

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Кинетические явления в кристаллах
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра лазерных систем и структурированных материалов
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: С.В. Демишев, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры лазерных систем и структурированных материалов 04.06.2020

Аннотация

Основной задачей курса является формирование базовых знаний в области физики конденсированного состояния как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности. Ознакомление с методами теоретического описания динамики квазичастиц в физике конденсированного состояния. Это предполагает углубленное изучение методов расчета зонной структуры кристаллов, экспериментальные методы исследования поверхности Ферми и методы получения температур ниже 1 К. Большое внимание уделено поверхностным электронным состояниям на границе раздела полупроводник-металл (поляронные состояния в кристаллах, магнитофононный резонанс, циклотронный резонанс в полупроводниках и металлах). Также большое внимание уделено экситонам в полупроводниках, Бозе-конденсации экситонов, образованию Ферми-жидкости и перенормировке. Рассматриваются электромагнитные волны в металлах: скин-эффект, геликоны и магнитоплазменные колебания.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области физики конденсированного состояния, анализ физических процессов, определяющих термодинамику и динамику квазичастиц, изучение методов описания кинетических явлений в кристаллах.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области физики конденсированного состояния как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- ознакомление с методами теоретического описания динамики квазичастиц в физике конденсированного состояния;
- формирование у студентов подходов к экспериментальным исследованиям в области физики конденсированного состояния и смежных наук в рамках выпускных работ на степень магистра.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений

ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях в области исследования кинетических явлений в кристаллах;
современные проблемы физики, химии, математики;
теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях применительно к исследованиям кинетических явлений в кристаллах;
принципы симметрии и законы сохранения;
новейшие открытия естествознания;
постановку проблем физико-химического моделирования;
о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента применительно к исследованию кинетических явлений в кристаллах;
научной картиной мира;
математическим моделированием физических задач.

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

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Зонный спектр кристаллов.	3	11		13
2	Квазичастицы.	3	11		12
3	Движение в магнитном поле.	3	11		10
4	Кинетическое уравнение Больцмана.	6	12		10
Итого часов		15	45		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

1. Зонный спектр кристаллов.

Многочастичное уравнение. Шредингера для кристалла. Приближение Борна-Оппенгеймера. Одноэлектронное приближение. Уравнение Хартри и уравнение Хартри-Фока. Зонный спектр. Квазиимпульс, зона Бриллюэна. Теорема Блоха. Закон дисперсии и эффективная масса. Методы расчетов зонного спектра метод псевдопотенциала, k - p – метод. Тензор эффективной массы, роль симметричных точек в зоне Бриллюэна. Зонный спектр одномерного уравнения Шредингера с периодическим потенциалом. Операторы координаты и скорости для электронов в кристалле. Закон изменения квазиимпульса. Метод эффективной массы. «Искривление» зон во внешнем поле. Динамика электрона в случае однородного электрического поля. Решение задачи о водородоподобной примеси.

2. Квазичастицы.

Квазичастицы. Определение, введение квазичастиц на примере идеального Ферми-газа. Поверхность Ферми. Полное число состояний в зоне Бриллюэна. Функции распределения квазичастиц и частиц, химпотенциал. Электроны и дырки в полупроводниках. Модель Ферми-газа. Плотность состояний, особенности Ван-Хова. Эффективная масса плотности состояний. Интегралы Зоммерфельда. Температурная зависимость химпотенциала, температура вырождения. Электронная теплоемкость. Квазичастицы в идеальном Бозе-газе. Функции распределения и химпотенциал. Бозе-конденсация. Температура конденсации. Колебания кристаллической решетки. Динамические уравнения, свойства силовой функции. Закон дисперсии. Акустические и оптические колебания. Переход к квантовому описанию. Фононы, функция распределения. Фононная теплоемкость.

3. Движение в магнитном поле.

Движение электронов в кристалле во внешнем магнитном поле. Траектории и циклотронная масса. Квазиклассическое квантование движения в магнитном поле. Уровни Ландау. Плотность состояний. Роль экстремальных сечений поверхности Ферми. Цилиндр Ландау. Квантовые осцилляционные явления. Эффекты де Гааза-ван Альфена и Шубникова-де Гааза. Период квантовых осцилляций по обратному полю. Движение химпотенциала в магнитном поле. Спиновое расщепление. Амплитуда осцилляций. Формула Лифшица-Косевича, температура Дингла. Использование квантовых осцилляционных эффектов для исследования поверхности Ферми.

4. Кинетическое уравнение Больцмана.

