

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра физики полупроводников**



**Рабочая программа дисциплины
ТЕОРИЯ ТВЁРДОГО ТЕЛА 1**

направление подготовки: **03.03.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	72	32	32		6			2		
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 66 часов										
Компетенции ПК-1										

Ответственный за образовательную программу
д.ф.-м.н., проф.

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	3
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	4
5. Перечень учебной литературы.	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	7

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Основная цель курса состоит в том, чтобы дать представление о физических свойствах твердых тел, включая симметрию, зонную структуру и спектр элементарных возбуждений (в т.ч. фононы, электроны и дырки, экситоны, поляроны).

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ПК-1 Способность использовать специализированные знания в области физики при построении теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p>ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p> <p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>Знать основной математический аппарат, который используется для освоения теории твердого тела, основные закономерности формирования физических законов; свойства и структуру физических процессов, происходящих в различных средах.</p> <p>Уметь подбирать математический аппарат для решения конкретной физической задачи; решать типичные задачи, объяснять причинно-следственные связи физических процессов.</p> <p>Владеть базовым аппаратом теории твердого тела, включая методы расчета закона дисперсии колебаний атомов решетки, энергетического спектра электрона в идеальном кристалле и энергии локальных уровней дефектов кристаллической решетки.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Учебный курс «Теория твёрдого тела 1» реализуется в осеннем семестре 4-го курса для бакалавров, обучающихся по направлению **03.03.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика»**. Курс является основой понимания физических процессов в полупроводниках и полупроводниковых структурах, необходимой для изучения всех специальных курсов кафедры физики полупроводников: «Физика полупроводниковых тонких слоев и низкоразмерных систем-1,2», «Кристаллофизика полупроводников-1,2» (идущих параллельно с настоящим курсом в рамках бакалавриата), а также курсами «Радиационная физика», «Оптические процессы в полупроводниках», «Квантовый транспорт в низкоразмерных структурах», читаемыми в рамках магистратуры кафедры физики полупроводников.

3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	72	32	32		6			2		
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 66 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, зачёт.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: контрольные работы;
- промежуточная аттестация: зачёт.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 6 часов;
- промежуточная аттестация (зачёт) – 2 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, зачёт) составляет 66 часов.

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

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	10
1.	Фононный спектр кристалла	1–2	8	4	4		
2.	Теплоемкость	3	4	2	2		

3.	Ангармонизм колебаний атомов	4-5	6	4	2		
4.	Электрон в периодическом поле	6-7	8	4	4		
5.	Приближения слабой и сильной связи	8	5	2	2	1	
6.	Спектр электронов вблизи экстремумов энергии	9-10	9	4	4	1	
7.	Локализованные состояния электронов в кристаллах	11-12	8	4	4		
8.	Экранирование статическое и динамическое	13	4	2	2		
9.	Плазменные колебания	14-15	8	4	4		
10.	Диэлектрическая проницаемость полупроводника. Переход Мотта	16	10	2	4	4	
11.	Зачет	17	2				2
Всего			72	32	32	6	2

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

1. Динамика решетки. **(10 часов)**
 - 1.1. Фононный спектр кристалла. Локальные моды.
 - 1.2. Теплоемкость. Предельные случаи. Модели.
 - 1.3. Роль ангармонизма; линейный член в теплоемкости и температурное расширение.
2. Электронные спектры твердых тел. **(14 часов)**
 - 2.1. Электрон в периодическом поле. Теорема Блоха. Квазиимпульс.
 - 2.2. Приближения слабой и сильной связи. Эффективная масса.
 - 2.3. Спектр электронов вблизи экстремумов энергии. Случай вырождения, k-p метод.
 - 2.4. Локализованные состояния электронов в кристаллах. Поверхностные уровни, примесные состояния; функции Ванье, Поляроны.
3. Электрон-электронное взаимодействие. **(8 часов)**
 - 3.1. Экранирование статическое и динамическое.
 - 3.2. Плазменные колебания, затухание Ландау.
 - 3.3. Диэлектрическая проницаемость полупроводника.
 - 3.4. Переход Мотта, вигнеровская кристаллизация.

Программа практических занятий (32 часа)

1. Симметрия кристаллов. **(6 часов)**
 - 1.1. Трансляционная симметрия. Базис, кристаллическая структура, примитивная ячейка, ячейка Вигнера — Зейтца. Операции симметрии, оси симметрии и их совместимость с трансляционной симметрией. Решетки Браве. Положение и ориентация плоскостей в кристаллах, индексы Миллера. Кристаллические группы и классы.
2. Энергия связи твердого тела. **(4 часа)**
 - 2.1. Типы связи. Решеточные суммы.
3. Фононы и колебания решетки. **(8 часов)**
 - 3.1. Колебания идеальной решетки. Закон дисперсии, фазовая и групповая скорости. Граничные условия и плотность числа колебаний.
 - 3.2. Колебания неидеальной решетки. Дефект массы, дефект связи, локальные моды, отражение волн.

