

На правах рукописи

Силаев Михаил Андреевич

**ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ТРАНСПОРТНЫЕ
СВОЙСТВА СМЕШАННОГО СОСТОЯНИЯ
МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

Специальность 01. 04. 07 - физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Нижний Новгород - 2008

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Мельников Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Зюзин Александр Юрьевич
ФТИ им. А.Ф. Иоффе
доктор физико-математических наук
Сатанин Аркадий Михайлович
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Ведущая организация: Институт теоретической физики
им. Л.Д. Ландау РАН, Москва

Защита состоится 25 сентября 2008 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 Института Физики Микроструктур РАН (603950, Нижний Новгород, ГСП-105)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Физики Микроструктур РАН.

Автореферат разослан “25” августа 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических
наук, профессор

К.П. Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Свойства вихревого состояния сверхпроводников активно исследуются на протяжении нескольких десятилетий. Одной из фундаментальных задач в этой области является изучение электронной структуры вихревого состояния. Большинство обычных сверхпроводников, обладающих s -типом симметрии параметра порядка, характеризуются конечным значением щели в спектре квазичастичных возбуждений Δ_0 на всей поверхности Ферми. Переход в вихревое состояние в достаточно сильном магнитном поле $H > H_{c1}$ сопровождается существенным подавлением щели, что связано с появлением состояний, локализованных вблизи вихревых центров. Особенный интерес, который вызывает исследование таких состояний, обусловлен тем, что именно они определяют низкотемпературное поведение термодинамических и транспортных характеристик сверхпроводников в магнитном поле. Как было впервые показано в классической работе Caroli- de Gennes- Matricon [1], с каждым отдельным вихрем связана так называемая аномальная ветка в спектре квазичастиц. Энергия подщелевых уровней, соответствующих этой ветке, меняется в пределах от $-\Delta_0$ до Δ_0 и является нечетной функцией углового момента квазичастиц, определенного относительно вихревой оси.

В последнее время ведутся интенсивные исследования структуры вихревого состояния в сверхпроводниках субмикронных размеров с размерами порядка нескольких длин когерентности [3,4]. В таких системах (т.н. мезоскопических сверхпроводниках) оказывается возможным существование экзотических вихревых состояний: многоквантовых вихрей и вихревых молекул с размером, меньшим длины когерентности. Наряду с детальным исследованием структуры параметра порядка в новых вихревых конфигурациях естественный интерес вызывает развитие теории электронных состояний в таких системах. При этом представляется необходимым выполнить обобщение теории Caroli- de Gennes- Matricon на случай многовихревых конфигураций с учетом как межвихревого туннелирования квазичастиц, так и образования многоквантовых вихрей. Также для корректного описания электронной структуры мезоскопического сверхпроводника надо учесть эффекты, связанные с нормальным рассеянием квазичастиц. Как было показано в работе Ларкина и Овчинникова [4], существенная модификация спектра может быть вызвана даже малым количеством примесей атомарных размеров. Естественно ожидать, что роль нормального рассеяния на границах образца должна быть особенно важной при рассмотрении спектра вихрей в мезоскопическом сверхпроводнике малых размеров.

Экспериментальное исследование особенностей электронной структуры может быть осуществлено, например, с использованием сканирующей туннельной спектроскопии [5], а также при измерениях теплового транспорта вдоль

направления магнитного поля [6]. Поэтому представляются актуальными расчеты плотности электронных состояний и обобщение теоретического анализа теплового транспорта вдоль вихрей с учетом граничных эффектов.

Недавно (см., например, работу [7]) был разработан метод диагностики вихревого состояния мезоскопических сверхпроводников с помощью измерения туннельного электрического кондактанса в разных точках образца: "Multiple-Small-Tunnel-Junction method". Этот метод позволяет определить магнитное поле входа вихря в образец, а также переход вихревая молекула- гигантский вихрь, ассоциируя переходы между различными вихревыми конфигурациями со скачкообразными изменениями сопротивления контактов. В этой связи представляется интересным провести теоретический анализ влияния вихрей Абрикосова на транспортные характеристики контактов нормальный металл/сверхпроводник. Основной физической эффект, который предполагается исследовать, состоит в том, что наличие подщелевых квазичастичных состояний, локализованных на вихрях, должно приводить к резонансному увеличению туннельного кондактанса контакта. Заметим, что аналогичный эффект имеет место в туннельных контактах с рядом сверхпроводников, обладающих необычным типом спаривания. В этом случае увеличение кондактанса происходит за счет резонансного туннелирования электронов из нормальной в сверхпроводящую область через поверхностные андреевские состояния, локализованные на границе сверхпроводника [9, 10, 11, 12, 13, 14].

Наличие связанных андреевских состояний, локализованных вблизи границ, примесей и других центров нормального рассеяния квазичастиц, является одной из важных особенностей сверхпроводников с необычным типом спаривания. Примерами необычных сверхпроводников являются многие сверхпроводящие купратные соединения, такие как $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, в которых реализуется сверхпроводящее состояние с симметрией d-типа. Также в последнее время интенсивно ведутся исследования сверхпроводящего состояния в соединении Sr_2RuO_4 , предположительно обладающем киральным p-типом спаривания [14]. Спектр поверхностных состояний в киральных сверхпроводниках нетривиальным образом зависит от направления внешнего магнитного поля [15], а также от значения завихренности в случае, если вблизи поверхности расположен вихрь Абрикосова. Характерная длина локализации поверхностных состояний определяется длиной когерентности. Поэтому естественно ожидать, что электронная структура киральных мезоскопических сверхпроводников с необычной симметрией будет существенно зависеть от геометрии границы и размеров образца (в случае d- симметрии подобные эффекты исследовались, например, в работах [12, 13]). Таким образом, представляются актуальными расчеты электронной структуры киральных мезоскопических сверхпроводников в магнитном поле.

Цель работы

1. Разработка аналитического метода расчета квазичастичного спектра в смешанном состоянии сверхпроводников второго рода в области достаточно низких магнитных полей. Изучение трансформации спектра при формировании вихревого кластера, связанного межвихревым квазичастичным туннелированием.

2. Исследование электронной структуры смешанного состояния в мезоскопических сверхпроводниках с учетом влияния нормального рассеяния на границах образца на спектр андреевских уровней. Расчет спектра квазичастиц и анализ измеримых характеристик, таких, как тепловой кондактанс и плотность состояний.

3. Изучение зарядового транспорта в баллистических контактах нормальный металл/сверхпроводник (N/S) в магнитном поле. Вычисление кондактанса контакта N/S с учетом резонансного андреевского туннелирования электронов из нормального металла в сверхпроводник через состояния Caroli- de Gennes-Matricon, локализованные в корах вихрей.

4. Исследование электронного спектра вихря в мезоскопическом сверхпроводящем диске с киральной симметрией параметра порядка. Расчет спектра с учетом гибридизации поверхностных квазичастичных состояний, локализованных на границе диска, и состояний, локализованных в коре вихря.

Научная новизна

Научная новизна работы определяется оригинальностью поставленных задач, полученными новыми результатами и заключается в следующем:

1. Проанализирована трансформация аномальных веток квазичастичного спектра при образовании вихревого кластера конечных размеров.

2. Рассчитаны квазичастичные спектры и вычислен тепловой кондактанс вдоль магнитного поля для различных вихревых конфигураций в мезоскопических сверхпроводниках.

3. Предсказан эффект увеличения кондактанса баллистических контактов нормальный металл/сверхпроводник под воздействием магнитного поля за счет резонансного андреевского туннелирования электронов через подщелевые уровни в корах вихрей Абрикосова.

4. Исследовано влияние магнитного поля на квазичастичный спектр в мезоскопическом киральном сверхпроводнике.

Научная и практическая значимость

Научная и практическая значимость результатов заключается в следующем.

- С точки зрения приложений, большой интерес представляет возможность управления квантовым транспортом в сверхпроводниках внешним магнитным полем в связи с возможным применением подобных систем в микроэлектронике. Проведенные расчеты тепловой и электрической проводимости для различных вихревых конфигураций позволяют сделать вывод о том, как должны зависеть транспортные характеристики сверхпроводящих образцов от внешнего магнитного поля.

- Измерения теплового контактанса являются одним из важных способов экспериментального исследования спектра квазичастичных возбуждений в сверхпроводниках. Результаты теоретического исследования теплового транспорта, представленные в диссертационной работе, могут быть использованы для интерпретации подобных экспериментов в смешанном состоянии сверхпроводников. На основе расчетов зависимости теплового контактанса от магнитного поля может быть разработана новая методика диагностики вихревого состояния мезоскопических сверхпроводников.

- Результаты исследования спектра квазичастиц в киральном мезоскопическом сверхпроводнике позволяют предложить способ определения киральности сверхпроводящего состояния на основе хорошо разработанных методов туннельной спектроскопии.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Рассчитаны квазичастичные спектры и вычислен тепловой контактанс вдоль магнитного поля для различных вихревых структур в мезоскопических сверхпроводниках. Исследован переход от квазичастичного спектра многоквантового вихря к спектру отдельных вихрей, происходящий при уменьшении внешнего магнитного поля. Предложен сценарий исчезновения аномальной ветки в квазичастичном спектре при выходе вихря через границу сверхпроводника. Показано, что тепловой контактанс растёт при сближении вихрей, когда расстояние между вихрями становится меньше некоторого критического значения, составляющего несколько длин когерентности. Также показано, что нормальное рассеяние квазичастиц на границах мезоскопического образца приводит к существенной стимуляции теплового транспорта вдоль вихревых линий.

2. Показано, что рост концентрации вихрей Абрикосова в баллистическом контакте нормальный металл/ изолятор/ сверхпроводник приводит к значительному увеличению контактанса с ростом магнитного поля. Такое поведение контактанса вызвано резонансными переходами электронов из нормального контакта в квазичастичные состояния, локализованные на вихрях. При этом конверсия нормального тока в сверхпроводящий становится более эффективной, чем в отсутствие вихрей.

3. Исследовано влияние внешнего магнитного поля на квазичастичный спектр в мезоскопическом киральном сверхпроводнике. Рассмотрен случай ци-

линдрической геометрии образца. Найдено точное выражение для спектра поверхностных состояний, состоящего из набора аномальных веток, пересекающих уровень Ферми. Показано, что наличие в образце вихря Абрикосова приводит к существенной трансформации спектра вблизи пересечения аномальных веток спектра поверхностных и вихревых состояний. В зависимости от ориентации вихря расщепление веток может приводить к возникновению минищелей в спектре. Ширина минищелей и положение соответствующих особенностей плотности состояний определяется величиной магнитного поля.

Личный вклад автора в получение результатов

Соискатель принимал участие в постановке и решении теоретических задач, в обсуждении полученных результатов и их интерпретации. В частности, вклад автора в решение задачи о квазичастичном спектре и транспортных свойствах мезоскопических сверхпроводников в магнитном поле является равноценным совместно с А.С. Мельниковым и Д.А. Рыжовым [А1, А2, А5, А6, А7, А8, А10, А12]. Вклад автора в постановку и решение задачи о контактансе контакта нормальный металл/сверхпроводник в магнитном поле [А3, А9, А11], а также об электронном спектре вихря в мезоскопическом сверхпроводнике с киральной симметрией параметра порядка [А4] является определяющим.

