

Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

Московский институт электроники и математики Национального
исследовательского университета "Высшая школа экономики"

Программа дисциплины

Сверхпроводимость, магнетизм, нанофизика и макроскопические квантовые системы

для направления 11.04.04.68 «Электроника и наноэлектроника»

магистерской программы «Прикладная физика»

Автор программы:

Каган М.Ю., д.ф.-м.н., профессор, член-корреспондент РАН

Одобрена на заседании кафедры

Физическая химия и экология
Зав. кафедрой Е.Д. Пожидаев

«10» апреля 2014 г

Рекомендована секцией УМС
Председатель

«__» _____ 20 г

Утверждена УС факультета
Ученый секретарь

«__» _____ 20 г.

Москва, 2014

Настоящая программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения кафедры-разработчика программы.

Область применения и нормативные ссылки

Настоящая программа устанавливает минимальные требования к знаниям и умениям студента и определяет содержание и виды учебных занятий и отчетности.

Программа предназначена для преподавателей, ведущих данную дисциплину, учебных ассистентов и студентов направления подготовки 11.04.04.68 «Электроника и наноэлектроника» магистерской программы «Прикладная физика», изучающих дисциплину «Сверхпроводимость, магнетизм, нанофизика и макроскопические квантовые системы».

Программа разработана в соответствии с:

- ФГОС ВПО по направлению подготовки 11.04.04.68 «Электроника и наноэлектроника» квалификация (степень) "магистр";
- рабочим учебным планом университета по направлению подготовки 11.04.04.68 «Электроника и наноэлектроника», утвержденным в 2013 г.

Целью освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Сверхпроводимость, магнетизм, нанофизика и макроскопические квантовые системы» является формирование у будущих магистров основных компетенций и представлений в области наиболее передовых теоретических предсказаний и разработок по физике твёрдого тела и физике низких температур, а также возможных технических применений этих предсказаний в первой половине 21 века для создания малых электронных приборов и компьютерной техники нового поколения.

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен:

Знать

- Физические основы сверхпроводимости и сверхтекучести;
- Физические основы теории электронного транспорта в металле,
- Базовые представления теории локализации и мезоскопии;
- Базовые модели теории магнетизма и сильно-коррелированных электронных систем;
- Современные представления теории квантовых жидкостей и кристаллов

Уметь

- Правильно выбирать и применять адекватные базовые модели и подходы физики сверхпроводимости и сильно-коррелированных электронных систем при решении конкретных теоретических и прикладных задач ;
- Правильно выбирать аналитические и численные методы математического моделирования при решении уравнений и диагонализации матриц актуальных для квантово-механических и статистических задач теории сверхпроводимости и сверхтекучести

Иметь навыки (приобрести опыт)

- Решения квантово-механических задач туннельного транспорта и теории рассеяния, включая задачи подбарьерного прохождения и задачи на двухъямный потенциал;

- Работы со вторично-квантованными операторами и гамильтонианами базовых моделей для сильно-коррелированных ферми- и бозе - систем, включая модель Хаббарда.

Дисциплина «Сверхпроводимость, магнетизм, нанофизика и макроскопические квантовые системы» способствует формированию у студентов следующих компетенций:

Компетенция	Код по ФГОС/ НИУ	Дескрипторы – основные признаки освоения (показатели достижения результата)	Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции
Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической и прикладной физики с использованием современных физических методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-1	Демонстрирует способность самостоятельного решения квантово-механических и статистических задач теории сверхпроводимости современными аналитическими и численными методами	Самостоятельная работа студента, подготовка к семинарам и работа на них
Способность к разработке новых методов исследования и их применению к самостоятельной научно-исследовательской деятельности	ОПК-2	Демонстрирует способность самостоятельного выбора адекватной модели для анализа конкретного явления и наиболее удобного и надёжного метода её аналитического или численного решения	Посещение лекций, подготовка к семинарам и работа на них
Способность разрабатывать комплексное методическое обеспечение преподаваемых учебных дисциплин (модулей)	ОПК-6	Демонстрирует умение самостоятельно работать с математическими пакетами общего назначения Mathcad, Maple, Mathematica, Maxima, Matlab, специализированными пакетами моделирования физических явлений	Самостоятельные практические занятия, семинары, презентации

Место дисциплины в структуре образовательной программы

Настоящая дисциплина входит в дисциплины по выбору вариативной части магистерской образовательной программы «Прикладная физика» направления подготовки 11.04.04.68 «Электроника и наноэлектроника».

