|  |
| --- |
| Федеральное государственное бюджетное образовательное  учреждение высшего образования  Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова |

Физический факультет

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

**(межфакультетского учебного курса)**

**Квантовые явления в твёрдых телах. Основы теории, моделирование и применение в вычислительной технике и электронике.**

**Quantum phenomena in solids. Theoretical basis, modeling and application in computers and electronics.**

*наименование дисциплины*

**Уровень высшего образования:** бакалавриат, магистратура, специалитет

**Направление подготовки:** все направления

*(код и название направления)*

**Профиль (направленность) ОПОП:** все

*(название направленности)*

Форма обучения: очная

**Автор:** Кытин Владимир Геннадьевич, кандидат физ.-мат. наук, доцент, кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ,

e-mail: kytin@mig.phys.msu.ru,

тел. 8-495-939-11-47; 8-916-649-80-04

Москва 2023

**1. Цель освоения дисциплины – требования к результатам освоения дисциплины:**

Дисциплина направлена на формирование у студента компетенций:

- способен к самостоятельному и творческому использованию в практической и преподавательской деятельности приобретенных знаний и умений, в том числе в областях, непосредственно не связанных с избранной сферой научной деятельности.

– способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий, формулировать научно обоснованные гипотезы, применять методологию научного познания в профессиональной деятельности (УК-1);

– способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке (иностранных языках), для академического и профессионального взаимодействия (УК-5);

– способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки, формировать приоритеты личностного и профессионального развития (УК-7).

**2. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО:**

Дисциплина **«Квантовые явления в твёрдых телах. Основы теории, моделирование и применение в вычислительной технике и электронике.»** относится к вариативной части (естественнонаучному блоку) основной профессиональной образовательной программы высшего образования по всем направлениям бакалавриата и магистратуры МГУ имени М.В. Ломоносова.

Период – **1 (один) семестр обучения**.

**3. Объем дисциплины составляет:**

Объем дисциплины – 1 з.е. / 36 часов, из которых 24 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (24 часов – занятия лекционного типа), 12 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Вид промежуточной аттестации – **зачет**.

**4. Тематический план: структура дисциплины по темам с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий (в соответствии с учебным планом)**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Наименование**  **разделов и тем дисциплины,**  **Форма промежуточной**  **аттестации по дисциплине** | **Номинальные трудозатраты**  **обучающегося** | | | **Всего академических часов** | **Форма текущего контроля успеваемости[[1]](#footnote-1) \*** |
| **Контактная работа  (работа во взаимодействии с преподавателем)**  **Виды контактной работы, академические часы** | | **Самостоя-тельная**  **работа**  **обучаю-**  **щегося,**  **академи-**  **ческие**  **часы** |
| **Занятия**  **лекционного**  **типа** | **Занятия**  **семинарского**  **типа / (в**  **интерактивной форме)** |
| Тема 1. Основы квантовой механики. | 2 | - | 1 | 3 | КО, В, Д |
| Тема 2. Одномерные задачи квантовой механики. Метод матриц переноса. | 2 | - | 1 | 3 | КO, В, Д |
| Тема 3. Частица в потенциальной яме и системе потенциальных ям. Примеры расчёта стационарных решений методом матриц переноса. | 2 | - | 1 | 3 | KО, В, Д |
| Тема 4. Модель Кронига-Пенни. Расчёт стационарных решений методом матриц переноса и методом сильной связи. | 2 | - | 1 | 3 | КO, В, Д |
| Тема 5. Нестационарные решения уравнения Шредингера. Туннелирование частиц. | 2 | - | 1 | 3 | KP, В, Д |
| Тема 6. Электроны в кристаллах. Теорема Блоха. Методы расчёта зонной структуры и построения поверхности Ферми в металлах. | 2 | - | 1 | 3 | КO, В, Д |
| Тема 7. Явление сверхпроводимости. Основное состояние электронов в нормальных металлах и сверхпроводниках. | 2 | - | 1 | 3 | КO, В, Д |
| Тема 8. Стационарный и нестационарных эффект Джозефсона. СКВИД и его применение. | 2 | - | 1 | 3 | КO, В, Д |
| Тема 9. Сверхпроводящие логические элементы, схемы и компьютеры. | 2 | - | 1 | 3 | KО, В, Д |
| Тема 10. Квантовые биты на основе сверхпроводников. Перспективы применения сверхпроводников для искусственного интеллекта. | 2 | - | 1 | 3 | КO, В, Д |
| Тема 11. Магнитные свойства твёрдых тел. Спин и обменное взаимодействие. Ферромагнетизм. | 2 | - | 1 | 3 | КO, В, Д |
| Тема 12. Аномальный эффект Холла. Спин-поляризованные токи. Спинтроника. | 2 | - | 1 | 3 | КP, В, Д |
| Промежуточная аттестация:  **Зачет** |  |  |  |  | КО, КР |
| **Итого** | **24** | **-** | **12** | **36** |  |