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались на семинарах в ИФМ РАН; в Технологическом университете г. Хельсинки (Low Temperature laboratory, Helsinki University of Technology, Finland); в Католическом университете г. Левен (Institute for Nanoscale Physics and Chemistry, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium). Материалы диссертационной работы были представлены на международных конференциях: NanoPeter-2006, Meso-06, ФПС-2006, Дубна-Нано 2008, Spin helicity and chirality in superconductor and semiconductor nanostructures (Karlsruhe, 2008), а также на международных симпозиумах Нанофизика и наноэлектроника (2006, 2007, 2008).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ (5 статей в реферируемых научных журналах и 7 - в сборниках тезисов докладов).

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения, списка публикаций автора и списка цитируемой литературы из 100 наименований. Общий объем - 121 страница, в диссертации приведено 24 рисунка.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели диссертационной работы, показана ее научная новизна, а также представлены сведения о структуре и содержании работы, приводятся положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена изучению в рамках теории Боголюбова- де Жена низкоэнергетической части квазичастичного спектра и теплового контактанса смешанного состояния мезоскопического сверхпроводника. На примере системы, состоящей из двух вихрей, изучена трансформация квазичастичного спектра при расщеплении многоквантового вихря на отдельные вихри, происходящая при уменьшении магнитного поля. Для случая, когда вихри расположены близко к поверхности сверхпроводника, исследовано влияние нормального отражения квазичастиц от границы образца (как плоской, так и конечной кривизны) на спектр и плотность состояний.

Рассмотрена трансформация спектра квазичастиц, происходящая при образовании многоквантового вихря из отдельных одноквантовых вихрей при увеличении магнитного поля, на примере двухквантового вихря. Если расстояние a между вихрями велико ($a \gg \xi$, где ξ – длина когерентности), то спектр определяется выражением Caroli- de Gennes- Matricon: $\varepsilon \approx -\mu\omega$ [1], где μ – угловое квантовое число, $\omega = \omega_0 k_F / k_\perp$, ($k_\perp^2 = k_F^2 - k_z^2$, k_F – фермиевский волновой вектор, k_z – его проекция вдоль магнитного поля, $\omega_0 \approx \Delta_0 / (k_F \xi)$ – минимальное расстояние между уровнями, Δ_0 – амплитуда сверхпроводящей щели). В системе отсчета, где угловой момент определен относительно точки, лежащей посередине между вихрями, изоэнергетические линии представляют собой две пересекающиеся классические орбиты на плоскости (μ, θ_p) (пунктирные линии на Рис.1). Здесь θ_p – угол, определяющий направление импульса Ферми

Эти орбиты соответствуют траекториям квазичастиц в реальном пространстве, проходящим через коры вихрей. Вблизи точек пресечения орбит необходимо учитывать конечную вероятность перехода квазичастиц с одной траектории на другую, т.е. туннелирование между вихрями, приводящее к расщеплению по μ орбит в (μ, θ_p) - пространстве. Расщеплённые орбиты изображены сплошными линиями на Рис.1а. В рамках теории Боголюбова–де Жена (БдЖ) с

учёт туннелирования Ландау–Зинера между орбитами в (μ, θ_p) - пространстве, получено выражение для спектра квазичастиц (см. также Рис.2):

$$\cos(\pi\varepsilon/\omega) = \pm e^{-\pi p^2/4} \sqrt{2 \operatorname{sh}(\pi p^2/2)} \sin \chi. \quad (1) \quad \text{Здесь } p =$$

$J/[\omega(k, a/2)^{1/2}], J = \Delta_0 \exp(-K_0(a/2))/\Lambda,$

$$\Lambda = \frac{2k_F}{k_{\perp} \xi} \int_0^{\infty} e^{-K_0(s)} ds, \quad K_0(s) = \frac{2m}{\hbar^2 k_{\perp}} \int_0^s \Delta(t) dt, \quad (2)$$

$$\chi = k_{\perp} a + p^2 \ln(\theta^* \sqrt{k_{\perp} a}) + \arg \Gamma(1 - i p^2/2) + \pi/4, \quad (3) \quad \text{пара-}$$

метр $\theta^* \sim \xi/a$ определяет ширину области углов ориентации траектории, для которых важно учитывать туннелирование квазичастиц между вихрями. Когда расстояние становится меньше критического $a < a_c \approx \xi \ln(k_F \xi)$, уровни энергии начинают соприкасаться, появляются квазичастичные состояния на уровне Ферми [Рис. 2б] и при дальнейшем уменьшении межвихревого расстояния происходит переход к спектру многоквантового вихря.

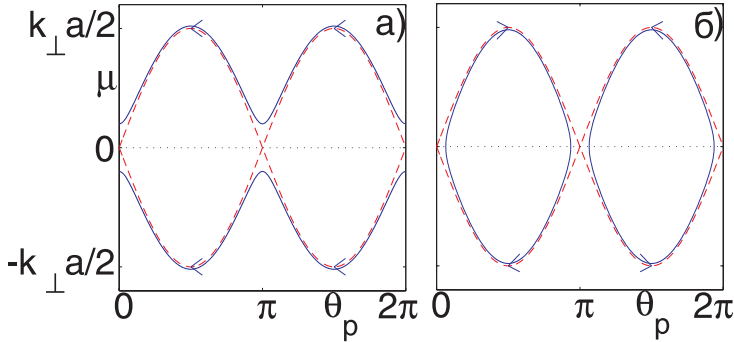


Рис.1. Классические орбиты на плоскости (μ, θ_p) с $\varepsilon \approx 0$ для а) системы двух вихрей, б) вихря вблизи плоской границы и двух невзаимодействующих вихрей (пунктирные линии).

С увеличением магнитного поля вихри сближаются, расщепление изоэнергетических линий по μ увеличивается и необходимо учитывать большее число угловых гармоник. В этом случае ($a \leq a_c$) проще получить спектр квазичастиц для близко расположенных вихрей по теории возмущений, решая задачу о распаде многоквантового вихря. Пользуясь квазиклассическим описанием движения квазичастиц по прямолинейным траекториям, в рамках теории БдЖ можно получить спектр как функцию непрерывной переменной μ . Дискретный спектр можно получить, используя правило квантования Бора-Зоммерфельда:

$$S(\varepsilon, k_z) = \int_0^{2\pi} \mu(\varepsilon, k_z, \theta_p) d\theta_p = 2\pi(n + \beta), \quad (4)$$

где $S(\varepsilon, k_z)$ - площадь под линией $\mu(\varepsilon, k_z, \theta_p)$, n - целое число, $\beta \sim 1$. Формула (4) применима, когда расстояния между вихрями настолько малы, что величины всех расщеплений $\delta\mu \gg \Delta\mu$, где $\Delta\mu$ - квантовая неопределенность углового момента, то есть, когда можно пренебречь туннелированием Ландау-Зинера.

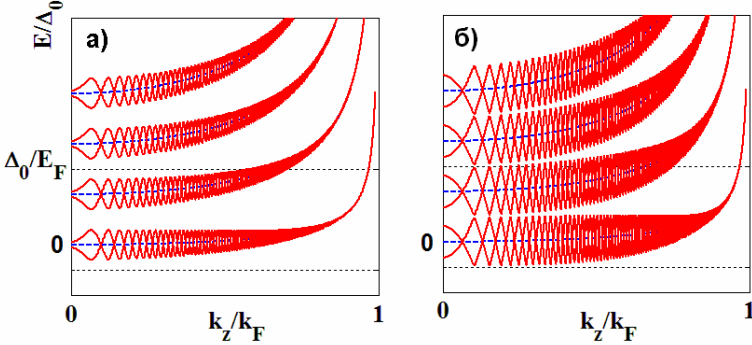


Рис.2. Квазичастичный спектр для системы двух вихрей, находящихся на расстоянии а) $a=5\xi$ и б) $a=3,5\xi$. Спектр Caroli- de Gennes- Matricon показан пунктирными линиями.

В мезоскопических сверхпроводниках необходимо учитывать нормальное отражение квазичастиц от границ образца, также приводящее к модификации спектра квазичастиц. Эффекты, связанные с нормальным отражением, становятся важными, когда вихри находятся вблизи границы образца. В случае плоской границы можно использовать метод отражений, рассматривая задачу о спектре квазичастиц для пары вихрь – антивихрь во всём пространстве. Для антивихря движение по орбите в (μ, θ_p) – пространстве происходит в обратную сторону. Расщепление орбит в этом случае происходит по углу θ_p [см. Рис.16]. Правило квантования Бора–Зоммерфельда нужно применять к обеим замкнутым траекториям, но при этом половина решений для спектра окажутся фиктивными, поскольку они соответствуют волновым функциям, чётным относительно границы. Учитывая соответствующие правила отбора и туннелирование Ландау – Зинера, мы получаем спектр, изображённый на Рис.3.

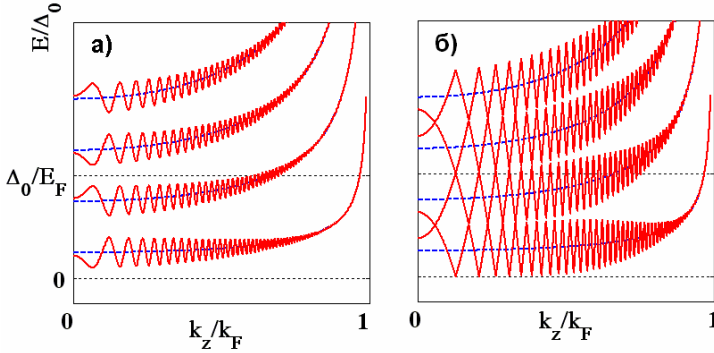


Рис.3 Квазичастичный спектр для вихря, находящегося на расстоянии а) $d=2,5\xi$ и б) $d=1,75\xi$ от плоской границы.

Таким образом, когда расстояние становится меньше критического $\xi < d < d_c \approx (\xi/2) \ln(k_F \xi)$, спектр трансформируется так же, как и при сближении двух вихрей. Когда d становится меньше ξ , заметным образом начинает увеличиваться расстояние между уровнями, и при выходе вихря из образца аномальные ветки подщелевого спектра исчезают.

Экспериментально модификация аномальных веток спектра квазичастиц может быть изучена, например, с помощью сканирующей туннельной микроскопии или измерения характеристик низкотемпературного теплового транспорта. На основе полученных спектров мы рассчитали плотность квазичастичных состояний и зависимость теплового кондактанса вдоль вихрей от магнитного поля и температуры. С ростом магнитного поля (уменьшением расстояния между вихрями) плотность состояний эволюционирует к плотности состояний двухквантового вихря $\nu_2 = 2\nu_0 = k_F / (2\omega_0)$.

Основываясь на теории Ландауэра [16], мы рассчитали тепловой кондактанс системы двух вихрей и вихря вблизи границы мезоскопического сверхпроводника в баллистическом режиме для полученных дискретных спектров. В расчетах мы пренебрегли эффектами рассеяния квазичастиц на границах сверхпроводник/нормальный металл. Тепловой кондактанс может быть выражен в единицах $\kappa_0 = T/(3\hbar)$, где T – температура (что соответствует кондактансу одной моды в нормальном состоянии): $\kappa = \kappa_0 N_{eff}$, где эффективное число мод N_{eff} можно интерпретировать как число распространяющихся в сверхпроводнике волн, переносящих тепло. Было получено, что при увеличении расстояния между вихрями эффективное число мод убывает от величины $k_F \xi$, что соответствует числу мод с нулевой энергией в спектре двухквантового вихря, до величины порядка T/ω_0 , определяющей число эффективных мод для одноквантового вихря.

