

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 твердого тела для аспирантов

направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

**Курс 2, семестр 3-4**

профиль

**Физика конденсированного состояния**

Форма обучения: **очная**

Заведующий кафедрой физики полупроводников ФФ  
академик РАН, д.ф.-м.н., А.В. Латышев



---

Новосибирск 2020

## Содержание

Аннотация к рабочей программе дисциплины «Теория твердого тела для аспирантов»	3
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы	5
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы	6
3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося	6
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий	7
5. Перечень учебной литературы	10
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся	11
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины	12
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине	12
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине	12
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине	13

**Аннотация**  
**к рабочей программе дисциплины «Теория твердого тела для аспирантов»**  
» Направление: **03.06.01 Физика и астрономия**  
Направленность (профиль): **Физика конденсированного состояния**

Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» реализуется в рамках образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия» профиль подготовки «Физика конденсированного состояния» по очной форме обучения на русском языке. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата и магистратуры и не требует знаний по другим дисциплинам подготовки для аспирантов. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» реализуется с третьего по четвертый семестры включительно, в рамках вариативной части дисциплин (модулей) в составе модуля «Физика конденсированного состояния» в качестве обязательной дисциплины и является базовой для осуществления научно-исследовательской деятельности и подготовки научно-квалификационной работы (диссертации).

Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» имеет своей целью дать обучающимся базовые знания по основным разделам физики конденсированного состояния: об атомной структуре, электронных свойствах и основных физических явлениях в твердотельных структурах, подготовить аспирантов к сдаче кандидатского экзамена по специальности. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» выступает как важный фактор формирования у аспиранта целостного научного мировоззрения и физического мышления, умения использовать базовые физические законы, включая законы квантовой физики, для анализа явлений в конденсированных средах, конструктивных взглядов на решение научно-технических проблем современной полупроводниковой микро- и нанoeлектроники.

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

**Знания:**

УК-1.1. Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.

УК-5.1. Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.

ОПК-1.1. Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.

ПК-1.1. Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.1. Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

**Умения:**

УК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.

УК-5.2. Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.

ОПК-1.2. Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.

ПК-1.2. Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

ПК-2.2. Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

**Навыки:**

УК-5.3. Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.

ОПК-1.3. Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.

***Текущий контроль успеваемости:***

Текущий контроль успеваемости включает контроль посещаемости обучающимися занятий, сдача заданий, оценку их активности в ходе дискуссий и заключается в презентации аспирантом доклада по одному из разделов программы курса.

***Промежуточная аттестация:***

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теория твердого тела для аспирантов» проводится по итогам завершения программы дисциплины в виде зачета, по результатам которого выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» может быть выставлена по результатам текущего контроля, если в ходе представления самостоятельно подготовленного доклада и ответов на вопросы обучающийся продемонстрировал уровень сформированности компетенций не ниже порогового. Оценка «зачтено» является положительным результатом прохождения промежуточной аттестации. На зачете для дополнительной проверки сформированности отдельных компетенций обучающемуся могут быть заданы вопросы по пройденному материалу.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции и практические занятия, доклады обучающихся по тематике, связанной с выполнением их научной работы, индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий. самостоятельная подготовка обучающихся, зачет.

Общий объем дисциплины – 6 зачетных единиц (216 часов).

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

Код	Компетенции, формируемые в рамках дисциплины
<b>УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>	
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>УК-5. Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>	
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития, владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования.
УК-5.3	Обладать знаниями, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>	
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-технической документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.
<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>	
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» реализуется в рамках образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 «Физика и астрономия» профиль подготовки «Физика конденсированного состояния» по очной форме обучения на русском языке. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата и магистратуры и не требует знаний по другим дисциплинам подготовки для аспирантов. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» реализуется с третьего по четвертый семестры включительно, в рамках вариативной части дисциплин (модулей) в составе модуля «Физика конденсированного состояния» в качестве обязательной дисциплины и является базовой для осуществления научно-исследовательской деятельности и подготовки научно-квалификационной работы (диссертации).

Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» имеет своей целью дать обучающимся базовые знания по основным разделам физики конденсированного состояния: об атомной структуре, электронных свойствах и основных физических явлениях в твердотельных структурах, подготовить аспирантов к сдаче кандидатского экзамена по специальности. Дисциплина «Теория твердого тела для аспирантов» выступает как важный фактор формирования у аспиранта целостного научного мировоззрения и физического мышления, умения использовать базовые физические законы, включая законы квантовой физики, для анализа явлений в конденсированных средах, конструктивных взглядов на решение научно-технических проблем современной полупроводниковой микро- и нанoeлектроники.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции и практические занятия, доклады обучающихся по тематике, связанной с выполнением их научной работы, индивидуальная работа с преподавателем/консультации в период занятий. самостоятельная подготовка обучающихся, зачет.

Общий объем дисциплины – 6 зачетных единиц (216 часов).

Дисциплины (практики), для изучения которых необходимо освоение дисциплины Теория твердого тела для аспирантов:

Кандидатский экзамен по модулю Физика конденсированного состояния

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

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	Индивидуальная работа с преподавателем/ Консультации в период занятий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Кандидатский экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	108	32	32		6	36			2		

4	108	32	32		6	36			2		
ИТОГО	216	64	64		12	72			4		
Всего 216 часов /6 зачетных единиц из них: - контактная работа 144 часа - в интерактивных формах 56 часов											
Компетенции: УК-1, УК-5, ОПК-1, ПК-1, ПК-2											

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

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Консультации перед экзаменом (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)	
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации			
				Лекции	Практические занятия	Индивидуальная работа с преподавателем /Консультации в период занятий					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
<b>3 семестр</b>											
1.	Структура твердых тел: кристаллы, квазикристаллы, аморфные материалы, стекла.	1-4	16	4	8		4				
2.	Фононы в кристаллах.	5-9	16	4	8		4				
3.	Электроны в кристаллах.	10-12	16	4	8		4				
4.	Элементарные возбуждения в твердых телах.	13-16	16	4	8		4				
5.	Научные доклады обучающихся по тематикам их научных исследований	1-16	42	16		6	20				
6.	Зачет	17	2							2	
7.	Всего по семестру		108	32	32	6	36			2	
<b>4 семестр</b>											
8.	Кинетика электронов.	1-4	16	4	8		4				
9.	Фазовые переходы в твердых телах.	5-9	16	4	8		4				
10.	Физика квантовых жидкостей.	10-12	16	4	8		4				

11.	Оптика полупроводников.	13-16	16	4	8		4			
12.	Научные доклады обучающихся по тематикам их научных исследований	1-16	42	16		6	20			
13.	Зачет	17	2							2
14.	Всего по семестру		108	32	32	6	36			2
<b>Итого по дисциплине</b>			216	64	64	12	72			4

Лекционные занятия проводятся в интерактивной форме, подразумевающей со стороны преподавателя постановку проблемы по указанным темам, формулировку некоторых практических заданий и задач, подходы к решению которых должны найти обучающиеся в ходе семинара, обсуждение проблемных вопросов, в том числе, с элементами свободной дискуссии с участием обучающихся и преподавателя. На занятиях также заслушиваются доклады обучающихся по заданным темам, сопровождающиеся уточняющими вопросами со стороны преподавателя и других обучающихся. Темы закрепляются в ходе самостоятельной работы обучающегося по решению задач с использованием рекомендованной литературы, а также в процессе научно-исследовательской деятельности.

### Содержание дисциплины:

#### 3 семестр

Темы лекций:

1. Структура конденсированных сред. Колебания решетки. Фононный спектр кристаллов.
2. Электроны в решетке: металлы, полуметаллы, диэлектрики, полупроводники. Топологические изоляторы. Электронный спектр неупорядоченных твердых тел.
3. Элементарные возбуждения (квазичастицы) в твердых телах.
4. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации.

Темы практических занятий:

1. Химическая связь и атомная структура.

Рассматриваются типы химической связи и атомной структуры кристаллических твердых тел и, в частности, важнейших полупроводников.

2. Колебания решетки. Фононы.

Рассматриваются уравнения движения атомов в кристалле и их решения, закон дисперсии упругих волн, акустические и оптические колебания, квантование колебаний, понятие квазичастицы на примере фонона.

3. Квантование колебаний одномерной решетки. Теплоемкость кристаллической решетки.

Рассматриваются квантование одномерной цепочки. Роль нелинейности (кубический и 4 порядка члены в гамильтониане). Определяется теплоемкость одно- дву- и трехмерной решеток., вклад в теплоемкость от оптических фононов.