- 3.3. Колебания решетки с базисом. Оптические и акустические ветви. Относительные смещения атомов в пределе длинных и коротких волн. Вырожденный случай.
4. Теплоемкость решетки. **(4 часа)**
- 4.1. Плотность состояний в одно-, двух- и трехмерном случае. Расчет теплоемкости в моделях классической, Эйнштейна и Дебая для решеток различных типов. Теплоемкость ангармонического осциллятора.
5. Общие представления о зонном спектре кристаллов. **(6 часов)**
- 5.1. Модель Кронига — Пенни, константы деформационного потенциала.
- 5.2. Зоны Бриллюэна. Поверхность Ферми в представлении расширенных и приведенных зон (на примере двумерных решеток). Модель почти свободных электронов.
6. Приближение сильной связи. **(4 часа)**
- 6.1. Два близко расположенных атома. Одномерная цепочка атомов. Одномерная цепочка с базисом. Поверхностное состояние в оборванной цепочке. Двумерные и трехмерные решетки.

Самостоятельная работа студентов (6 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к контрольным работам	3
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	3

5. Перечень учебной литературы.

1. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М. Мир, 1974. (37 экз.)
2. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М. Наука, 1978. (33 экз.)
3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М. Наука 1978. (51 экз.)
4. Л. С. Брагинский, Л. И. Магарилл, М. М. Махмудиан, А.Г. Погосов, А.В. Чаплик, М.В. Энтин. Сборник задач по теории твердого тела. НГУ. 2013., ISBN 978-5-4437-0199-8 (13 экз.)
5. Киттель Ч. Квантовая теория твердых тел. М. "Наука" 1967 (9 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

6. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М. Мир, 1974.
7. Киттель Ч. Квантовая теория твердых тел. М. "Наука" 1967.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

Интернет-ресурсы:

1. Электронный архив Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе: «Новые полупроводниковые материалы: Характеристики и свойства» - URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/rintroduction.html>

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в виде вопросов на знание материала предыдущих занятий и проведения контрольных работ.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Промежуточная аттестация осуществляется в форме зачёта, который проводится в конце семестра в устной форме. Учитываются также результаты контрольных работ. Положительная оценка («зачёт») по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области теории твёрдого тела.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.	Знать основной математический аппарат, который используется для освоения теории твёрдого тела, основные закономерности формирования физических законов; свойства и структуру физических процессов, происходящих в различных средах.	Проведение контрольных работ, зачет.
ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области	Уметь подбирать математический аппарат для решения конкретной физической задачи; решать типичные задачи, объяснять причинно-следственные связи физических процессов.	Проведение контрольных работ, зачет.
ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	Владеть базовым аппаратом теории твёрдого тела, включая методы расчета закона дисперсии колебаний атомов решетки, энергетического спектра электрона в идеальном кристалле и энергии локальных уровней дефектов кристаллической решетки.	Проведение контрольных работ, зачет.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Теория твёрдого тела 1».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (не зачтено)	Пороговый уровень (зачтено)	Базовый уровень (зачтено)	Продвинутый уровень (зачтено)

обучения	освоения компетенций)				
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Пример контрольной работы

1. Показать, что кристалл, имеющий четыре оси третьего порядка, образующие попарно четырехгранные углы, есть кристалл с кубической решеткой.
2. Показать, что не может существовать простая пространственная решетка с гексагональной плотной упаковкой.
3. Найти закон дисперсии для поперечных колебаний плоской квадратной решетки (период решетки, упругие константы и масса атомов известны).
4. Найти $E(k_x, k_y)$ для электрона в простой треугольной решетке в приближении сильной связи (ближайших соседей). Как изменится ответ, если учесть соседей, следующих за ближайшими.
5. Найти энергию локального уровня в одномерной цепочке δ -функций с вакансией:

$$U(x) = -g \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x + n \cdot a), \quad n \neq 0.$$

Примерные вопросы на зачет:

1. Фононные спектры кристаллов.

2. Кинетическое уравнение в магнитном поле. Случаи слабого и сильного полей.
3. Локальные моды колебаний в решетке
4. Эффект Холла в одно- и двухзонном приближении.
5. Теплоемкость кристаллической решетки. Предельные случаи, модели.
6. Магнетосопротивление. и одно- и двухзонная модели.
7. Влияние анигармоничности на теплоемкость решетки
8. Диамагнетизм свободных электронов.
9. Тепловое расширение твердых тел.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Теория твёрдого тела 1»
по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного