|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **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) | | | | | | | |  |
|  |  |  |  |  |  |  | |  |  |
| Семестр: 1 (Осенний) | | | | | |  | |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  | |  |  |
|  | 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 ионизованной 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. | | | | | | | | |  |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | | |  |
|  | | | | | | | | | |  |
|  | | | | | | | | | |  |
|  | | | | | | | | | |  |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ** | | | | | | | | |  |
|  |  |  |  |  |  |  | | |  |  |
|  |  |  | | | |  | | | |  |
|  |  |  |  |  |  |  | | |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **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:** | | 1 | | | |  | | |  |  |
| **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 метод 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. | | | | | | | |  |