4. Основы зонной теории.

Для электрона в поле  $U(x) = U_0 \cos gx$ ,  $g = 2\pi/a$  найти энергетический спектр и волновые функции в приближении почти свободных электронов и приближении сильной связи [7.2]

$$\cos(pa) = \cos(ka) + \frac{m\beta}{\hbar^2 k} \sin(ka)$$

Спектр электронов в модели Кронига-Пенни имеет вид

Получить отсюда приближения почти свободных электронов и приближение сильной связи [7.1]

Получить спектр электронов в приближении сильной связи исходя из гамильтониана  $H = E_0 \sum_n c_n^\dagger c_n + t \sum_n (c_n^\dagger c_{n+1} + h.c.)$  Учет прыжков между следующими за ближайшими

соседями в этой задаче приводит к неверному результату. Почему?

5. Взаимодействие между электронами. Экранирование. Плазмоны.

- Задача экранирования (уравнение Пуассона)
- Экранирование невырожденным электронным газом
- Экранирование 2D электронами
- Квантовые эффекты в задаче экранирования (фриделевские осцилляции)
- Плазмоны в трехмерном металле
- Поверхностные плазмоны [20.6]
- Плазмоны в двумерном слое [20.8]

Продемонстрировать наличие щели в задачах 1, 2 и ее отсутствие в задаче 3

6. Электрон-фононное взаимодействие.

- Электрон-фононное взаимодействие в модели Кронига-Пенни
- Электрон-фононное взаимодействие в приближении туннельного гамильтониана
- Электрон-фононное взаимодействие. Пьезоэффект

7. Магнетизм твердых тел.

• Убедиться, что преобразование Холстейна-Примакова приводит к правильным коммутационным соотношениям для операторов спина

• Получить дисперсионное соотношение для ферромагнитных экситонов. Убедиться, что «антиферромагнитная» волновая функция не является собственной для гамильтониана Гайзенберга. Сравнить энергии АФ и синглетного состояний

#### 4 семестр

Темы лекций:

1. Электроны в магнитном поле. Классические и квантовые эффекты Холла. Магнетосопротивление. Циклотронный резонанс.
2. Фазовые переходы в твердых телах. Ферромагнетизм твердых тел. Антиферромагнетизм. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках. Переходы Пайердса, Мотта и Андерсена.
3. Теория квантовых жидкостей. Квантовая Бозе-жидкость. Сверхтекучесть. Квантовая Ферми-жидкость. Сверхпроводимость. Сверхпроводники 1 и 2 рода.
4. Поглощение света в полупроводниках. Межзонное поглощение света. Поглощение с участием примесей. Поглощение свободными носителями. Поглощение света в пористых средах и нанокристаллах.

Темы практических занятий:

1. Проводимость металлов.

- Проводимость металла в модели Друде
- Вклад в проводимость от рассеяния на примеси: шар радиуса R – классическая и квантовая задачи

- Электрон-фононное рассеяние. Температурная зависимость. 1D и 2D модели
  2. Кинетическое уравнение Больцмана
    - Найти проводимость электронного газа в приближении времени релаксации
    - Показать, что если электронный газ невырожден, а тепловая скорость электронов больше скорости звука, то рассеяние электронов на акустических фононах является квазиупругим.
    - Решить линеаризованное уравнение Больцмана для электронов в неоднородном электрическом поле.
  3. Электроны в магнитном поле. Эффект Холла. Магнетосопротивление.
    - Найти компоненты тензора электрической проводимости в слабом магнитном поле в приближении времени релаксации
    - Решить задачу 1 в переменном магнитном поле
    - Обсудить задачу 1 в случае 2D электронов в сильном магнитном поле (квантовый эффект Холла)
    - Показать, что в пределе низких температур в однозонном приближении магнетосопротивление равно нулю.
  4. Оптика полупроводников
    - Найти коэффициент поглощения при межзонных переходах прямозонного полупроводника. Обсудить эту же задачу для непрямозонного полупроводника
    - Найти коэффициент поглощения при ионизации водородоподобной примеси (донора или акцептора)
    - Оценить время безызлучательной рекомбинации электронов в прямозонном полупроводнике в случае низких и высоких температур
  5. Электроны в двумерной системе.
    - Обсудить задачу 1 из семинара 10 для 2D электронов (межзонные оптические переходы).
    - Найти электронную теплоемкость двумерного газа.
    - Найти уровни энергии электронов в квантовой проволоке с прямоугольным спектром в присутствии заряженной примеси.
    - Записать гамильтониан Рашбы (спин-орбитальное взаимодействие на изотропной ориентированной поверхности) и найти спектр электронов.
  6. Другие низкоразмерные задачи.
    - Вблизи конической точки электроны в графене описываются гамильтонианом  $\hat{H} = v_F \sigma_x p_x + v_F \sigma_y p_y$ , здесь  $\sigma_x, \sigma_y$  - матрицы Паули, а оператор импульса  $p$  имеет координаты  $x$  и  $y$ . Графен свернут по оси  $y$  в нанотрубку большего радиуса  $R$ . Найти собственные функции и спектр электронов в нанотрубке.
    - Оценить температуру конденсации экситонов в электронно-дырочные капли в кремнии при облучении светом мощностью  $0.1 \text{ Вт/см}^2$ . Коэффициент поглощения  $10^3 \text{ см}^{-1}$ . Положить, воспользоваться уравнением Ван-Дер-Ваальса.
  7. Некристаллические твердые материалы.
 