Формы текущего контроля успеваемости – это: проверка конспектов лекций и первоисточников (статьи, монографии, учебника, книги и пр.) (ПК); контрольный (устный / письменный) опрос (КО); контрольная работа (КР); правовой диктант (ПД); презентация доклада, выступления, реферата (П); тестирование (решение тестовых заданий) (Т); коллоквиум (К); решение кейсов (конкретных практических ситуационных заданий) (РК); разработка исследовательского мини-проекта, отчет по нему (ИП); аналитический обзор официальной и исследовательской статистики и аналитики (АО); деловая игра (ДИ); выступление на научно-практической конференции (ВК). Формы текущего контроля успеваемости по всем темам дисциплины сопровождаются устными индивидуальными выступлениями (В) и групповой дискуссией (обсуждение противоречивых, проблемных тем и вопросов) обучающихся (Д).

**5. Содержание разделов, тем дисциплины: краткое содержание дисциплины (темы** **межфакультетского учебного курса):**

**Раздел I.**

**Раздел I. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ, ТЕОРИИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ.**

**Тема 1. Основы квантовой механики.**

1. Волновые свойства электронов и других частиц. Принцип неопределённости.

Корпускулярно-волновой дуализм. Вероятностное описание поведения микрочастиц.

Понятие состояния. .Некоторые парадоксы и проблемы. Волновая функция. Плотность

вероятности. Операторы.

2. Уравнение Шредингера. Стационарное и нестационарное уравнение Шредингера.

Стационарные и нестационарные состояния. Симметрия и законы сохранения в классической

и квантовой механике. Преобразования симметрии атомов и молекул. Классификация

состояний в атомах и молекулах.

3. Спин частицы. Тождественность частиц. Связь между спином и перестановочной

симметрией частиц. Фермионы и Бозоны. Принцип Паули. Распределение Гиббса.

Равновесные функции распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Энергия Ферми

и химический потенциал. Зависимость химического потенциала от температуры.

**Тема 2. Одномерные задачи квантовой механики. Метод матриц переноса.**

1. Свободная частица в одномерном и трёхмерном случае. Частица в прямоугольной

потенциальной яме со стенками бесконечной высоты.

2. Частица в прямоугольной потенциальной яме со стенками конечной высоты. Дискретный

и непрерывный энергетический спектр.

3. Метод матриц переноса для решения одномерного уравнения Шредингера с произвольной

зависимостью потенциальной энергии от координаты.

**Тема 3. Частица в потенциальной яме и системе потенциальных ям. Примеры расчёта**

**стационарных решений методом матриц переноса.**

1. Частица в параболической потенциальной яме (гармонический осциллятор).

Сопоставление аналитического решения и решения методом матриц переноса.

2. Частица в системе из двух прямоугольных потенциальных ям с внешними стенками

бесконечной высоты, разделённых барьером конечной высоты и ширины. Расчёт методом

матриц переноса

3. Применение метода матриц переноса для расчёта энергетического спектра и волновых

функций электронов в двумерных структурах.

**Тема 4. Модель Кронига-Пенни. Расчёт стационарных решений методом матриц**

**переноса и методом сильной связи.**

1. Модель Кронига-Пенни. Постановка задачи. Граничные условия.

2. Применение метода матриц переноса для расчёта энергетического спектра и

стационарных волновых функций.

3. Метод сильной связи и его применение к модели Кронига-Пенни. Сравнение

результатов расчёта методом матриц переноса и методом сильной связи. Применение

метода матриц переноса для расчета энергетического спектра и волновых функций

электронов в сверхрешётках.

**Тема 5. Нестационарные решения уравнения Шредингера. Туннелирование частиц.**

1. Нестационарные решения уравнения Шредингера для системы двух одинаковых

потенциальных ям разделённых барьером конечной высоты и ширины. Расчёт

зависимости волновой функции от времени.

2. Нестационарные решения уравнения Шредингера для системы двух разных

потенциальных ям разделённых барьером конечной высоты и ширины.

3. Туннелирование частицы в цепочке слабо связанных потенциальных ям.

**Раздел II.**

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ И КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ**

**Тема 6. Электроны в кристаллах. Теорема Блоха. Методы расчёта зонной структуры**

**и построения поверхности Ферми в металлах.**

1. Трансляционная симметрия кристаллов. Частица в периодическом потенциале.

Теорема Блоха. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна и их построение и визуализация.

2. Методы расчёта зонной структуры. Метод сильной связи. K-p метод. Метод расчёта

зонной структуры «из первых принципов».