Вторая глава посвящена исследованию кондактанса N/S контакта во внешнем магнитном поле. Предполагается, что магнитное поле, параллельное

плоскости контакта, создает в сверхпроводнике вихри Абрикосова вблизи границы с нормальным металлом (см. Рис. 4). Нормальная и сверхпроводящая области разделены потенциальным барьером, подавляющим андреевское отражение и транспорт заряда через N/S границу. В работе показано, что наличие вихрей приводит к сильному увеличению кондактанса контакта благодаря резонансному андреевскому туннелированию через подщелевые квазичастичные состояния, локализованные на вихрях. Аналогичный эффект имеет место в двухбарьерном резонансно-туннельном диоде. Вероятность туннелирования через двухбарьерную квантовую структуру увеличивается, когда энергия падающих частиц совпадает с некоторыми резонансными уровнями, соответствующими связанным состояниям в квантовой яме. В этом случае амплитуда отраженной волны подавляется благодаря интерференции волн в квантовой яме. В нашем случае роль квантовой ямы играет кор вихря, и связанное квазичастичное состояние состоит из электронной и дырочной волн почти одинаковой амплитуды. Поэтому, когда энергия падающего электрона имеет резонансное значение, вероятность отражения электронной волны подавляется, а вероятность андреевского отражения увеличивается за счет туннелирования дырок из кора вихря в область нормального металла.

Безразмерный кондактанс [в единицах $e^2/(\pi\hbar)$], индуцированный одним вихрем при нуле температур выражается следующей формулой:

$$G_v \sim N_r e^{-2a/\xi} T_s, \quad (8), \quad \text{где}$$

a - расстояние от вихря до N/S границы, ξ - длина когерентности, k_F - фермиевский волновой вектор, $N_r \sim k_F \xi$ - число резонансных поперечных мод, эффективно взаимодействующих с квазичастичными состояниями, локализованными в корах вихрей.

Фактор $e^{-2a/\xi} T_s$ определяется вероятностью туннелирования из нормального металла в кор вихря через барьер с прозрачностью T_s и слой сверхпроводника шириной a с прозрачностью $e^{-2a/\xi}$.

Полный кондактанс, индуцированный вихревой цепочкой, равен сумме вкладов от отдельных вихрей: $G_{vt} = n_v G_v$, где $n_v = L_y/L_v$ - полное число вихрей вблизи плоскости контакта. Наряду с резонансным механизмом андреевского отражения существует также и нерезонансная схема двухчастичного туннелирования через поверхностный барьер с вероятностью T_s^2 . Соответствующий кондактанс можно оценить как $G_0 \sim N_0 T_s^2$, где $N_0 = k_F L_y/\pi$ - число поперечных мод в контакте. Поэтому полный кондактанс контакта равен

$$G = \alpha N_0 T_s^2 + n_v \beta N_r e^{-2a/\xi} T_s, \quad (9)$$

где $\alpha, \beta \sim 1$.

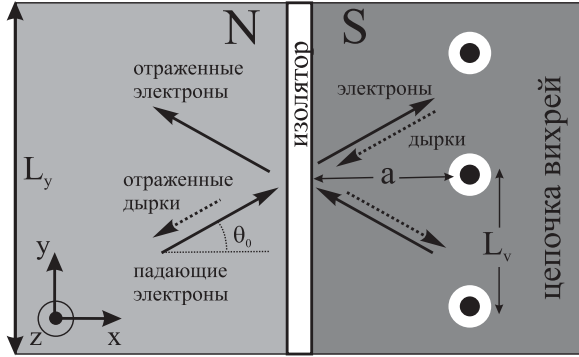


Рис.4. Геометрия N/S контакта и схематичное изображение траекторий квазичастиц. Ширина контакта L_y , магнитное поле направлено вдоль оси z. Расстояние от вихревой цепочки до N/S границы a , расстояние между вихрями L_v .

С уменьшением прозрачности барьера и расстояния a растет вклад резонансного андреевского отражения в кондактанс. Этот вклад становится определяющим, когда расстояние от вихрей до N/S границы меньше порогового значения $a_c = \xi \ln[L_v / (\xi T_s)]$.

Для качественной оценки зависимости кондактанса от внешнего магнитного поля B положим $a, L_v \sim \sqrt{\phi_0 / B}$, где $\phi_0 = \pi \hbar c / e$ - квант магнитного потока. Тогда, в случае малой прозрачности контакта, зависимость кондактанса от поля имеет следующий вид:

$$G_{vt} \sim N_0 \sqrt{\frac{B}{H_{c2}}} e^{-2\sqrt{H_{c2}/B}} T_s, \quad (10)$$

где $H_{c2} \sim \phi_0 / \xi^2$ - верхнее критическое поле. Таким образом, при увеличении поля кондактанс увеличивается от значения $N_0 T_s^2$ в нулевом поле до $N_0 T_s$ при $B \sim H_{c2}$.

В третьей главе исследуется электронный спектр в мезоскопическом сверхпроводнике с киральной симметрией параметра порядка. В последнее время ведутся активные исследования необычной сверхпроводимости в недавно открытом соединении Sr_2RuO_4 [14]. Сверхпроводимость в этом материале имеет нетривиальную спиновую структуру: куперовские пары находятся в триплет-

ном состоянии. Таким образом, в силу принципа Паули орбитальное состояние куперовских пар должно быть пространственно нечетным, т.е. соответствовать нечетному значению орбитального момента относительного движения электронов в паре. Такая нетривиальная структура щели в импульсном пространстве приводит к появлению поверхностных состояний на границе сверхпроводник/изолятор [8].

Под действием магнитного поля, создающего экранирующие токи и вихри в сверхпроводнике, уровни поверхностных состояний модифицируются из-за эффекта доплеровского сдвига энергии, что приводит к расщеплению пика контактанса [10].