Рассматриваются атомная структура и особенности энергетического спектра неупорядоченных (аморфных) полупроводников, плотность состояний и локализация электронных состояний, роль ближнего порядка в формировании электронного спектра некристаллических полупроводников, спектры оптического поглощения.

Индивидуальная работа с преподавателем

Перечень работ	Объем, час
Обсуждение плана доклада по избранной теме, рекомендации преподавателя относительно литературных источников, которые можно использовать при подготовке доклада, индивидуальные консультации по ходу подготовки доклада. Обсуждение задач, стоящих перед аспирантом в рамках его научно-исследовательской работы, и возможных способов их решения с привлечением различных методов.	12

#### Самостоятельная работа обучающихся

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Самостоятельная подготовка к лекционным и практическим занятиям с использованием учебной литературы. Подготовка доклада по избранной теме. Поиск литературных источников, работа с научным текстом, анализ литературных данных. Подготовка к практическим занятиям. Решение практических заданий.	72

### **5. Перечень учебной литературы**

#### 5.1 Основная литература

1. Займан Дж. Физика твердого тела [Электронный ресурс] Электрон. дан. Ижевск: Регуляр. и хаотич. динамика, 2002. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM):
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела: [учебник: для студентов естественнонаучных и инженерных факультетов вузов] / Ч. Киттель; пер. с англ. под общ. ред. А.А. Гусева Изд. 2-е, стер Москва : Альянс, 2013. 791 с..

#### 5.2 Дополнительная литература

3. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников: [Учеб. пособие для физ. спец. вузов] / А.И. Ансельм 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука., 1978. 615 с.
4. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твёрдого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979.
5. Кузнецов Е.А., Шапиро Д.А. Методы математической физики: курс лекций, НГУ, 2011.

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

6. А.В. Ненашев, В.Л. Альперович, Колебания кристаллической решетки. Учебное пособие. РИЦ НГУ, Новосибирск, 2015.
7. Левинштейн М.Е., Симин Г.С. Барьеры. М.: Наука, 1987. Библиотечка "Квант", вып. 65.
8. Брагинский Л. С. , Магарилл Л. И., Махмудиан М. М., Погосов А. Г. , Чаплик А. В., Энтин М. В. Сборник задач по теории твердого тела. Новосибирск, НГУ, 2013.
9. Галицкий В. М., Карнаков Б. М., Коган В. И. Задачи по квантовой механике. М.: Наука, 1981.

Обучающийся в аспирантуре должен уметь самостоятельно осуществлять научный поиск литературы, необходимой при подготовке доклада по избранной теме.

Обучающиеся полностью обеспечены необходимой научной литературой за счет фондов библиотеки НГУ (<http://libra.nsu.ru/>). Обучающимся, проходящим практику в Институтах СО РАН, предоставляется доступ к информационным ресурсам на тех же основаниях, что и научным сотрудникам этих институтов на основании договоров о прохождении практической подготовки.