3. Поверхность Ферми в металлах. Построение поверхности Ферми в приближении

почти свободных электронов. Примеры построения поверхности Ферми для металлов

разной валентности. Поверхности Ферми полуметаллов.

**Тема 7. Явление сверхпроводимости. Основное состояние электронов в нормальных**

**металлах и сверхпроводниках.**

1. Нулевое сопротивление. Эффект Мейснера.

2. Эффективное притяжение между электронами в металлах. Основное состояние

сверхпроводника. Энергетическая щель. Сверхпроводящий ток. Критический ток

. Температура сверхпроводящего перехода.

3. Граница нормальный-металл-сверхпроводник. Сверхпроводники I-го и второго рода.

Смешанное состояние сверхпроводника. Эффект формы. Промежуточное состояние

в сверхпроводниках I рода. Сверхпроводящие соленоилы.

**Тема 8. Стационарный и нестационарных эффект Джозефсона. СКВИД и его**

**применение.**

1. Стационарный эффект Джозефсона. Критический ток через туннельный контакт и его

зависимость от магнитного поля. Вихри в туннельном контакте. СКВИД-магнитометры

и другие устройства на основе эффекта Джозефсона.

2. Нестационарный эффект Джозефсона. Вольт-амперная характеристика туннельного

контакта. Эталон вольта. Изучение плотности электронных состояний в

сверхпроводниках на основе анализа вольт-амперных характеристик структур

сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник и сверхпроводник-нормальный металл-

сверхпроводник.

3. Радиочастотный СКВИД и СКВИД постоянного тока. СКВИД-магнитометры. СКВИД-

датчики для шумовой термометрии. Прецизионные синтезаторы электрических сигналов

на основе эффекта Джозефсона.

**Тема 9. Сверхпроводящие логические элементы, схемы и компьютеры.**

1. Сверхпроводящие биты и регистры, основанные на квантовании магнитного потока.

2. Запись и считывание информации. Реализация логических операций.

3. Диссипация энергии при работе сверхпроводящих и полупроводниковых логических

элементов. Факторы ограничивающие разработку сверхпроводящих компьютеров.

**Тема 10. Квантовые биты и квантовые компьютеры на основе сверхпроводников.**

**Перспективы применения сверхпроводников для искусственного интеллекта.**

1. Принципы квантовых вычислений. Квантовые биты, регистры и операции над ними.

2. Квантовые биты на основе эффекта Джозефсона. Виды сверхпроводящих квантовых

битов и реализация операций над ними.

3. Перспективы применения сверхпроводящих квантовых компьютеров в системах

искусственного интеллекта.

**Тема 11. Магнитные свойства твёрдых тел. Спин и обменное взаимодействие.**

**Ферромагнетизм.**

1. Спин и магнитный момент атомов в твёрдых телах. Диамагнетики и парамагнетики.

Парамагнетизм Паули в металлах.

2. Магнитное диполь-дипольное и обменное взаимодействие Виды обменного

взаимодействия в твёрдых телах. Магнитоупорядоченные состояния.

3. Ферромагнетики. Доменная структура. Оси намагничивания. Ферромагнитные металлы

и диэлектрики.

**Тема 12. Аномальный эффект Холла. Спин-поляризованные токи. Спинтроника.**

1. Взаимодействие электронов проводимости с магнитными моментами атомов. Рассеяние электронов на магнитных примесях.

2. Аномальный эффект Холла в ферромагнетиках.

3. Спин-поляризованные токи. Спин как носитель информации. Спинтроника..

**6. Перечень вопросов для подготовки к зачёту**

**Тема 1. Основы квантовой механики.**

1. В каких явлениях проявляются волновые свойства электронов?
2. Как связаны импульс и длина волны электрона?
3. Что такое фермионы и бозоны

**Тема 2. Одномерные задачи квантовой механики. Метод матриц переноса.**

1. Запишите уравнение Шредингера для одномерного движения частицы.
2. Запишите выражение для основного волновой функции частицы в одномерной потенциальной яме со стенками бесконечной высоты
3. В чём заключается идея метода матриц переноса?

**Тема 3. Частица в потенциальной яме и системе потенциальных ям. Примеры**

**расчёта стационарных решений методом матриц переноса..**

1. Какой энергетический спектр у частицы в параболической потенциальной яме?
2. Как зависит энергия частицы в двух системе из двух потенциальных ям, разделённых барьером от высоты и ширины барьера.
3. Как применяется метод матриц переноса для расчёта электронных свойств двуменых структур?

**Тема 4. Модель Кронига-Пенни. Расчёт стационарных решений методом матриц**

**переноса и методом сильной связи..**

1. Что собой представляет собой модель Кронига-Пенни.?
2. Как зависит ширина энергетических зон от высоты и ширины энергетических барьеров?
3. Каковы граничные условия при решении уравнения Шредингера в модели Кронига-Пенни?