Основные положения дисциплины должны быть использованы в дальнейшем при изучении курсов Физические свойства объёмных и нано-структурированных материалов, Микро- и наноэлектроника на квантовых эффектах, Низкоразмерный магнетизм, Квантовая механика многоэлектронных систем, Физика кристаллов, Квантовая оптика и фотоника, Экспериментальные методы в криоэлектронике, Технологии полупроводниковых и сверхпроводниковых материалов, и некоторых других курсов программы “Прикладная физика”

Тематический план учебной дисциплины

№	Название раздела	Всего часов	Аудиторные часы			Самостоятельная работа
			Лекции	Семинары	Практические занятия	
1	Введение в теорию сверхпроводимости. Основные семейства и физические свойства высокотемпературных сверхпроводников	27	6		6	15
2	Магнетизм. Сильно-коррелированные электронные системы	27	6		6	15
3	Электронный транспорт в металлах. Теория локализации. Мезоскопика и нанозифика	27	6		6	15
4	Макроскопические квантовые системы (квантовые жидкости, кристаллы и газы)	27	6		6	15
	Итого	108	24		24	60

Формы контроля знаний студентов

Текущий контроль в первом модуле

В первом модуле студенты посещают лекции, проводят практические занятия и выполняют домашнее задание.

Текущий контроль во втором модуле

Во втором модуле студенты посещают лекции, проводят практические занятия и выполняют домашнее задание.

Итоговый контроль

Итоговый контроль проводится по окончании второго модуля. Контроль состоит в проведении экзамена. До экзамена допускаются только студенты, выполнившие все практические занятия и домашние задания. работу не допускается.

ВНИМАНИЕ: Оценка за итоговый контроль **блокирующая**, при неудовлетворительной итоговой оценке она равна результирующей.

Содержание дисциплины

Тема 1. Введение в теорию сверхпроводимости. Основные семейства и физические свойства высокотемпературных сверхпроводников.

Важнейшие этапы возникновения и развития физики сверхпроводников. Нобелевские премии по сверхпроводимости и сверхтекучести. Высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП). Основные свойства высокотемпературных сверхпроводников. Эффект Мейснера и Джозефсона. Функционал свободной энергии Гинзбурга-Ландау. Нелинейное уравнение Шредингера для параметра порядка и уравнение Лондона для сверхпроводящего тока. Абрикосовские вихри. Критические магнитные поля и критические токи. Длина когерентности и мейснеровская глубина проникновения. Сверхпроводники первого и второго рода. Физические свойства и кристаллографическая структура ВТСП-систем. Необычные нормальные свойства и фазовая диаграмма ВТСП-систем. Сверхпроводимость с электрон-фононным и электрон-электронным механизмом спаривания. Куперовские пары и локальные пары. Коновская особенность и фриделевские осцилляции. Сверхпроводимость Кона-Латтинжера в электронных системах с отталкиванием. Сверхпроводящая щель и различные типы сверхпроводящего спаривания. (6 часов лекций).

Семинарские занятия (6 часов занятий)

Развитие практических навыков работы с математическими пакетами общего назначения и специализированными пакетами для моделирования конкретных физических явлений. Перевод значений физических величин между основными системами СГС и СИ. Основы статистической физики. Фермионы и бозоны. Функции распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Свободный электронный газ (газ Ферми). Фазовое пространство и плотность состояний. Спектр квазичастиц в нормальном металле. Средняя энергия и теплоёмкость свободного электронного газа. Вычисление критической температуры сверхпроводящего перехода в модели БКШ с электрон-фононным притяжением. Вывод выражения для критической температуры с учётом кулоновского отталкивания (Толмачёвский логарифм). Спектр квазичастиц в сверхпроводнике. Вычисление теплоёмкости сверхпроводящего электронного газа при низких температурах. Вычисление первого и второго критического магнитного поля. Вычисление поляризационного оператора для экранированного кулоновского взаимодействия в металле и выделение из него коновской особенности. Вывод выражения для фриделевских осцилляций в 3D, 2D и 1D электронной плазме.

Самостоятельная работа: проработка материала лекций (15 часов)

Литература:

1. Каган М.Ю., Ожаровский А.В., Введение в теорию высокотемпературных сверхпроводников, М.: МИФИ, 1999 – 63 с.
2. Каган М.Ю., Физика макроскопических квантовых систем – М.: Издательский Дом "МЭИ", 2014. – 343 с. Курс лекций и семинаров на Первой высшей школы физики корпорации Росатом, г. Снежинск.
3. Киттель Ч., Квантовая теория твёрдых тел, М.Наука, 1967, 491 с.
4. Фейнман Р., Статистическая физика, М.Мир,1978, 407 с.
5. Вихман Э., Квантовая физика, Берклевский курс физики, т.4, М. Наука, Физматлит, 1977, 415 с.
6. Абрикосов А.А., Основы теории металлов, М.Наука, 1987, 520 с

7. Н. Ашкрофт, Н. Мермин, Физика твёрдого тела, М. Мир, 1979
8. В.В. Шмидт, Введение в физику сверхпроводников, М. Наука, 1982, 396 с .
9. П. Де Жен, Сверхпроводимость металлов и сплавов, М.Мир, 1966

Тема 2. Магнетизм. Сильно-коррелированные электронные системы

Базовые теоретические модели сильно-коррелированных электронных систем. Модели слабо-неидеального ферми-газа с притяжением и отталкиванием. Модель Хаббарда с притяжением и отталкиванием на решётке. Модель Шубина-Вонсовского и t - J модель . Модель Кондо-решётки и модель двойного обмена де Жена. Ферромагнетики (ФМ) и антиферромагнетики (АФМ). Парамагнетики и спиновые стёкла. Физический электрон в сильно-коррелированной среде как композитная частица. Спиноны и холоны. Конфайнмент спина и заряда в двумерных и трёхмерных электронных системах с сильным кулоновским взаимодействием. АФМ-струны Булаевского-Нагаева-Хомского. Куперовская пара в ВТСП-системах как связанное состояние двух струн.

Системы с колоссальным магнетосопротивлением (КМС). Фазовая диаграмма и транспортные свойства магнитных оксидов переходных металлов (манганиты, никелаты, кобальтиты) и магнитных полупроводников. Гигантское и туннельное магнетосопротивление.

Наноразмерное расслоение на фазы. Ферро-магнитные поляроны Нагаева-Мотта в веществах с КМС как магнитные нанокластеры перспективные для спинтроники и магнетозаписи. Туннельный электронный транспорт в фазово-расслоенном состоянии манганитов.

Низкоразмерный магнетизм. Фрустрированные спиновые решётки. Спиновый лёд. Магнитные монополи в спиновом льде и дираковские струны. Одномерные спиновые цепочки. Разделение спина и заряда в 1D системах. Спиновый коррелятор на гигантской коновской особенности и жидкость Латтинжера. Спиновые лестницы.

(6 часов лекций)

Семинарские занятия (6 часов занятий)

Основы вычислительных методов электродинамики. Уравнения Максвелла. Электро- и магнитостатика. Монохроматическое поле. Нестационарное электромагнитное поле. Электродинамические расчеты в Comsol Multiphysics. Диэлектрическая проницаемость и магнитная восприимчивость. Расчёт электродинамики нанокомпозитов.

Электронный газ в металлах. Различные симметрии кристаллической решётки. Решётка Браве. Кр Обратная решётка. Зоны Бриллюэна. Теорема Блоха. Энергетические зоны в металлах. полупроводниках и диэлектриках. Поверхности Ферми реальных металлов. Элементарные возбуждения в кристаллах –фононы и плазмоны. Спиновые волны (магноны) в ферро- и антиферромагнетиках.