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

Освоение дисциплины используются следующие ресурсы:

- раздел "Образование" сайта ИФП СО РАН - URL:  
<http://www.isp.nsc.ru/obrazovanie/aspirantura/obshchaya-informatsiya>
- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

Взаимодействие обучающегося с преподавателем (синхронное и (или) асинхронное) осуществляется через личный кабинет студента в ЭИОС.

### 7.1 Современные профессиональные базы данных:

1. Полнотекстовые журналы Springer Journals за 1997-2020 г., электронные книги (2005-2020 гг.), коллекция научных биомедицинских и биологических протоколов SpringerProtocols, коллекция научных материалов в области физических наук и инжиниринга SpringerMaterials, реферативная БД по чистой и прикладной математике zbMATH.
2. Электронная библиотека диссертаций Российской государственной библиотеки (ЭБД РГБ).
3. Полнотекстовые электронные ресурсы Freedom Collection издательства Elsevier (Нидерланды) (23 предметные коллекции).
4. Электронные ресурсы Web of Science Core Collection (Thomson Reuters Scientific LLC.), Journal Citation Reports + ESI.
5. Электронные БД JSTOR (США). 15 предметных коллекций: Arts & Sciences I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, Life Sciences, Health & General Science, Mathematics & Statistics, Ecology & Botany, Language & Literature, Business I, II.).
6. БД Scopus (Elsevier).

### 7.2. Информационные справочные системы

7. Поисковая платформа "Web of Knowledge"

[http://apps.webofknowledge.com/WOS\\_GeneralSearch\\_input.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&SID=S2kBCc@.5IIfkFB7B9a&preferencesSaved=&highlighted\\_tab=WOS](http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=S2kBCc@.5IIfkFB7B9a&preferencesSaved=&highlighted_tab=WOS)

8. <http://wokinfo.com/russian>

## **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 семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной 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**

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине и индикаторов их достижения, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по дисциплине представлен в разделе 1.

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### **Текущий контроль успеваемости:**

Текущий контроль включает контроль посещаемости обучающимися еженедельных занятий, оценку их активности в ходе дискуссий, презентация аспирантом доклада по одному из разделов программы курса.

#### **Промежуточная аттестация:**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теория твердого тела для аспирантов» проводится по итогам завершения программы дисциплины в виде зачета, по результатам которого выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» может быть выставлена по результатам текущего контроля, если в ходе представления самостоятельно подготовленного доклада и ответов на вопросы обучающийся продемонстрировал уровень сформированности компетенций не ниже порогового. Оценка «зачтено» является положительным результатом прохождения промежуточной аттестации. На зачете для дополнительной проверки сформированности отдельных компетенций обучающемуся могут быть заданы вопросы по пройденному материалу.

### **Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине Теория твердого тела для аспирантов**

Таблица 10.1

Код компетенции	Результат обучения по дисциплине	Оценочное средство
УК-1.1	Знать актуальные исследования и критически анализировать результаты предшественников и современные достижения в области физики в применении к профессиональной области деятельности.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
УК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа	
<b>УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях</b>		

	современных достижений физики, в части постановки актуальных задач научных исследований в применении к профессиональной области деятельности и в зависимости от специфики объекта исследования.	
<b>УК-5 Способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития</b>		
УК-5.1	Знать возможные направления профессиональной самореализации, владеть приемами планирования и оценки собственной деятельности по решению профессионально-значимых задач.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
УК-5.2	Уметь выявлять и формулировать проблемы собственного профессионального развития.	
УК-5.3	Владеть приемами осознания собственных достижений с целью их совершенствования, достаточными для выполнения научных исследований на современном мировом уровне в применении к профессиональной области деятельности в зависимости от специфики объекта исследования.	
<b>ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</b>		
ОПК-1.1	Знать современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в применении к профессиональной области деятельности.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ОПК-1.2	Уметь определять и применять современные научные методы исследования и информационно-коммуникационные технологии в зависимости от специфики объекта исследования.	
ОПК-1.3	Владеть способностью составлять и оформлять научно-техническую документацию, научные отчеты, обзоры, доклады и статьи.	
<b>ПК-1. Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>		
ПК-1.1	Знать теоретические основы, базовые понятия и модели построения теоретических моделей физических явлений и процессов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ПК-1.2	Уметь ставить задачи научно-исследовательской деятельности на основе сопоставительного анализа современных достижений в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	
<b>ПК-2. Способность к решению научных и практических задач в области физики в зависимости от специфики профиля подготовки.</b>		
ПК-2.1	Знать физические основы базовых экспериментов в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	Работа на занятиях Представление доклада Зачет
ПК-2.2	Уметь определять и применять современные научные методы в зависимости от специфики профиля подготовки и объекта исследования.	