Если в киральном сверхпроводнике появляется вихрь Абрикосова, то кроме эффекта доплеровского сдвига [12] необходимо также учитывать гибридизацию поверхностных и вихревых состояний [1]. В этом случае, модификация спектра определяется перекрытием волновых функций квазичастиц, локализованных вблизи поверхности сверхпроводника и в коре вихря. В работе рассмотрена модельная ситуация, когда сверхпроводящий образец представляет собой идеальный диск в плоскости (xy) . Поскольку система обладает аксиальной симметрией, спектр поверхностных состояний может быть выражен как функция углового момента μ . Как и в предыдущих главах, мы предполагали справедливость квазиклассического приближения, рассматривая движение квазичастиц вдоль прямолинейных траекторий, направление которых определяется импульсом квазичастиц. Используя аналогию с точечным контактом Джозефсона, можно записать энергию поверхностных состояний в виде: $\varepsilon_s = -\Delta_0 \cos(\varphi/2)$, где $0 < \varphi < 2\pi$ - разность фаз параметра порядка для падающей и отраженной квазичастицы. При отражении траектории от границы диска угол θ_p преобразуется как $\theta_p \rightarrow \theta_p + \pi + 2\arcsin(b/R)$, где $b = -\mu/k_F$ - прицельный параметр, т.е. расстояние от траектории до центра диска, R - радиус диска. В случае, когда параметр порядка является пространственно-однородным (отсутствуют сверхпроводящие токи), нетрудно получить, что $\varphi = [\chi(\pi + 2\arcsin(b/R))] \bmod(2\pi)$, а спектр состоит из набора аномальных веток [18, 19]:

$$\varepsilon_{sj}(\mu) \approx -(\mu - \mu_j) \omega_{sj}, \quad (11)$$

где $j=1..$ χ и $\mu_j = (k_F R) \sin(\pi n_j / 2 \chi)$. Целочисленный индекс n_j из интервала $-\chi < n_j < \chi$ должен быть выбран таким образом, чтобы разность $(\chi - n_j)$ была нечетной. Как было показано в работе [17], спектр поверхностных состояний (12) похож на спектр квазичастиц, локализованных в коре многоквантового вихря [19]. Расстояние между дискретными уровнями, принадлежащими аномальным веткам $\omega_{sj} = \chi \Delta_0 / (k_F R \cos(\pi n_j / 2 \chi))$, намного меньше, чем щель в спектре безграничного сверхпроводника Δ_0 , поскольку $k_F R \gg 1$. Поэтому аномальные ветки могут рассматриваться как непрерывные функции прицельного параметра $b = -\mu/k_F$.

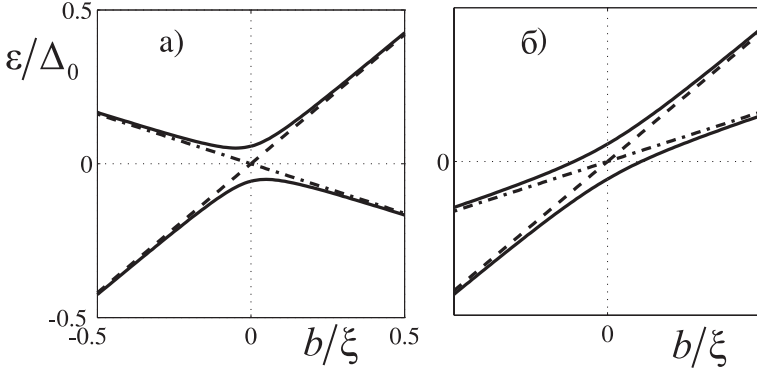


Рис.5. Сплошными линиями показана трансформация спектра при взаимодействии вихревых и поверхностных состояний в сверхпроводящем диске: а) киральность и завихренность имеют разные знаки ($\eta=1, \chi=-1$); б) киральность и завихренность имеют одинаковые знаки ($\eta=1, \chi=1$). Пунктирная и штрихпунктирная линии соответствуют невзаимодействующим спектральным веткам вихревых и поверхностных состояний.

Если в центре диска расположен вихрь Абрикосова, в спектре квазичастиц появляется еще одна аномальная ветка энергии, соответствующая вихревым состояниям [1]:

$$\varepsilon_v(\mu) = -\mu\omega_v. \quad (12)$$

Здесь $\omega_v \sim \eta\Delta_0/(k_F\xi)$, где $\xi = \hbar V_F/\Delta_0$ - длина когерентности, $V_F = \hbar k_F/m$ - скорость Ферми. Значения углового момента в выражении (12) являются целыми (полуцелыми) для нечетного (четного) значения киральности [20]. Рассматривая спектральные ветки $\varepsilon_v(b)$ и $\varepsilon_{sj}(b)$ как функции непрерывного прицельного параметра $b = -\mu/k_F$, нетрудно видеть, что они пересекаются в некоторых точках $b = b_j$.

Расщепление уровней энергии в точке вырождения возникает благодаря гибридизации вихревых и поверхностных состояний и может быть оценено с помощью теории возмущений для почти вырожденной двухуровневой системы:

$$[\varepsilon - \varepsilon_{sj}(b)][\varepsilon - \varepsilon_v(b)] = J^2, \quad (13)$$

где фактор J определяется перекрытием волновых функций.

