

«ПРОЦЕССЫ В НАНОСТРУКТУРАХ И ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ НА ОСНОВЕ КВАНТОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА»

Аннотация

Программа курса предназначена для подготовки специалистов, обучающихся в НОЦ МГУ имени М.В.Ломоносова по специализации «Наносистемы и наноустройства» и содержит информацию, необходимую для формирования необходимого научного кругозора в этой области.

Цель курса – изучение основных макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках и структурах на их основе, макроскопических квантовых эффектов в туннельных структурах сверхмалых размеров, включая молекулярные структуры, а также изучение ключевых устройств электроники на основе джозефсоновских переходов и ключевых элементов перспективной электроники, оперирующей одиночными электронами - одноэлектроники.

Усвоение курса предполагает знания общей электродинамики, математической физики, квантовой механики.

Содержание курса.

(Курсивом выделены темы для работы в коллоквиумах)

1. **Сверхпроводимость.** Открытие явления. Опыты, доказывающие отсутствие сопротивления постоянному току. Критическое магнитное поле. Термодинамические потенциалы. Двухжидкостная модель. Теория Лондонов. Локальная электродинамика. Глубина проникновения магнитного поля. Промежуточное состояние. Энергия границы раздела сверхпроводящей и нормальной фазы. Затруднения теории Лондонов.

Распределение поля и тока в телах простейшей формы. Принцип замыкания. Кинетическая индуктивность. Влияние экрана на индуктивность. Нелокальная электродинамика Пипарда. Длина когерентности. «Чистые» и «грязные» сверхпроводники. Обобщение понятия глубины проникновения поля. Предельные случаи.

2. **Теория Гинзбурга-Ландау.** Параметр порядка. Термодинамический потенциал Гиббса. Изменение теплоемкость при переходе в сверхпроводящее состояние. Вывод уравнений Гинзбурга-Ландау. Температурная зависимость длины когерентности и глубины проникновения. Эффект близости. Энергия границы раздела сверхпроводящей и нормальной фаз. Параметр Гинзбурга-Ландау. Сверхпроводники 1 и 2 рода. Смешанное состояние.

3. **Сверхпроводники 2 рода.** Структура одиночного абрикосовского вихря. Квант потока магнитного поля. Энергия вихря и первое критическое поле. Сила Лоренца, взаимодействие вихрей. Второе критическое поле. Решетка абрикосовских вихрей. Третье критическое поле. Взаимодействие вихрей с центрами пиннига. Критический ток сверхпроводников 2 рода. Резистивное состояние. Тонкие и толстые сверхпроводящие пленки, их свойства и критические параметры. Явление распаривания.

4. **Теория БКШ и ее предпосылки.** Изотопический эффект. Обнаружение щели в спектре возбуждений сверхпроводника. Электрон-фононное взаимодействие. Куперовская пара. Основное состояние сверхпроводника. Спектр элементарных возбуждений. Плотность состояний в сверхпроводнике. Энергетическая щель, ее температурная зависимость и связь с Дебаевской частотой. Квантование магнитного потока. Туннельные эффекты в нормальных металлах и сверхпроводниках. Слабая сверхпроводимость. Туннельный Гамильтониан. Ступени Мартина-Дайема. Эффект Джозефсона.

5. **Экспериментальные доказательства существования эффекта Джозефсона.** Температурная зависимость критического тока. Влияние внешнего воздействия.

Ступеньки Шапиро. Зависимость критического тока джозефсоновского перехода от магнитного поля. Распределенный джозефсоновский переход. Джозефсоновская глубина проникновения. *Джозефсоновский вихрь. Энергия вихря. Критическое поле.* Эффект Джозефсона в слабых связях. Квантовая интерференция в туннельных джозефсоновских переходах и слабых связях. Резистивные состояния джозефсоновских переходов двух различных типов. Модель Вертхамера. Компоненты тока куперовских пар и нормальных квазичастиц. Резистивная модель. Вольт-амперные характеристики. Ток возврата. Шунтированные туннельные переходы. Электродинамические свойства джозефсоновских переходов. Устойчивость стационарных состояний. Плазменные колебания и плазменный резонанс. Резистивное состояние джозефсоновского перехода. Вольт-амперная характеристика и спектральный состав напряжения на переходе. Флуктуации и время жизни квазистационарного состояния. Воздействие флуктуаций на джозефсоновские переходы с большой и малой емкостью. Статистика критического тока. *Распределенные переходы. Пик Экка, ступеньки Фиске, "flux-flow" режим. Ширина линии джозефсоновской генерации.*

6. Джозефсоновский переход в сверхпроводящем кольце. Явление макроскопической квантовой интерференции. Одноконтактный интерферометр. Основной параметр. Энергетические барьеры между метастабильными состояниями. Динамика переключений. Одно и многоквантовые скачки. Влияние флуктуаций. Джозефсоновский переход в резистивном кольце. Радиочастотный сквид. Режимы работы. Предельные характеристики.

