

**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 2**

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
8	108	32	32		22	18	2			2
Всего 108 часов / 3 зачётные единицы, из них: - контактная работа 68 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. ....	7
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. ....	8

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

Цели курса – дать представление о кинетических явлениях в твердых телах, включая тепло- и электропроводность, магнетоэлектрические и оптические явления.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<b>ПК-1</b> 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><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p><b>ПК 1.2</b> Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p> <p><b>ПК 1.3</b> Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p><b>Знать</b> основной математический аппарат, который используется для освоения теории кинетических явлений, основные представления о типах фононных и электронных спектров кристалла;</p> <p>методы описания квазичастиц в твёрдом теле, включая экситоны, плазмоны, поляроны и поляритоны.</p> <p><b>Уметь</b> пользоваться методами расчёта зонных структур; решать задачи по теории равновесных и кинетических явлений в твёрдом теле.</p> <p><b>Владеть</b> базовым аппаратом теории твердого тела, включая методы расчета транспортной длины свободного пробега, сопротивления образца четырехточечным методом, коэффициента Холла, концентрации и подвижности носителей заряда по зависимости сопротивления двумерного электронного газа от магнитного поля.</p>

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Учебный курс «Теория твёрдого тела 2» реализуется в весеннем 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
8	108	32	32		22	18	2			2
Всего 108 часов / 3 зачётные единицы, из них: - контактная работа 68 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, консультации, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

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

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 22 часа;
- промежуточная аттестация (самостоятельная подготовка к экзамену, консультации, экзамен) – 22 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, консультации, экзамен) составляет 68 часов.

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

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 академических часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (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.	Кинетическое уравнение Больцмана	1–2	10	4	4	2	
2.	Электро- и теплопроводность	3–4	10	4	4	2	
3.	Механизмы рассеяния	5	6	2	2	2	
4.	Фоновая теплопроводность	6	6	2	2	2	
5.	Пределы слабого и сильного магнитного. Контрольная работа.	7–8	9	4	4	1	
6.	Эффект Холла	9	5	2	2	1	
7.	Магнетосопротивление	10	6	2	2	2	
8.	Кинетические коэффициенты в классически сильных магнитных полях	11	6	2	2	2	
9.	Квантовые гальваномагнитные эффекты.	12	6	2	2	2	
10.	Решеточное поглощение и комбинационное рассеяние	13	6	2	2	2	
11.	Поглощение свободными носителями. Контрольная работа.	14	6	2	2	2	
12.	Межзонное, экситонное и примесное поглощение	15-16	10	4	4	2	
13.	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18				18
14	Консультация		2				2
15	Экзамен		2				2
<b>Всего</b>			<b>108</b>	<b>32</b>	<b>32</b>	<b>22</b>	<b>22</b>

### Программа и основное содержание лекций (32 часа)

1. Кинетические эффекты в магнитном поле.
  - 1.1. Уравнение Больцмана, пределы слабого и сильного магнитного поля. **(4 часа)**
  - 1.2. Эффект Холла, одно – и двухзонный случаи. **(4 часа)**
  - 1.3. Магнетосопротивление. **(4 часа)**
  - 1.4. Кинетические коэффициенты в классически сильных магнитных полях. **(4 часа)**
  - 1.5. Квантовые гальваномагнитные эффекты. **(4 часа)**
2. Оптические явления в твердых телах.
  - 2.1. Решеточное поглощение и комбинационное рассеяние. Поляритоны. **(4 часа)**
  - 2.2. Поглощение свободными носителями. **(4 часа)**

2.3. Межзонное поглощение, прямые и непрямые переходы; экситоны; переходы примесь-зона. (4 часа)

### Программа практических занятий (32 часа)

1. Кинетические явления в твердых телах.
  - 1.1. Кинетическое уравнение Больцмана в слабом электрическом поле. Формула Друде. Остаточная проводимость металлов. Соотношение Эйнштейна. (4 часа)
  - 1.2. Кинетическое уравнение при наличии градиента температуры. Симметрия кинетических коэффициентов. Закон Видемана — Франца. Термоэдс, формула Мотта. (4 часа)
2. Гальваномагнитные явления.
  - 2.1. Кинетическое уравнение в слабом магнитном поле. Эффект Холла. Метод ван дер Пау. Случай двух групп носителей заряда, положительное магнетосопротивление. (4 часа)
3. Контрольные работы. (4 часа)
4. Квантовые эффекты в проводимости.
  - 4.1. Пределы применимости квазиклассики, оценки. (4 часа)
  - 4.2. Сильные магнитные поля. Уровни Ландау, кратность вырождения. Осцилляции Шубникова — де Гааза. (4 часа)
  - 4.3. Слабая локализация, отрицательное магнетосопротивление. Подавление квантовой поправки к проводимости магнитным полем. (4 часа)
5. Длинноволновые оптические колебания. Инфракрасное поглощение.
  - 5.1. Формула Борна. Локальное поле в кристалле (поле Лоренца). Диэлектрическая проницаемость ионного кристалла. Нули и полюсы, соотношения Лиддейна — Сакса — Теллера. Распространение света в ионном кристалле, поляритоны. (4 часа)