Основы квантовой механики. Постановка задачи на вычисление энергий и волновых функций связанных состояний. Частица в потенциальной яме с непроницаемыми стенками. Частица в потенциальной яме конечной глубины. Порог возникновения связанного состояния в 3D системе.

Основы квантовой физики сильно-коррелированных систем. Формализм вторичного квантования. Представление чисел заполнения. Одномерный гармонический осциллятор. Волновые функции и спектр гармонического осциллятора. Решение уравнения Шредингера для заряженной частицы в однородном электрическом поле. функции Эйри. Двухчастичный и многочастичный базис.

Модели сильной связи на решётке. Спектр и энергетическая щель в модели Хаббарда. Атомный предел и приближение Хаббард-1. Модель Бозе-Хаббарда и “грязные бозоны”.

Самостоятельная работа: проработка материала лекции, подготовка к контрольной работе (15 часов)

Литература:

1. Каган М.Ю. , Ожаровский А.В., Базовые механизмы сверхпроводимости в сильно-коррелированных системах, М. МИФИ 1999, 66 с.
2. Kagan M.Yu., Modern trends in Superconductivity and Superfluidity, Lecture Notes in Physics, Springer, Dordrecht, 2013, 550 p.
3. Anderson P.W., The theory of Superconductivity in the high- T_c Cuprate Superconductors, Princeton University Press, 1997
4. Изюмов Ю.А., Кацнельсон М.И., Скрябин Ю.Н., Магнетизм коллективизированных электронов, М. Физматлит, 1994, 368 с.
5. Цвеллик А.М., Квантовая теория поля в физике конденсированного состояния, М. Физматлит , 2002, 320 с.
6. Fulde P., Electrob correlations in molecules and solids, Springer series in solid state sciences, Springer Verlag, Berlin, 1993, 422 p.
7. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., Статистическая физика, часть 2, Курс теоретической физики, т. 9, М. Наука, 1979
8. Дирак П.А.М., Лекции по теоретической физике, Ижевск, Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика” , 2001, 240 с.

Тема 3. Электронный транспорт в металлах. Теория локализации. Мезоскопика и нанофизика.

Мезоскопическая физика - введение в предмет. Полупроводниковые и сверхпроводящие структуры как основа наноэлектроники. Квантовые ямы и квантовые точки. Основные экспериментальные методы нанофизики. Молекулярно-лучевая эпитаксия для напыления однородных тонких плёнок, литография для нанесения 1D рисунков и бороздок, туннельная сканирующая микроскопия для определения атомной структуры поверхности. Квантовая инженерия и квантовая трибология.

Минимальная металлическая проводимость Мотта-Регеля в грязных металлах. Переходы металл-диэлектрик Мотта-Хаббарда и Фервея в узкозонных системах с сильными электронными корреляциями. Примесь как квантово-механический ансамбль. Интерференционные эффекты при многократном рассеянии электронов на примеси. Возвратные траектории электронов и фокусировка. Сильный и слабый беспорядок. Локализованные и делокализованные состояния. Порог подвижности в 3D системвх. Экспоненциально большая длина локализации в 2D-системах. Сильная локализация в 1D-системах (в тонких проволоках и вискерах). Переход металл-диэлектрик в модели сильного беспорядка Андерсона. Локализационные хвосты Лифшица. Классическая теория перколяции Эфроса-Шкловского. Прыжковая проводимость Мота. Кулоновская блокада и одноэлектронное туннелирование через малые гранулы. Белый шум, дробовой шум и $1/f$ –шум. Локализация световых пучков. Метаматериалы. Нанопотоника и нанопламоника.

Квантовый эффект Холла и применение в метрологии. Дробный заряд и вариационная функция Лафлина для дробного квантового эффекта Холла. Краевые токи и топологический заряд. Композитные частицы и частицы с дробной статистикой. Анионы.