7. Двухконтактный интерферометр. Вольт-амперная характеристика. Зависимость максимального сверхпроводящего тока от приложенного магнитного поля. Резистивное состояние. Сквид постоянного тока. Сигнальные характеристики. Энергетическое разрешение. Оптимизация датчика сквида и входного трансформатора потока. Сквид со следящей обратной связью. Динамический диапазон. Релаксационный сквид. Цепочки сквидов. Сверхпроводящие квантовые интерференционные фильтры.

8. Применения сквидов в физических экспериментах. Особенности работы сквидов в лабораторных условиях и открытом пространстве. Ядерный магнитный резонанс и спектроскопия высокого разрешения в слабых полях. Ядерный квадрупольный резонанс и проблемы детектирования взрывчатых веществ. Магнитокардиография и

магнитоэнцефалография. ЯМР-томография в ультраслабых полях, функциональная томография мозга. Компараторы токов, гальванометры в стандартах напряжения.

9. Сверхпроводники с нетривиальным спариванием. D – сверхпроводники. Высокотемпературные сверхпроводники. Анизотропия. Модель слоистого сверхпроводника. Критические поля и токи. Оценки основных электродинамических параметров. Бикристаллические джозефсоновские переходы, другие типы переходов на основе высокотемпературных сверхпроводников. Связь сверхпроводников через ферромагнетик. Пи-переходы. Спинтроника.

10. Квантовая метрология и эффект Джозефсона. Уточнение значений физических констант. Принципы создания стандартов вольта. Стандарт напряжения на одиночном джозефсоновском переходе. Стандарты вольта на цепочках джозефсоновских переходов. Генераторы на джозефсоновских переходах и цепочках переходов. Синхронизация двух и более джозефсоновских переходов. Умножение и смешение частот.

11. Джозефсоновские переходы в СВЧ системах. Параметрические усилители на джозефсоновских переходах. Самонакачка и внешняя накачка. Смесители на джозефсоновских и квазичастичных переходах. Преобразование по частоте вверх и вниз. Характеристики современных СВЧ приемных устройств. Квантовый предел чувствительности. Квадратичные приемные устройства.

12. Физические основы применения эффекта Джозефсона в вычислительной технике. Преимущества сверхпроводниковых схем. Основные способы хранения и обработки информации. Быстрая одноквантовая логика (RSFQ logic – Rapid Single Flux Quantum logic). Концепция цифровой RSFQ электроники. Представление логической информации. Балансные компараторы. Сверхпроводниковые аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Достигнутые результаты.

13. Зарядовые эффекты в туннельных структурах из нормальных проводников. Условия наблюдения. Туннельное сопротивление. Ортодоксальная теория в рамках сосредоточенной модели. Гамильтониан системы. Выражение для вероятности туннелирования электрона в единицу времени. Матрица плотности. Уравнение Фон-Неймана. Уравнение Фоккера-Планка. Основное уравнение для рассматриваемой системы. Его решение.

14. Вольт-амперная характеристика нормального туннельного перехода сверхмалых размеров. Кулоновская блокада туннелирования и одноэлектронные осцилляции. Спектральные характеристики. Влияние температуры и шунтирующей проводимости. Вопросы экспериментальной реализации. Синхронизация одноэлектронных осцилляций внешним сигналом.

15. Одноэлектронный транзистор. Гамильтониан системы. Основное уравнение и его решение. Кулоновская блокада. Одноэлектронный транзистор как сверхчувствительный электромметр и гальванометр. Предельные характеристики. Процессы в цепочках туннельных переходов сверхмалых размеров. Вольт-амперные характеристики. Влияние локализованных зарядов. Возможные применения таких структур.

16. Сверхпроводящий туннельный переход сверхмалых размеров. Гамильтониан системы. Сильное и слабое джозефсоновское взаимодействие. Энергетический спектр. Основное уравнение для рассматриваемой системы и уравнение Ланжевена. Кулоновская блокада туннелирования куперовских пар. Блоховские осцилляции. Вольт-амперная характеристика. Квантовое макроскопическое туннелирование. Синхронизация блоховских осцилляций внешним сигналом.