Модель Друде: проводимость, эффект Холла, магнитосопротивление и циклотронный резонанс. Кинетическое уравнение Больцмана. Выражение для тока и потока энергии. Теорема Лиувилля. Приближение времени релаксации. Время релаксации для основных механизмов рассеяния в твердых телах (ионы примеси, колебания решетки, вакансии и точечные дефекты, дислокации, границы кристаллитов, межэлектронное рассеяние). Задача о рассеянии электрона на ионизированной примеси. Формула Конуэлл-Вайскопфа. Решение кинетического уравнения Больцмана в вырожденном случае. Проводимость, частотная зависимость проводимости. Движение в магнитном поле, тензор проводимости и эффект Холла. Сравнение с моделью Друде. Общее решение кинетического уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Продольные и поперечные эффекты. Кинетические коэффициенты. Случаи изотропной и анизотропной эффективной массы. Расчет проводимости с помощью кинетического уравнения Больцмана. Температурная зависимость дрейфовой подвижности в случае рассеяния на акустических фононах и ионах примеси. Случай многодолинной изоэнергетической поверхности. Транспортная эффективная масса. Случай нескольких групп носителей заряда. Сравнение с моделью Друде.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).
Необходимое программное обеспечение: офисный пакет OpenOffice для рефератов и презентаций, программа Origin (при наличии технической возможности).
Обеспечение самостоятельной работы – доступ в Интернет, базы данных по журналам American Physical Society, American Institute of Physics, Institute of Physics, Nature, Springer Verlag, библиотека ИОФ РАН.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Квазичастицы в физике конденсированного состояния [Текст]/Н. Б. Брандт, В. А. Кульбачинский, -М., Физматлит, 2007
2. Основы теории металлов [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / А. А. Абрикосов .— 2-е изд., доп. и испр. — М. : Физматлит, 2009, 2010 .— 600 с.
3. И.А.Квасников. М.: Термодинамика и статистическая физика (в 3-х томах). Едиториал УРСС, 2002.

Дополнительная литература

1. Введение в физику твердого тела [Текст] : учебник для вузов / Ч. Киттель ; пер. под ред. А. А. Гусева .— 2-е изд., стереотип. / перепеч. с изд. 1978 г. — М. : Медиа Стар, 2006 .— 792 с.
2. Физика полупроводников [Текст] / П. С. Киреев - М.Высшая школа, 1975
3. Основы механики кристаллической решетки [Текст]/А. М. Косевич, -М., Наука, 1972

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Web-сайты журналов по физике твердого тела и магнитных явлений (Физика твердого тела, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Успехи физических наук, Physica Status Solidi b, Physical Review B и др.).

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как OpenOffice.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий курс «Кинетические явления в кристаллах», должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом физики конденсированного состояния, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике для расчета различных кинетических характеристик. Поскольку в ходе лекций для иллюстрации общих принципов проводится обсуждение современных актуальных проблем физики конденсированного состояния, которые не в полной мере отражены в существующих учебниках, посещение лекций является абсолютно необходимым для успешного усвоения изучаемого материала.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- подготовку к практическим занятиям, экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций. С целью углубленного изучения тех или иных разделов курса студентам могут быть предложены специальные темы для самостоятельной работы.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра лазерных систем и структурированных материалов
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Разработчик: С.В. Демишев, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Кинетические явления в кристаллах» обучающийся должен:

знать:

место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях в области исследования кинетических явлений в кристаллах;
 современные проблемы физики, химии, математики;
 теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях применительно к исследованиям кинетических явлений в кристаллах;
 принципы симметрии и законы сохранения;
 новейшие открытия естествознания;
 постановку проблем физико-химического моделирования;
 о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
 представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
 абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
 планировать оптимальное проведение эксперимента.

владеть:

планированием, постановкой и обработкой результатов физического эксперимента применительно к исследованию кинетических явлений в кристаллах;
научной картиной мира;
математическим моделированием физических задач.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Примерные темы заданий для самостоятельной работы (рефераты):

1. Магнитные свойства вырожденного газа свободных электронов.
2. Рассеяние электронов на заряженных и магнитных примесях.
3. Процессы спиновой релаксации в электронном парамагнитном резонансе.
4. Модель Кондо.
5. Методы расчета зонной структуры кристаллов.
6. Экспериментальные методы исследования поверхности Ферми.
7. Методы получения температур ниже 1 К. Термометрия при сверхнизких температурах.
8. Методы создания сверхсильных магнитных полей.
9. Полупроводниковые фотоприемники.
10. Поверхностные электронные состояния на границе раздела полупроводник-металл.
11. Поляронные состояния в кристаллах.
12. Магнитофононный резонанс.
13. Циклотронный резонанс в полупроводниках.
14. Циклотронный резонанс в металлах.
15. Экситоны в полупроводниках. Бозе-конденсация экситонов.
16. Ферми-жидкость и перенормировки.
17. Электромагнитные волны в металлах: скин-эффект, геликоны и магнитоплазменные колебания.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Промежуточная аттестация по дисциплине «Кинетические явления в кристаллах» осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме.