### Самостоятельная работа студентов (40 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к контрольным работам	11
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	11
Подготовка к экзамену	18

#### 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*

Итоговая оценка по курсу выставляется после устного экзамена с учётом оценок за работу в семестре и результатов контрольных работ. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Положительная оценка 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. Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Наличие оценки «неудовлетворительно» за работу на практических занятиях или за обе контрольные работы означает, что студент не может получить итоговую оценку выше «удовлетворительно». Любая другая комбинация оценок позволяет студенту получить оценку «хорошо» или «отлично», при этом средняя из трех вышеназванных оценок учитывается в качестве предварительной. Ее увеличение требует не только ответа на вопросы билета, но и ответов на дополнительные вопросы и решения задач: два вопроса для увеличения оценки на один балл и два вопроса и задача для увеличения оценки на два балла. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

#### Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
<b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.	<b>Знать</b> основной математический аппарат, который используется для освоения теории кинетических явлений, основные представления о типах фононных и электронных спектров кристалла; методы описания квазичастиц в твёрдом теле, включая экситоны, плазмоны, поляроны и поларитоны.	Проведение контрольных работ, экзамен.



<p><b>ПК 1.2</b> Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области</p>	<p><b>Уметь</b> пользоваться методами расчёта зонных структур; решать задачи по теории равновесных и кинетических явлений в твёрдом теле.</p>	<p>Проведение контрольных работ, экзамен.</p>
<p><b>ПК 1.3</b> Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p><b>Владеть</b> базовым аппаратом теории твердого тела, включая методы расчета транспортной длины свободного пробега, сопротивления образца четырехточечным методом, коэффициента Холла, концентрации и подвижности носителей заряда по зависимости сопротивления двумерного электронного газа от магнитного поля.</p>	<p>Проведение контрольных работ, экзамен.</p>

## 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Теория твёрдого тела 2».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
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 задачи 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

- Вычислить транспортную длину свободного пробега по рассеянию на хаотически расположенных упруго рассеивающих шарах радиуса  $a$  с концентрацией  $n_i$ .
- Сопrotивление образца из тонкой пленки проводника (толщиной  $d$ ) измеряется четырехзондовым методом,  $R_{ij,kl} = U_{kl}/I_{ij}$  ( $i, j, k, l$  — номера контактов, расположенных на периферии образца). Показать, что для образца произвольной формы справедливо тождество:

$$\exp\left(-\pi \frac{d}{\rho} R_{12,34}\right) + \exp\left(-\pi \frac{d}{\rho} R_{23,41}\right) = 1,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление проводника (контакты пронумерованы по кругу по часовой стрелке).

3. Показать, что в слабых магнитных полях для двух типов носителей заряда с концентрациями  $n, p$  и подвижностями  $\mu_e, \mu_h$  коэффициент Холла

$$R_H = \frac{1}{ec} \frac{p\mu_h^2 - n\mu_e^2}{(p\mu_h - n\mu_e)^2}.$$

4. По заданной зависимости сопротивления образца с двумерным электронным газом от магнитного поля определить концентрацию и подвижность носителей заряда, а также время релаксации фазы волновой функции электрона

### Примерные вопросы на экзамен

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 ангармоничности на теплоемкость решетки
8. Диамагнетизм свободных электронов.
9. Тепловое расширение твердых тел.
10. Кинетическое уравнение Больцмана. Время релаксации.
11. Локализованные состояния в кристалле. Поверхностные уровни.
12. Электронная теплопроводность.
13. Ангармоничность. Линейный член в теплоемкости.
14. Решеточное поглощение ИК излучения.
15. Метод сильной связи.
16. Фононная теплопроводность.
17. К-р метод в теории электронных спектров кристаллов.
18. Поглощение света свободными носителями.
19. Статическое и динамическое экранирования. Плазменные колебания.
20. Примесное поглощение света.
21. Функции Ванье. Электроны во внешних полях.
22. Тепло- и электропроводность в  $\tau$ -приближении. Закон Видемана-Франца.
23. Метод слабой связи. Теорема Блоха.
24. Межзонное поглощение света.

### Примеры билета на экзамен

1. Фононные спектры кристаллов.
2. Кинетическое уравнение в магнитном поле. Случаи слабого и сильного полей.

*Варианты дополнительных вопросов для устного экзамена*

1. Фононная составляющая теплоемкости кристаллов. Как учесть влияние оптических фононов?
2. Один из атомов кристаллической решетки принудительно колеблется с частотой, соответствующей запрещенной зоне фононного спектра. К чему это приведет?

*Варианты задач для увеличения оценки за устный экзамен*

1. Фононный спектр двумерного кристалла имеет вид  $\omega = sk^n$ . Определить температурную зависимость теплоемкости при низких температурах.

2. Определить температурную зависимость электронной составляющей теплоемкости графена при низких температурах.

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 2»  
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