Введение в теорию квантового компьютера. Стёкла и другие двухуровневые системы. Бит и кубит. Запутанные состояния. Электротехническая аналогия. Нелинейный LC-контур и джозефсоновский контур. Уравнение Шредингера для куперовского ящика. Сверхпроводящая реверсия квантового бита на джозефсоновском контакте и его полупроводниковая реализация на плазмоне механизме в сэндвичевых структурах с пространственно разделёнными квантовыми ямами.

(6 часов лекций)

Семинарские занятия (6 часов занятий).

Двухъямная задача в квантовой механике. Расчет энергий и волновых функций связанных состояний для ям одинаковой и различной глубины. Локализация плотности вероятности в случае ям разной глубины.

Формирование резонансно-туннельной структуры из нескольких дельта-функциональных барьеров. Вычисление коэффициента прохождения для такой структуры. Формирование энергетических зон в случае одномерной гребёнки потенциалов Дирака. Полуметаллы с релятивистским (дираковским) электронным спектром- висмут и графен. Парадокс Клейна

Структура энергетических зон в металлах, полупроводниках и диэлектриках. Собственные и примесные полупроводники. Физика и основные балансовые уравнения p-n перехода. Экситонные состояния в полупроводниках и принцип работы светодиода. Туннельный контакт двух металлов.

Квазиклассическая теория металлов Друде и Зоммерфельда. Проводимость и подвижность. Эффект Холла в классической физике. Локализация электронов в сильно-неупорядоченных системах в модели Андерсона и в модели Лифшица. Вычисление поправок слабой локализации в 3D системах и 2D системах конечного размера. Прыжковая проводимость Мота с переменной длиной прыжка в полупроводниках и диэлектриках. Сетка Миллера-Абрагамса. Температурная зависимость сопротивления в режиме кулоновской щели Эфроса-Шкловского.

Самостоятельная работа: проработка материала лекций, подготовка к домашнему заданию (15 часов)

Литература:

1. Й. Имри, Введение в мезоскопическую физику, М. Физматлит, 2002, 304 с.
2. И.М. Лифшиц, С.А. Градескул, Л.А. Пастур, Введение в теорию неупорядоченных систем, М.Наука, 1982, 360 с.
3. Н.Ф. Мотт, Переход металл=изолятор. М. Наука, 1978, 342 с.
4. Н. Ф. Мотт, Э.А. Давис, Электронные процессы в некристаллических веществах, М.Мир, т. 1, 350 с.
5. В.И. Шкловский, А.А. Эфрос, Электронные свойства легированных полупроводников, М. Наука, 1979, 416 с.
6. Квантовый эффект Холла, под редакцией Р. Пренджа и С. Гирвина, М.Мир, 1989, 404 с.

7. Валиев К.А., Кокин А.А., Квантовые компьютеры. Надежды и реальность. Ижевск, Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001, 352 с.
8. Бьёркен Дж.Д., Дрелл С.Д., Релятивистская квантовая теория, т.1, релятивистская квантовая механика, Новокузнецкий физ.-мат. институт, 2000

Тема 4.Макроскопические квантовые системы (квантовые жидкости, кристаллы и газы)

Классические эксперименты Капицы по термо-механическому эффекту. Законы сохранения и двухскоростная гидродинамика сверхтекучей жидкости Ландау. Первый и второй звук. Спектр элементарных возбуждений. Фононы и ротоны. Нормальная и сверхтекучая плотность. Теплоёмкость и энтропия. Критические скорости. Эксперименты Андроникашвили по вращению сверхтекучей жидкости. Квантовая решётка вихрей Фейнмана-Онзагера. Колебания вихревой решётки. Моды Ткаченко. Трёхмерные и двумерные растворы He-3 в He-4. Теория ферми-бозе смеси.