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (не зачтено)	Пороговый уровень (зачтено)	Базовый уровень (зачтено)	Продвинутый уровень (зачтено)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	УК 1.1 УК 5.1 ОПК 1.1 ПК 1.1 ПК 2.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. 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	УК 1.2 УК 5.2 ОПК 1.2 ПК 1.2 ПК 2.2	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)	УК 5.3 ОПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие	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

		грубых ошибок.			знания по решению нестандартных задач.
--	--	----------------	--	--	--

***Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения***

**Тематика докладов дисциплины «Теория твердого тела для аспирантов».**

Ниже приведена примерная тематика докладов дисциплины (конкретная тема доклада определяется преподавателем совместно с обучающимся с учетом специфики научных исследования аспиранта).

1. Экспериментальные методы изучения колебаний решетки: поглощение и комбинационное рассеяние света, рассеяние нейтронов.
2. Движение электронов и дырок во внешних полях. Определение эффективных масс из циклотронного резонанса.
3. Поверхностные и контактные явления в полупроводниках. Работа выхода и электронное сродство. Методы определения работы выхода.
4. Кинетические явления в полупроводниках: проводимость, эффект Холла и термо-ЭДС. Механизмы рассеяния носителей заряда: рассеяние на заряженных примесях, акустических и оптических фононах.
5. Электронный транспорт в низкоразмерных структурах: квантование контактанса в квантовых проволоках, эффект Шубникова-де Гааза в двумерном электронном газе, квантовый эффект Холла.
6. Полупроводниковые гетеропереходы. Энергетические зонные диаграммы гетеропереходов. Применения гетеропереходов в микро- и оптоэлектронике.

**Контрольные вопросы и задания по разделам программы курса**

**Раздел 1.** Структура твердых тел: кристаллы, квазикристаллы, аморфные материалы, стекла

1. Структура жидких и твердых тел. Твердые тела : кристаллические, аморфные, поликристаллические, квазикристаллические
2. Типы кристаллических решеток. Решетки Бравэ.
3. Прямая и обратная решетки. Свойства обратной решетки
4. Теорема Блоха

**Раздел 2.** Фононы в кристаллах

1. Колебания решетки. Фононный спектр решетки с одним атомом в элементарной ячейке
2. Колебания решетки. Фононный спектр решетки с двумя атомами в элементарной ячейке
3. Динамика решетки графена
4. Квантование решеточных мод. Фононы
5. Теплоемкость кристаллической решетки
6. Дифракция на решетке

**Раздел 3.** Электроны в кристаллах

1. Электроны в кристаллической решетке. Модель почти свободных электронов
2. Электроны в кристаллической решетке. Модель сильной связи
3. Статистика электронов в кристалле. Электронный вклад в теплоемкость
4. Зонная структура кристаллов. Металлы, полуметаллы, диэлектрики, полупроводники.
5. Зонная структура графена. Топологические изоляторы.

**Раздел 4.** Элементарные возбуждения в твердых телах

1. Элементарные возбуждения в твердых телах. Экситоны, плазмоны.

2. Элементарные возбуждения в твердых телах. Поляроны
3. Взаимодействие с внешним электро-магнитным полем. Поляритоны
4. Спин во внешнем поле. Магноны.

### Раздел 5. Кинетика электронов

1. Кинетическое уравнение Больцмана. Электропроводность
2. Кинетическое уравнение Больцмана. Теплопроводность.
3. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Рассеяние на кулоновской примеси.
4. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Рассеяние на фононах.
5. Электроны в магнитном поле. Эффект Холла. Циклотронный резонанс. Магнетосопротивление.
6. Электроны в квантующем магнитном поле. Уровни Ландау. Квантовый эффект Холла.

### Раздел 6. Фазовые переходы в твердых телах

1. Фазовые переходы в твердых телах. Теория Ландау. Ферромагнетизм.
2. Фазовые переходы в твердых телах. Теория Ландау. Переходы в сегнетоэлектриках
3. Фазовые переходы в твердых телах. Переходы Мотта, Андерсена, Пайерлса.