17. Сосуществование одноэлектронных и блоховских колебаний. Основная система уравнений. Вольт-амперная характеристика. Спектральные характеристики. Зенеровское туннелирование. Влияние температуры и шунтирующей проводимости. Блоховский транзистор. Сосуществование блоховских и джозефсоновских осцилляций в сверхпроводящем транзисторе.

18. Эффект четности в сверхпроводниках. Андреевское отражение электронов. Кулоновская блокада андреевского отражения. Основные эксперименты. Андреевские уровни в SNS переходе. Связь между различными макроскопическими квантовыми эффектами в сверхпроводниках. Дуальность эффектов. Переход к структурам сверхмалых размеров на основе молекулярных кластеров.

19. Молекулярная одноэлектроника. Собственная емкость молекулярных объектов. Взаимная емкость. Энергетические спектры молекулярных объектов и их зависимость от зарядового состояния и приложенного электрического поля. Методы расчета транспортных характеристик молекулярных одноэлектронных устройств. Особенности

транспортных характеристик и диаграмм стабильности. Решение обратной задачи.
Состояние экспериментальное исследований.

Список литературы

1. В.В. Шмидт. Введение в физику сверхпроводников. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: МЦНМО, 2000.
2. К.К. Лихарев, Б.Т. Ульрих. Динамика систем с джозефсоновскими переходами. сверхпроводимость. К. К. Лихарев; Б. Т. Ульрих, Системы с джозефсоновскими контактами. М.: Изд-во МГУ, 1978.
3. К. К Лихарев, Введение в динамику джозефсоновских переходов, М.: Наука, 1985.
4. К. К. Likharev, Dynamics of Josephson Junctions and Circuits, "Gordon and Breach" Science Publishers, 1986.
5. В. К. Корнев, "Эффект джозефсона и его применение в сверхпроводниковой электронике", Соросовский образовательный журнал, том 7, № 8, 2001, с. 83-90.
6. Т. Ван Дузер, Ч.У. Тернер. Физические основы сверхпроводниковых устройств и цепей. М., Радио и связь, 1984.
7. М. Тинкхам. Введение в сверхпроводимость. М., Атомиздат, 1980.
8. Э Линтон. Сверхпроводимость. М., Мир, 1971.
9. П. Де Жен. Сверхпроводимость металлов и сплавов. М., Мир, 1968.
10. Л.Н. Булаевский, В.Л. Гинзбург, А.А. Собянин. Макроскопическая теория сверхпроводников с малой длиной когерентности. ЖЭТФ, т. 94, вып. 7, с. 355, 1988.
11. Konstantin K. Likharev, "Single-Electron Devices and Their applications", Proceedings of the IEEE, vol. 87, No. 4, 1999, p. 606-632.
12. К.К. Likharev, "Correlated discrete transfer of single electrons in ultrasmall tunnel junctions", IBM Journal of Research and Development, Vol. 32, No 1, pp. 144-158 (1988).
13. D.V. Averin and K.K. Likharev, "Single-Electronics: A correlated transfer of electrons and Cooper pairs in systems of small tunnel junctions" in: Mesoscopic Phenomena in Solids, Chapter 6, ed. by B.L. Altshuler, P.A. Lee and R.A. Webb, Elsevier Science Publishers B.V., 1991.

14. Д.В. Аверин, К.К. Лихарев, "Когерентные колебания в туннельных переходах малых размеров", ЖЭТФ, 1986, т. 90, вып. 2, с. 733-743.
15. Д.В. Аверин, "Характеристики туннельных переходов малых размеров в пределе нулевого внешнего тока", ЖЭТФ, 1986, т. 90, вып. 6, с. 2226-2232.
16. D.V. Averin and K.K. Likharev, "Possible applications of the single-charge tunneling", in: "Single-charge tunneling", ed. by M. Devoret and H. Grabert.
17. D.V. Averin and K.K. Likharev, "Coulomb blockade of single-electron tunneling, and coherent oscillations in small tunnel junctions", Journal of Low temperature Physics, Vol.62, No. 3/4, pp. 345-373 (1986).
18. K.K. Likharev and A.B. Zorin, "Theory of the Bloch-wave oscillations in small Josephson junctions", Journal of Low Temp. Physics, Vol. 59, No. 3/4, pp. 347-382 (1985).
19. M.T. Tuominen, J.M. Hergenrother, et al., "Even-odd asymmetry of superconductor revealed by the Coulomb blockade of Andreev reflection", Phys. Rev. Lett., Vol.70, No.12, pp. 1862-1865 (1993).
20. P. Lafarge, P. Loyez, et al., "Measurement of even-odd free-energy difference of an isolated superconductor", Phys. Rev. Lett., Vol.70, No.7, pp. 994-997 (1993).