**Тема 5. Нестационарные решения уравнения Шредингера. Туннелирование частиц.**

1. Как получить нестационарное решение уравнения Шредингера, если известны стационарные решения?
2. Как зависит от времени средняя координата частицы в системе двух потенциальных ям, разделённых барьером?
3. В чём заключение явление туннелирования в квантовой механике?

**Тема 6. Электроны в кристаллах. Теорема Блоха. Методы расчёта зонной структуры и**

**построения поверхности Ферми в металлах.**

1. В чём заключается теорема Блоха?
2. Что такое зона Бриллюэна?
3. Что такое поверхность Ферми?

**Тема 7. Явление сверхпроводимости. Основное состояние электронов в нормальных**

**металлах и сверхпроводниках.**

1. Как объясняется нулевое сопротивление сверхпроводника?
2. В чём заключается эффект Мейснера?
3. Что такое смешанное состояние сверхпроводника?

**Тема 8. Стационарный и нестационарных эффект Джозефсона. СКВИД и его**

**применение.**

1. В чём заключается стационарный и нестационарный эффект Джозефсона?
2. Как устроен радиочастотный СКВИД-датчик?
3. Как устроен СКВИД-датчик постоянного тока

**Тема 9. Сверхпроводящие логические элементы, схемы и компьютеры.**

1. Что является носителем информации в логических схемах на основе сверхпроводников?
2. Как осуществляется считывание информации?
3. В чём основное преимущество логических схем на основе сверхпроводников?

**Тема 10. Квантовые биты и квантовые компьютеры на основе сверхпроводников.**

**Перспективы применения сверхпроводников для искусственного интеллекта.**

1. Чем отличается квантовый бит от классического?
2. Как реализуются квантовые биты на основе сверхпроводников?
3. Как реализуются операции над сверхпроводящими квантовыми битами?

**Тема 11. Магнитные свойства твёрдых тел. Спин и обменное взаимодействие.**

**Ферромагнетизм.**

1. Какие виды обменного взаимодействия в твердых телах Вы знаете?
2. В чём причина разбиения ферромагнетиков на домены?
3. В чём причина гистерезиса при намагничивании ферромагнетиков?

**Тема 12. Аномальный эффект Холла. Спин-поляризованные токи. Спинтроника.**

1. В чём заключается аномальный и нормальный эффект Холла?
2. Чем объясняется аномальный эффект Холла в ферромагнетиках?
3. Что такое спин-поляризованные токи?

**7. Ресурсное обеспечение:** п**еречень основной и дополнительной литературы**

**Основная литература:**

Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц Квантовая механика / Гл. ред. физ.-мат. лит.- 1989.- 768 С.

Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский Квазичастицы в физике конденсированного состояния / Москва Физматлит.- 2018.- 632 С.

В.В. Шмидт Введение в физику сверхпроводников. Изд.2-е, испр. и доп. М.: МЦНМО, 2000 г, 402 с.

С.В. Вонсовский Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферо- и ферримагнетиков. М.: Наука, гл. ред. физ. -матем. лит. 1971. - 1032 с.

**Дополнительная литература:**

M. Kjaergaard, M.E. Schwartz, J. Braumüller, Ph. Krantz, J.I.-J.Wang, S. Gustavsson, W.D. Oliver Superconducting Qubits: Current State of Play Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 2020 V. 11 P. 369-395.

W.J. Gallagher, E.P. Harris, M.B. Ketchen Superconductivity at IBM – a Centennial Review: Part I – Superconducting Computer and Device Applications IEEE/CSC & ESAS EUROPEAN SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM, 2012 No. 21, P. 1-35

**8. Преподаватели дисциплины:**

Кытин Владимир Геннадьевич, кандидат физ.-мат. наук, доцент, кафедры физики низкиз температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ,

e-mail: kytin@mig.phys.msu.ru,

тел. 8-495-939-11-47; 8-916-649-80-04

1. Формы текущего контроля успеваемости – это: проверка конспектов лекций и первоисточников (статьи, монографии, учебника, книги и пр.) (ПК); контрольный (устный / письменный) опрос (КО); контрольная работа (КР); правовой диктант (ПД); презентация доклада, выступления, реферата (П); тестирование (решение тестовых заданий) (Т); коллоквиум (К); решение кейсов (конкретных практических ситуационных заданий) (РК); разработка исследовательского мини-проекта, отчет по нему (ИП); аналитический обзор официальной и исследовательской статистики и аналитики (АО); деловая игра (ДИ); выступление на научно-практической конференции (ВК). Формы текущего контроля успеваемости по всем темам дисциплины сопровождаются устными индивидуальными выступлениями (В) и групповой дискуссией (обсуждение противоречивых, проблемных тем и вопросов) обучающихся (Д). [↑](#footnote-ref-1)