебное пособие по курсу "Криофизика", по направлению "Техническая физика" / А. С. Дмитриев, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Изд-во МЭИ, 2006 . – 132 с. - ISBN 5-903072-78-X .;
4. Дмитриев А. С.- "Введение в нанотеплофизику", (2-е изд.), Издательство: "Лаборатория знаний", Москва, 2020 - (793 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/135485>.

##### **5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:**

1. Office / Российский пакет офисных программ;
2. Windows / Операционная система семейства Linux.

### 5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
3. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
4. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
5. Национальная электронная библиотека - <https://rusneb.ru/>
6. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
7. Портал открытых данных Российской Федерации - <https://data.gov.ru>
8. База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ - <https://rosmintrud.ru/opendata>
9. База открытых данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ - <http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>
10. База открытых данных Министерства экономического развития РФ - <http://www.economy.gov.ru>
11. База открытых данных Росфинмониторинга - <http://www.fedsfm.ru/opendata>
12. Электронная открытая база данных "Polpred.com Обзор СМИ" - <https://www.polpred.com>
13. Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование» - <https://openedu.ru>
14. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии - <http://protect.gost.ru/>
15. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>

### 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Помещения для самостоятельной работы	М-411/1, Компьютерный класс	стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, компьютер персональный
Помещения для консультирования	М-423/1, Аудитория каф. "НТ"	стул, стол письменный
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	М-407/1, Кладовая	стеллаж для хранения инвентаря, стеллаж для хранения книг, инвентарь специализированный



## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Физика твердого тела

(название дисциплины)

#### 7 семестр

**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:**

КМ-1 Строение и типы химических связей в твердых телах (Контрольная работа)

КМ-2 Фононы в твердом теле и перенос тепла (Контрольная работа)

КМ-3 Электроны в кристаллических решетках (Контрольная работа)

КМ-4 Электроны и дырки в полупроводниках (Контрольная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	4	8	11	15
1	Строение и типы химических связей в твердых телах					
1.1	Типы кристаллов		+	+	+	+
1.2	Типы связей		+	+	+	+
2	Электронный газ в кристаллах и зонная теория твердых тел					
2.1	Свободный электронный газ		+	+	+	+
2.2	Периодическая зонная структура		+	+	+	+
3	Динамика кристаллической решетки и фононы. Элементы теории упругости					
3.1	Кристаллическая решетка и фононы		+	+	+	+
3.2	Статистика и плотность состояний фононов		+	+	+	+
4	Теория электро- и теплопроводности твердых тел					
4.1	Связь электро- и теплопроводности		+	+	+	+
4.2	Магнитные свойства твердых тел		+	+	+	+
5	Физика полупроводников. Электроны и дырки					
5.1	Физические явления в полупроводниках		+	+	+	+
6	Физические процессы в сверхпроводниках					

6.1	Сверхпроводники	+	+	+	+
	Вес КМ, %:	15	25	25	35