Используя разложение в ряд Тейлора $\varepsilon_v(b) = \varepsilon_v(b_j) + \varepsilon'_v(b_j)(b-b_j)$ и $\varepsilon_{sj}(b) = \varepsilon_{sj}(b_j) + \varepsilon'_{sj}(b_j)(b-b_j)$, легко видеть, что расщепление веток зависит от их

относительного наклона $\varepsilon'_v(b_j)$ и $\varepsilon'_{sj}(b_j)$ в точке $b=b_j$. В случае, если знаки производных различны, в спектре появляется минищель. Ширина минищели, т.е. минимальное расстояние между уровнями, принадлежащими различным веткам энергии, может быть найдена из уравнения (14) в следующем виде:

$$\delta\varepsilon = 2J \sqrt{|\varepsilon'_v \varepsilon'_{sj}|} / (|\varepsilon'_v| + |\varepsilon'_{sj}|). \quad (14)$$

В другом случае, когда ε'_v и ε'_{sj} имеют одинаковый знак, ширина минищели равна нулю. Для простоты, исследуя взаимодействие вихревых и поверхностных состояний, рассмотрим сверхпроводник р-типа ($\chi=1$). В этом случае существует одна аномальная ветка поверхностных состояний $\varepsilon_s(b)$, пересекающая уровень Ферми при $b=0$ одновременно с аномальной веткой вихревых состояний $\varepsilon_v(b)$. Поэтому трансформация спектра происходит в области малых энергий $|\varepsilon| \ll \Delta_0$, когда поверхностные и вихревые состояния хорошо локализованы и интеграл перекрытия может быть оценен следующим образом: $J \sim \Delta_0 e^{-R/\xi}$. В этом случае, расщепление веток энергии показано на Рис.5 для разных знаков киральности χ и завихренности η .

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы.

Работа посвящена исследованию спектра квазичастиц в смешанном состоянии мезоскопических сверхпроводников. Рассчитаны электронные спектры для различных вихревых структур в мезоскопических сверхпроводниках. Исследованы зависимости от магнитного поля транспортных характеристик сверхпроводника. Показано, что тепловой кондактанс в направлении вдоль вихревых линий растёт при сближении вихрей с ростом внешнего магнитного поля. Рост теплового кондактанса обусловлен перестройкой спектра квазичастиц, приводящей к увеличению числа распространяющихся мод. Найдено, что повышение концентрации вихрей в баллистическом контакте нормальный металл/изолятор/сверхпроводник приводит к значительному увеличению проводимости контакта с ростом магнитного поля. Такое поведение проводимости вызвано резонансными переходами электронов из нормального контакта в квазичастичные состояния, локализованные на вихрях. Также изучено поведение аномальных веток спектра поверхностных и вихревых состояний в мезоскопическом киральном сверхпроводнике в магнитном поле и найдена зависимость плотности состояний на уровне Ферми от направления и величины приложенного магнитного поля.

Список литературы

- [1] Caroli, C. *Bound fermion states on a vortex line in a type-II superconductor*/ C. Caroli, P.G. de Gennes, J. Matricon// Phys. Lett.- 1964.- Vol. 9.- P. 307 - 309.

- [2] Schweigert, V. A. *Vortex Phase Diagram for Mesoscopic Superconducting Disks*/ V. A. Schweigert, F. M. Peeters, and P. Singha Deo// Phys. Rev. Lett.-1998.-Vol. 81.-P. 2783-2786.
- [3] Geim, A. K. *Fine Structure in Magnetization of Individual Fluxoid States*/ A. K. Geim, S. V. Dubonos, J. J. Palacios, I. V. Grigorieva, M. Henini, J. J. Schermer// Phys. Rev. Lett.-2000.-Vol. 85.-P. 1528-1531.
- [4] Larkin, A. I. *Resistance of layered superclean superconductors at low temperatures*/ A. I. Larkin, Yu. N. Ovchinnikov// Phys. Rev. B-1998.-Vol. 57.-P. 5457-5465.
- [5] Hess, H. F. *Vortex-core structure observed with a scanning tunnel microscope*/ H. F. Hess, R. B. Robinson, and J. V. Waszczak// Phys. Rev. Lett.- 1990.- Vol. 64.- P. 2711-2716
- [6] Lowell, J. *Mixed-State Thermal Conductivity of Type II Superconductors*/ J. Lowell and J. B. Sousa// J. Low Temp. Phys.- 1970.- Vol. 3.- P. 65-87
- [7] Kanda, A. *Experimental Evidence for Giant Vortex States in a Mesoscopic Superconducting Disk*/ A. Kanda, B. J. Baelus, F. M. Peeters, K. Kadowaki, and Y. Ootuka// Phys. Rev. Lett.-2004. - Vol. 93.-P. 257002-1 - 257002-4
- [8] Hu, C. R. *Midgap surface states as a novel signature for $d_{x_a} - d_{x_b}$ -Wave Superconductivity*/ C. R. Hu// Phys. Rev. Lett. – 1994 - Vol. 72.-P. 1526-1529
- [9] Laube, F. *Spin-Triplet Superconductivity in Sr_2RuO_4 Probed by Andreev Reflection*/ F. Laube, G. Goll, H. V. Lohneysen, M. Fogelstrom, and F. Lichtenberg// Phys. Rev. Lett. – 2000 - Vol. 84.-P. 1595-1598
- [10] Graser, S. *Shadow on the Wall Cast by an Abrikosov Vortex*/ S. Graser, C. Iniotakis, T. Dahm and N. Schopohl// Phys. Rev. Lett. – 2004 - Vol. 93.-P. 247001-1-247001-4
- [11] Barash, Yu. S. *Josephson current between chiral superconductors*/ Yu. S. Barash, A. M. Bobkov, and M. Fogelstrom// Phys. Rev. B -2001 - Vol. 14.-P. 214503-1-214503-14
- [12] Iniotakis, C. *Local density of states at polygonal boundaries of d-wave superconductors*/ C. Iniotakis, S. Graser, T. Dahm, and N. Schopohl// Phys. Rev. B - 2005- Vol. 71.-P. 214508 -1-214508 -9
- [13] Fominov, Ya. V. *Density of states in d-wave superconductors of finite size*/ Ya. V. Fominov and A. A. Golubov// Phys. Rev. B -2004- Vol. 70.-P. 212513-1-212513-4
- [14] Mackenzie, A. P. *The superconductivity of Sr_2RuO_4 and the physics of spin-triplet pairing*/ A. P. Mackenzie and Y. Maeno// Rev. Mod. Phys.- 2003- Vol. 75.-P. 657-711
- [15] Yokoyama, T. *Chirality sensitive effect on surface states in chiral p-wave superconductors*/ T. Yokoyama, C. Iniotakis, Y. Tanaka, and M. Sigrist// Phys. Rev. Lett. -2008- Vol. 100.-P. 177002-1- 177002-4