### Раздел 7. Физика квантовых жидкостей

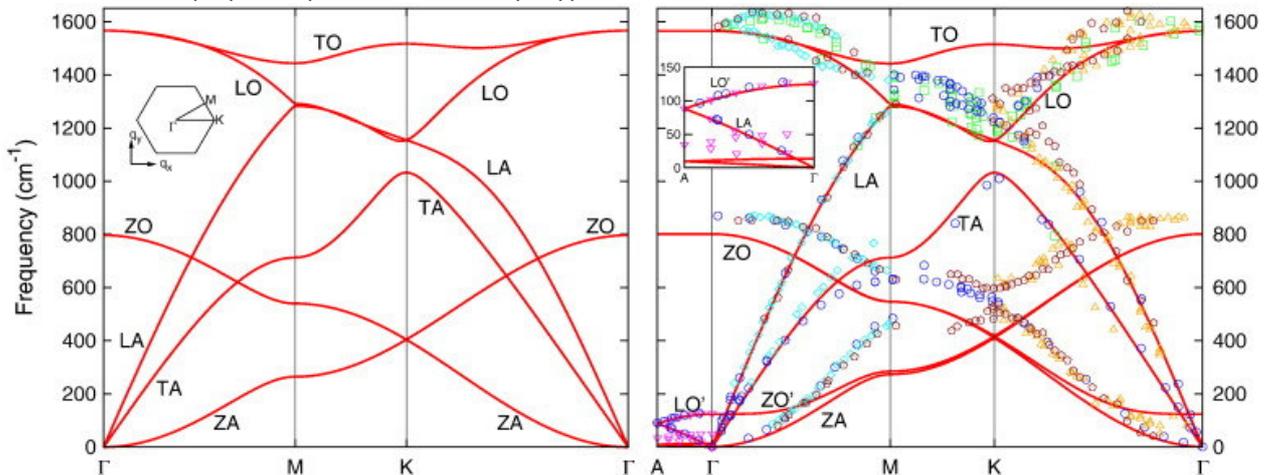
1. Квантовая Бозе-жидкость. Сверхтекучесть.
2. Квантовая Ферми-жидкость. Сверхпроводимость. Модель БКШ.
3. Квантовая Ферми-жидкость. Сверхпроводимость. Сверхпроводник в магнитном поле. Сверхпроводники I и II рода

### Раздел 8 Оптика полупроводников

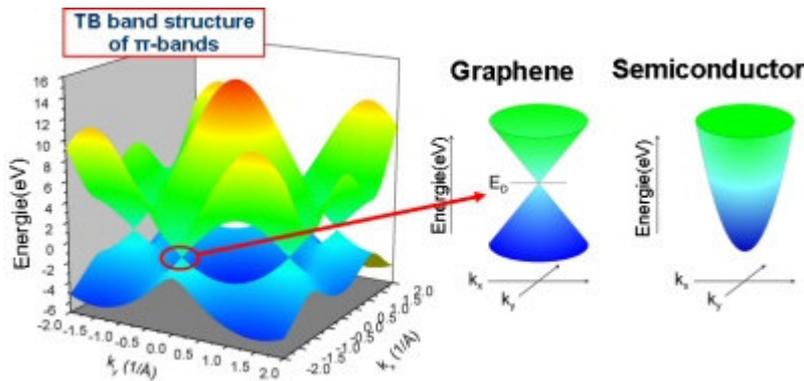
1. Поглощение на свободных носителях
2. Поглощение с участием примеси
3. Межзонное поглощение света в прямозонном материале
4. Межзонное поглощение в непрямозонном материале
5. Поглощение света в нанокристаллах

### 5.3 Задачи для самостоятельного решения

1. На Рис. 1 Показан фононный спектр графена. Нижняя ZA мода  $\omega = \beta k^2$  ( $\beta = 6 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ) соответствует колебаниям в направлении, перпендикулярном плоскости листа. Предполагая наличие только этой ветви, определить температурную зависимость фононной компоненты теплоемкости графена при низких температурах.



2. На Рис. 2 показана электронная зонная структура графена. Фермиевская скорость  $v_F$  вблизи точки Дирака ( $E = \hbar v_F \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ) равна  $10^6 \text{ м/с}$ . Предполагая уровень Ферми совпадающим с точкой Дирака, определить температурную зависимость электронной компоненты теплоемкости графена при низких температурах.