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена в 9-ом семестре:

1. Многочастичное уравнение Шредингера для кристалла. Приближение Борна-Оппенгеймера. Одноэлектронное приближение. Уравнение Хартри и уравнение Хартри-Фока.
2. Зонный спектр. Квазиимпульс, зона Бриллюэна. Теорема Блоха. Закон дисперсии и эффективная масса.
3. Методы расчетов зонного спектра методом псевдопотенциала, k - p – метод. Тензор эффективной массы, роль симметричных точек в зоне Бриллюэна.
4. Зонный спектр одномерного уравнения Шредингера с периодическим потенциалом.
5. Операторы координаты и скорости для электронов в кристалле. Закон изменения квазиимпульса.
6. Метод эффективной массы. «Искривление» зон во внешнем поле. Динамика электрона в случае однородного электрического поля. Решение задачи о водородоподобной примеси.
7. Квазичастицы. Определение, введение квазичастиц на примере идеального Ферми-газа. Поверхность Ферми. Полное число состояний в зоне Бриллюэна. Функции распределения квазичастиц и частиц, химпотенциал. Электроны и дырки в полупроводниках.
8. Модель Ферми-газа. Плотность состояний, особенности Ван-Хова. Эффективная масса плотности состояний. Интегралы Зоммерфельда. Температурная зависимость химпотенциала, температура вырождения. Электронная теплоемкость.
9. Квазичастицы в идеальном Бозе-газе. Функции распределения и химпотенциал. Бозе-конденсация. Температура конденсации.
10. Колебания кристаллической решетки. Динамические уравнения, свойства силовой функции. Закон дисперсии. Акустические и оптические колебания.
11. Переход к квантовому описанию. Фононы, функция распределения. Фононная теплоемкость.

12. Движение электронов в кристалле во внешнем магнитном поле. Траектории и циклотронная масса.
13. Квазиклассическое квантование движения в магнитном поле. Уровни Ландау. Плотность состояний. Роль экстремальных сечений поверхности Ферми. Цилиндр Ландау.
14. Квантовые осцилляционные явления. Эффекты де Гааза-ван Альфена и Шубникова-де Гааза. Период квантовых осцилляций по обратному полю. Движение химпотенциала в магнитном поле. Спиновое расщепление. Амплитуда осцилляций. Формула Лифшица-Косевича, температура Дингла. Использование квантовых осцилляционных эффектов для исследования поверхности Ферми.
15. Модель Друде: проводимость, эффект Холла, магнитосопротивление и циклотронный резонанс.
16. Кинетическое уравнение Больцмана. Выражение для тока и потока энергии. Теорема Лиувилля. Приближение времени релаксации. Время релаксации для основных механизмов рассеяния в твердых телах (ионы примеси, колебания решетки, вакансии и точечные дефекты, дислокации, границы кристаллитов, межэлектронное рассеяние).
17. Задача о рассеянии электрона на ионизованной примеси. Формула Конуэлл-Вайскопфа.
18. Решение кинетического уравнения Больцмана в вырожденном случае. Проводимость, частотная зависимость проводимости. Движение в магнитном поле, тензор проводимости и эффект Холла. Сравнение с моделью Друде.
19. Общее решение кинетического уравнения Больцмана в приближении времени релаксации. Продольные и поперечные эффекты. Кинетические коэффициенты. Случаи изотропной и анизотропной эффективной массы.
20. Расчет проводимости с помощью кинетического уравнения Больцмана. Температурная зависимость дрейфовой подвижности в случае рассеяния на акустических фононах и ионах примеси. Случай многодолинной изоэнергетической поверхности. Транспортная эффективная масса. Случай нескольких групп носителей заряда. Сравнение с моделью Друде.

Пример экзаменационного билета из трех вопросов, используемого для проведения экзамена:

Билет №1

1. Многочастичное уравнение Шредингера для кристалла. Приближение Борна-Оппенгеймера. Одноэлектронное приближение.
2. Кинетическое уравнение Больцмана. Выражение для тока и потока энергии. Теорема Лиувилля. Приближение времени релаксации. Решение кинетического уравнения Больцмана в вырожденном случае. Проводимость, частотная зависимость проводимости. Сравнение с моделью Друде.
3. Движение электронов в кристалле во внешнем магнитном поле. Траектории и циклотронная масса.

Критерии оценивания

Оценка Баллы Критерии

отлично 10 Получены ответы на три вопроса в экзаменационном билете, нет замечаний.

9 Получены ответы на три вопроса в экзаменационном билете, есть отдельные замечания.

8 Получены ответы на три вопроса в экзаменационном билете, есть существенные замечания и (или) ошибки в вычислениях.

хорошо

7 Получены ответы на два вопроса в экзаменационном билете, нет замечаний

6 Получены ответы на два вопроса в экзаменационном билете, есть отдельные замечания

5 Получены ответы на два вопроса в экзаменационном билете, есть существенные замечания и (или) ошибки в вычислениях.

удовлетворительно

4 Получен ответ на один вопрос в экзаменационном билете, нет замечаний

3 Получен ответ на один вопрос в экзаменационном билете, есть замечания
неудовлетворительно

2 Правильные ответы на вопросы экзаменационного билета отсутствуют.

1 Правильные ответы на вопросы экзаменационного билета отсутствуют, студент не может объяснить смысл заданных вопросов.

Примечание:

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 1 астрономический час на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, конспектом лекций и персональными компьютерами.