- [16] Kopnin, N. B. *Single-electron transport through the vortex core levels in clean superconductors*/ N. B. Kopnin, A. S. Mel'nikov and V. M. Vinokur// Phys. Rev. B -2003- Vol. 68.-P. 054528-1-054528-6
- [17] Volovik, G. E. *On edge states in superconductors with time inversion symmetry breaking*/ G. E. Volovik// JETP Lett.-1997 - Vol. 66. - P. 522-527
- [18] Stone, M. *Edge modes, edge currents, and gauge invariance in p_x+ip_y superfluids and superconductors*/ M. Stone and R. Roy// Phys. Rev. B – 2004 - Vol. 69. – P. 184511-1 –184511-12
- [19] Virtanen, S. M. M. *Multiquantum vortices in superconductors: Electronic and scanning tunneling microscopy spectra*/ S. M. M. Virtanen and M. M. Salomaa// Phys. Rev. B – 1999- Vol. 60. - P. 14581- 14584
- [20] Volovik, G. E. *Fermion zero modes on vortices in chiral superconductors*/G. E. Volovik// JETP Lett.- 1999 - Vol. 70. - P. 609 – 614

Список публикаций автора по теме диссертации

- [A1] Mel'nikov, A. S. *Intervortex quasiparticle tunneling and electronic structure of multi-vortex configurations in type-II superconductors* / A. S. Mel'nikov and M. A. Silaev// Письма в ЖЭТФ.-2006.-Т. 83. Вып. 11-12, - С. 675-680.
- [A2] Винокур, В. М. *Вихревые состояния в мезоскопических сверхпроводниках*/ В. М. Винокур, Н. Б. Копнин, А. С. Мельников, И. М. Нефедов, В. И. Позднякова, Д. А.Рыжов, М. А. Силаев, И. А. Шерешевский// Известия РАН. Серия физическая.- 2007. - Т. 71. Вып. 1.- С. 12-15.
- [A3] Silaev, M. A. *Conductance enhancement due to the resonant tunneling into the subgap vortex core states in normal metal/superconductor ballistic junctions*/ M. A. Silaev// Physical Review B.- 2008.- Vol. 77.- P. 014504-1 - 014504-8.
- [A4] Silaev, M. A. *Electronic structure of edge and vortex states in chiral mesoscopic superconductor*/ M. A. Silaev// Письма в ЖЭТФ.-2008.-Т. 87. Вып. 7-8, - С. 511-516.
- [A5] Mel'nikov, A. S. *Electronic structure and heat transport of multi-vortex configurations in mesoscopic superconductors*/ A. S. Mel'nikov, D. A. Ryzhov and M. A. Silaev// Physical Review B.- 2008.- Vol. 78.- P. 064513-1 - 064513-20.
- [A6] Мельников, А. С. *Электронные состояния в вихревых кластерах в сверхпроводниках второго рода*/ А. С. Мельников, М. А. Силаев// Международная конференция "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости": сборник тезисов докладов, Звенигород, Россия, 2006.- С.365.
- [A7] Мельников, А. С. *Электронные состояния в вихревых молекулах в сверхпроводниках второго рода*/ А. С. Мельников, М. А. Силаев // Нанофизика и нанoeлектроника: Материалы международного симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 2006. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – С. 161.

- [A8] Мельников, А. С. *Спектр вихревых электронных состояний в сверхпроводнике вблизи плоской границы*/ А. С. Мельников, М. А. Силаев// Нанопфизика и наноэлектроника: Материалы международного симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 2007. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – С. 269.
- [A9] Силаев, М. А. *Кондактанс баллистического контакта нормальный металл/сверхпроводник: резонансное андреевское туннелирование через вихри Абрикосова*/ М. А. Силаев// Нанопфизика и наноэлектроника: Материалы международного симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 2008.- Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2008. –С.126.
- [A10] Мельников, А. С. *Вихревые состояния в мезоскопических сверхпроводниках: электронная структура и квантовый транспорт*/ А. С. Мельников, Д. А. Рыжов, М. А. Силаев// Нанопфизика и наноэлектроника: Материалы международного симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 2008.- Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2008. -С.392
- [A11] Silaev, M. A. *Conductance enhancement due to the resonant tunneling into the subgap vortex core states in normal metal/superconductor ballistic junctions*/ M. A. Silaev// International conference on theoretical physics “Dubna-Nano 2008”: book of abstracts, Dubna, Russia, 2008.-Joint institute for nuclear research, 2008.-P. 122.
- [A12] Mel’nikov, A. S. *Multi-vortex configurations in mesoscopic superconductors: electronic structure and heat transport*/ A. S. Mel’nikov, D. A. Ryzhov, and M. A. Silaev// International conference on theoretical physics “Dubna-Nano 2008”: book of abstracts, Dubna, Russia, 2008.-Joint institute for nuclear research, 2008.-P. 110.

Силаев Михаил Андреевич

**ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ТРАНСПОРТНЫЕ
СВОЙСТВА СМЕШАННОГО СОСТОЯНИЯ
МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

Автореферат

Подписано к печати “26” июня 2008 г.
Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105