Фазовая диаграмма He-4. Критерий плавления Линдемана и параметр квантовости Де Бюра. Теория квантовых кристаллов Андреева-Лифшица. Поиск сверхтекучести в квантовых кристаллах. Эксперименты Чена по вращению квантовых кристаллов. Основы физики поверхности. Атомно-шероховатые и атомно-гладкие поверхности. Волны плавления-кристаллизации на шероховатых поверхностях квантовых кристаллов. Волны Рэлея на гладких поверхностях. Неустойчивость тангенциальных течений сверхтекучей жидкости вдоль шероховатой поверхности квантового кристалла.

Бозе-Эйнштейновская конденсация в ультрахолодных квантовых газах. Магнитные ловушки и оптические решётки. Основы методов лазерного и испарительного охлаждения в магнитных ловушках. Резонанс Фешбаха и BCS-BEC кроссовер между протяжёнными и локальными парами (молекулами) в ультрахолодных газах фермиевских изотопов Li и K.

(6 часов лекций)

Семинарские занятия (6 часов занятий)

Вывод уравнений двухскоростной гидродинамики Ландау из законов сохранения в дифференциальной форме. Вывод выражений для спектра и затухания волн первого и второго звука. Вывод выражения для первой и второй критических угловых скоростей во вращающемся сверхтекучем гелии. Вывод выражений для спектра продольного и поперечного звука в кристалле и в деформированной вихревой решётке. Вывод спектра изгибных колебаний вихрей. Основы физики капиллярных явлений. Вывод спектра капиллярных волн на мелкой и глубокой воде в классической жидкости. Вывод спектра волн плавления-кристаллизации из уравнений поверхностной гидродинамики на шероховатой границе раздела сверхтекучая жидкость-квантовый кристалл. Вывод спектра волн Рэлея на гладкой поверхности.

Основы физики турбулентности. Сильная и слабая турбулентность. Теория подобия. Число Рейнольдса. Неустойчивость Геймгольца для тангенциальных разрывов в классической гидродинамике. Ламинарный и турбулентный след. Законы Колмогорова-Обухова. Неустойчивость Рэлея-Тейлора.

Самосогласованное T-матричное приближение для построения фазовой диаграммы BCS-BEC кроссовера в резонансном ферми-газе. Составные фермионы и бозоны. Температура Саха и температура бозе-эйнштейновской конденсации для молекул. Эффект Ефимова и уравнение Скорнякова-Тер-Мартирозяна. Связанные состояния трёх и четырёх резонансно-взаимодействующих частиц.

Самостоятельная работа: проработка материала лекции, подготовка к контрольной работе (15 часов)

Литература:

1. Халатников И.М., Теория сверхтекучести, М. Наука, 1971
2. Мигдал А.Б., Качественные методы квантовой теории, М. Наука, 1975, 335 с.
3. Паттерман С., Гидродинамика сверхтекучей жидкости, М. Мир, 1978, 520 с.
4. Donnelly R.J., Experimental Superfluidity, The University of Chicago Press, 1967, 264 p.
5. Тилли Д.Р., Тилли Дж., Сверхпроводимость и сверхтекучесть, М. Мир, 1977
6. Капица П.Л., Эксперимент, теория, практика, М. Наука, 1987
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Гидродинамика, Курс теоретической физики, т.6, М. Наука, 1988
8. Kagan M. Yu., Modern Trends in superconductivity and Superfluidity, Lecture Notes in Physics, Springer, Dordrecht, 2013, 550 p.

I

Образовательные технологии

Лекции проходят в аудитории, оборудованной проектором или программой Teacher. Занятия проходят в форме лекций и практических занятий. На практических занятиях преподаватель с помощью учебного ассистента проводит лабораторные работы. Все практические занятия проходят в дисплейном классе и выполняются по индивидуальному графику составленному преподавателем для каждого студента.

В конце практического занятия проводится разбор выполнения домашних заданий в форме собеседования с преподавателем.

Для достижения хороших результатов при изучении дисциплины студентам необходимо самостоятельно дома выполнять задания, выданные преподавателем, а также разбирать материалы лекций или соответствующие темы в рекомендованных учебниках. Отдельные темы предлагаются студентам для самостоятельного изучения. На занятиях студенты выступают с сообщениями по темам, заданным для самостоятельного изучения.