

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО НТС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/04-577

от 27.04.2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ 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
7	3	108	36	18	0	54	0	3
Итого	3	108	36	18	0	9	54	0

АННОТАЦИЯ

изложены основные разделы физики твердого тела, изучение которых предусмотрено программой соответствующего курса и специализацией обучающихся групп (каф. 25)

Последовательно рассмотрены элементы структуры кристаллографии, способы определения кристаллических структур, различные типы связи в твердых телах, дефекты структуры. Описаны колебания атомов кристаллической решетки и тепловые свойства кристаллов. Обосновано использование понятия «фонон». Подробно обсуждается зонная теория кристаллов и на её основе электрические свойства металлов, полупроводников и диэлектриков. Рассмотрены также магнитные, оптические свойства твердых тел и свойства диэлектриков. В связи с актуальностью, бурным развитием и практической значимостью кратко изложены основы физики жидких кристаллов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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, показать роль фононов и кристаллической решетки в свойствах твердых тел.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Данная дисциплина является одной из основных при подготовке по профилю физики 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 знать дифференциальное и интегральное исчисление, тензорный и векторный анализ, статистику и термодинамику, электричество и магнетизм, в том числе в материальных средах. Необходимо ориентироваться в задачах квантовой механики и статистической физики и пользоваться соответствующими формулами.

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	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,

<p>математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования</p>	<p>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</p>
--	---

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
<p>проектный</p>		<p>ПК-4 [1] - Способен к расчету и проектированию элементов систем в соответствии с техническим заданием, требованиями безопасности и принципами CDIO</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 24.028</p>	<p>З-ПК-4[1] - знать типовые методики планирования и проектирования систем ; У-ПК-4[1] - уметь использовать стандартные средства автоматизации проектирования;; В-ПК-4[1] - владеть методами расчета и проектирования деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием , требованиями безопасности и принципами CDIO</p>
<p>участие в разработке новых алгоритмов и компьютерных программ для научно-исследовательских и прикладных целей; выбор методов и подходов к решению поставленной научной проблемы, формулировка математической модели явления, аналитические и численные расчеты; изучение и анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования, сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов</p>	<p>компьютерные алгоритмы и программы, техническая документация</p>		

вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий; разработка проектной и рабочей технической документации: плана работ, технического задания и научно-технического отчета.			
---	--	--	--

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
-----------------------------	-------------------------	------------------------------------

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>7 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	18/9/0		25	КИ-8	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4
2	Часть 2	9-16	18/9/0		25	КИ-16	3-ОПК-1, У-

							ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		36/18/0		50		
	Контрольные мероприятия за 7 Семестр				50	3	3-ОПК-1, У-ОПК-1, В-ОПК-1, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4

* – 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>7 Семестр</i>	36	18	0
1-8	Часть 1	18	9	0
1 - 2	Тема 1. Кристаллическое состояние вещества. Решётка Браве, вектора трансляции, постоянная решётки, элементарные ячейки, ячейка Вигнера-Зейтца. Кристаллические сингонии (2D и 3D). Атомные плоскости, индексы Миллера. Группы симметрии, оси вращения. Плотность упаковки, коэффициент заполнения,	Всего аудиторных часов		
		5	3	0
		Онлайн		
		0	0	0

	координационные числа.			
3 - 4	Тема 2. Методы исследования кристаллической решётки. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов; особенности каждого варианта. Формула Вульфа-Брэгга, формула Лауэ, обратная решётка. Тормозное и синхротронное излучение.	Всего аудиторных часов		
		5	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
5 - 6	Тема 3. Дефекты кристаллической решётки. Вакансии, междоузлия, дефекты Шоттки, пары Френкеля, F-центры (центры окраски). Дислокации, винтовые дислокации, дефекты упаковки, двойники. Термодинамика дефектов: концентрация и диффузия	Всего аудиторных часов		
		4	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
7 - 8	Тема 4. Взаимодействие между атомами в твердых телах. Типы связей: ионная, ковалентная, металлическая, молекулярная. Потенциал Леннарда-Джонса, решёточные суммы, константа Маделунга	Всего аудиторных часов		
		4	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-16	Часть 2	18	9	0
9 - 10	Тема 5. Кванты колебаний кристаллической решётки (фононы). Закон дисперсии фононов в одноатомной цепочке. Закон дисперсии фононов в двухатомной цепочке. Акустические и оптические ветви колебаний, число ветвей, скорость звука. Типичный диапазон энергий фононов. Роль фононов в свойствах твердых тел.	Всего аудиторных часов		
		5	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 12	Тема 6. Ангармонизм. Тепловое расширение, линейный и объёмный коэффициенты теплового расширения, порядок величин. Теплопроводность кристаллической решетки, взаимодействие фононов, длина пробега.	Всего аудиторных часов		
		4	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
13 - 14	Тема 7. Квантовая теория теплоёмкости твердых тел. Закон Дюлонга и Пти. Экспериментальные графики теплоёмкости $C(T)$. Статистика фононов. Распределение Бозе-Эйнштейна. Модель Эйнштейна теплоёмкости, успехи и ограничения. Теория Дебая: частота и температура Дебая, порядок величин, плотность квантовых состояний, поведение $C(T)$ при высокой и низкой температуре.	Всего аудиторных часов		
		5	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
15 - 16	Тема 8. Форма линии рассеяния. Тепловое уширение, фактор Дебая-Валлера, эффект Мёссбауэра.	Всего аудиторных часов		
		4	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 ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>7 Семестр</i>
1 - 4	Строение твердых тел. 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.
5 - 8	Тепловые свойства твердых тел. 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.
9 - 12	Элементы физической статистики. Модель свободных электронов и ее применение к металлам. Классическая электронная теория металлов. Квантовая теория электронов в металле. Теплоемкость металлов (квантовый вариант). Теплопроводность металлов
13 - 15	Зонная теория твердых тел. 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