3. Фононный спектр одномерной решетки имеет вид

$$\omega = 2\sqrt{\frac{\alpha}{m}} \left| \sin \frac{ka}{2} \right|.$$

Определить температурную зависимость фононной компоненты теплоемкости при низких температурах.

4. Электронный спектр одномерной решетки имеет вид

$$\varepsilon(k) = 2t \cos ka.$$

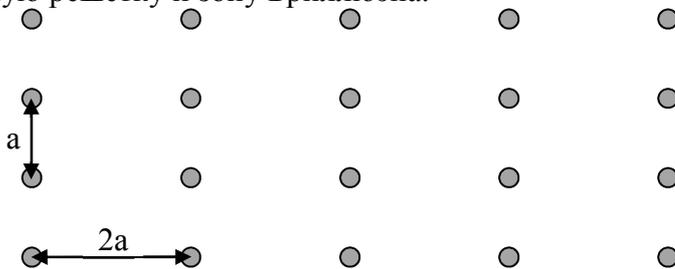
Считая уровень Ферми заданным, определить температурную зависимость электронной компоненты теплоемкости при низких температурах.

5. Электронный спектр двумерной решетки сильной связи имеет вид

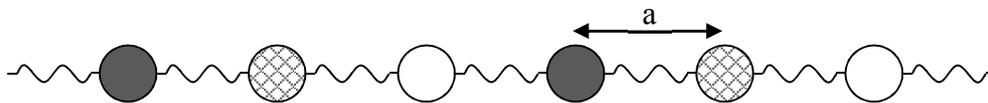
$$\varepsilon(\mathbf{k}) = 2t(\cos k_x a + \cos k_y a).$$

Определить эффективную массу дна зоны проводимости. Предполагая последнюю заполненной наполовину, изобразить поверхность Ферми.

6. Для изображенной здесь двумерной решетки нарисуйте ячейку Вигнера-Зейтца, обратную решетку и зону Бриллюэна.



7. Изобразите (качественно) закон дисперсии продольных колебаний одномерной цепочки, состоящей из атомов трёх типов:



Считать, что массы атомов разных типов близки друг к другу, но не равны.

### Вопросы к экзамену:

1. Структура жидких и твердых тел. Твердые тела: кристаллические, аморфные, поликристаллические, квазикристаллические
2. Типы кристаллических решеток. Решетки Бравэ.
3. Прямая и обратная решетки. Свойства обратной решетки
4. Теорема Блоха
5. Колебания решетки. Фононный спектр решетки с одним атомом в элементарной ячейке
6. Колебания решетки. Фононный спектр решетки с двумя атомами в элементарной ячейке

7. Квантование решеточных мод. Фононы
8. Теплоемкость кристаллической решетки
9. Дифракция на решетке
10. Электроны в кристаллической решетке. Модель почти свободных электронов
11. Электроны в кристаллической решетке. Модель сильной связи
12. Статистика электронов в кристалле. Электронный вклад в теплоемкость
13. Зонная структура кристаллов. Металлы, полуметаллы, диэлектрики, полупроводники.
14. Зонная структура графена. Топологические изоляторы.
15. Элементарные возбуждения в твердых телах. Экситоны, плазмоны.
16. Спин во внешнем поле. Магноны.
17. Оптические свойства твердых тел. Поглощение света в полупроводниках.
18. Кинетическое уравнение Больцмана. Электропроводность
19. Кинетическое уравнение Больцмана. Теплопроводность.
20. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Рассеяние на кулоновской примеси.
21. Кинетическое уравнение Больцмана. Приближение времени релаксации. Рассеяние на фононах.
22. Электроны в магнитном поле. Эффект Холла. Циклотронный резонанс. Магнетосопротивление.
23. Электроны в квантующем магнитном поле. Уровни Ландау.
24. Фазовые переходы в твердых телах. Теория Ландау. Ферромагнетизм.
25. Фазовые переходы в твердых телах. Теория Ландау. Переходы в сегнетоэлектриках
26. Фазовые переходы в твердых телах. Переходы Мотта, Андерсена, Пайерлса.
27. Квантовая Бозе-жидкость. Сверхтекучесть.
28. Квантовая Ферми-жидкость. Сверхпроводимость. Модель БКШ.

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.