Используются презентации, обсуждения последних научных работ, новые модели в физике конденсированного состояния. Обязательным условием успешного освоения

дисциплины является самостоятельная работа студентов, выполнение индивидуальных заданий, работа с литературой.

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-16
	У-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-16
	В-ОПК-1	З, КИ-8, КИ-16
ПК-4	З-ПК-4	З, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-4	З, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-4	З, КИ-8, КИ-16

Шкалы оценки образовательных достижений

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

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

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

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

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, 2017
3. ЭИ Ш 18 Физика полупроводников : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022
4. 539.2 К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.1 Целый и дробный квантовые эффекты Холла, , Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
5. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, , : МИФИ, 2007
6. 539.2 Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : , И. Н. Николаев, А. И. Маймистов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2009
7. ЭИ Н63 Сборник задач по курсу "Физика твердого тела" : , И. Н. Николаев, А. И. Маймистов, Москва: МИФИ, 2009
8. ЭИ К12 Теоретическая физика твердого тела : , Ю. М. Каган, В. Н. Собакин, С. В. Ивлиев, М.: МИФИ, 2009

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 537 А71 Введение в теорию полупроводников : Учебное пособие для вузов, А. И. Ансельм, Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2008
2. 621.38 Г95 Твердотельная электроника : учебное пособие для вузов, В. А. Гуртов, Москва: Техносфера, 2008
3. 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

Необходимо усвоить основные сведения о кристаллическом состоянии твердого тела, включая строение твердых тел, классификацию кристаллов (металлы, диэлектрики, полупроводники) и виды связей в кристаллах (ионные кристаллы ионная (гетерополярная) связь); атомные кристаллы (ковалентная (гомеополярная) связь); металлические кристаллы (металлическая связь); молекулярные кристаллы (водородная связь)). Необходимо четко усвоить понятие «фонон», для чего надо понять рассматриваемое на лекциях описание тепловых свойств твердых тел, понять, какие силы действуют между частицами твердого тела и какими законами описывается их поведение (для этого потребуются вспомнить ряд сведений из общей физики, изученной ранее), четко усвоить квантово-механическое описание фонона. Необходимо осмыслить характер теплового движения в кристаллах, колебания цепочки одинаковых атомов (нормальные колебания решетки, спектр нормальных колебаний) в гармоническом приближении; колебания в цепочке неодинаковых атомов в гармоническом приближении; акустические и оптические колебания решетки; роль ангармонизма).

При изучении теплоемкости твердых тел в моделях Эйнштейна и Дебая, следует уделить внимание основным различиям этих моделей, понять физический смысл температуры Дебая и частоты Дебая. Следует обратить внимание на то, какая из моделей наиболее четко описывает экспериментальные результаты и почему.

Фононная подсистема далее будет существенна для изучения следующих дисциплин специализации, объяснении свойств металлов и полупроводников, а также возникновения явления сверхпроводимости.

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Необходимо дать студентам основные сведения о кристаллическом состоянии твердого тела, включая строение твердых тел, классификацию кристаллов (металлы, диэлектрики, полупроводники) и виды связей в кристаллах (ионные кристаллы ионная (гетерополярная) связь); атомные кристаллы (ковалентная (гомеополярная) связь); металлические кристаллы (металлическая связь); молекулярные кристаллы (водородная связь)). В связи с необходимостью введения понятия «фонон», надо описать тепловые свойства твердых тел (силы, действующие между частицами твердого тела, характер теплового движения в

кристаллах, колебания цепочки одинаковых атомов (нормальные колебания решетки, спектр нормальных колебаний) в гармоническом приближении; колебания в цепочке неодинаковых атомов в гармоническом приближении; акустические и оптические колебания решетки; роль ангармонизма) и на этой основе ввести квантово-механическое описание фонона. При рассмотрении теплоемкости твердых тел следует уделить внимание подробному описанию моделей Эйнштейна и Дебая, объяснить учащимся физический смысл температуры и частоты Дебая.

Кроме этого, необходимо включить элементы статистической физики: подробно разобрать функции распределения Больцмана, Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Помимо использования в данной дисциплине, далее они потребуются при изучении электронных свойств: в физике металлов, полупроводников и сверхпроводников в соответствующих дисциплинах специализации.

Автор(ы):

Ананьин Олег Борисович, д.ф.-м.н., с.н.с.