

На правах рукописи

Марычев Павел Михайлович

**Стационарные неоднородные состояния в
токонесущих квазиодномерных
сверхпроводниках**

01.04.07 — физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород — 2020

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород.

Научный руководитель: **Водолазов Денис Юрьевич**,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
отдела физики сверхпроводников ИФМ РАН

Официальные оппоненты: **Бобкова Ирина Вячеславовна**,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Института физики твердого тела РАН
Фоминов Яков Викторович,
доктор физико-математических наук,
заместитель директора Института теоретической
физики им. Л. Д. Ландау

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики им. Н.Л. Духова

Защита состоится «2» апреля 2020 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.03 при Федеральном исследовательском центре «Институт прикладной физики Российской академии наук» по адресу: 603087, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино, ул. Академическая, д.7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте
http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/2019_MarichevPM/Diss_MarichevPM.pdf

Автореферат разослан __ февраля 2020 г

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор РАН Водолазов Д.Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Фундаментальным свойством сверхпроводников, открытых Камерлинг-Оннесом в 1911 году, является нулевое электрическое сопротивление. При понижении температуры до критической температуры сверхпроводящего перехода T_c сопротивление проводника резко падает до нуля и остаётся нулевым при токах вплоть до критического тока I_c . Отсутствие диссипации в сверхпроводниках делает выгодным их применение в электронике, где использование сверхпроводящих соединений или логических схем может значительно уменьшить энергозатраты. Кроме того, сверхпроводниковые кубиты являются перспективной основой квантовых компьютеров. Однако, в случае сверхпроводящих образцов достаточно малого размера (к примеру, сверхпроводящих плёнок и проволок) переход не является резким, и падение сопротивления происходит в конечном температурном интервале. Размытие сверхпроводящего перехода связано с наличием тепловых флуктуаций, разрушающих сверхпроводимость. Этот эффект становится более выраженным с уменьшением размерности сверхпроводящего образца. Более того, в сверхпроводящих структурах с достаточно малыми поперечными размерами возможно возникновение ненулевого сопротивления даже при низких температурах из-за квантовых флуктуаций. Современное развитие нанотехнологий позволяет создавать проволоки очень малых толщин, вплоть до диаметра 5 нм. Из-за необходимости в миниатюризации, такие низкоразмерные системы могут найти применение в современной электронике, в связи с чем флуктуационные эффекты в нанопроводах представляют большой интерес.

Рассматриваемые далее сверхпроводящие провода и узкие мостики, в которых сильнее всего проявляются флуктуационные эффекты, классифицируются как квазиодномерные. Такие сверхпроводники являются квазиодномерными в том смысле, что их поперечные размеры достаточно малы, чтобы сверхпроводящий параметр порядка был постоянным в поперечном направлении, и тогда можно учитывать изменения параметра порядка только вдоль сверхпроводника. Чтобы сверхпроводник можно было считать квазиодномерным, его поперечные размеры должны быть порядка или меньше зависящей от температуры длины когерентности ξ . При больших размерах в сверхпроводнике могут возникать вихри, приводящие к поперечной неоднородности параметра порядка. Известно [1], что при ширине сверхпроводящей плёнки меньше 1.8ξ вихри не возникают в плёнке при любом перпендикулярном ей поле вплоть до поля разрушения сверхпроводимости. Однако, вихри могут возникать в отсутствие внешнего

магнитного поля флуктуационным образом. Таким вихрям соответствует седловое состояние сверхпроводящей системы, являющееся неустойчивым и стационарным. Помимо того, также возможно существование безвихревых седловых состояний, являющихся неоднородными только в продольном направлении и характерных для квазиодномерных сверхпроводников. В работах [2, 3] было показано, что при ширине плёнки меньшей 4.4ξ в отсутствие магнитного поля в плёнке существуют только безвихревые седловые состояния, и тогда плёнку можно рассматривать как квазиодномерный сверхпроводник. При ширине 4.4ξ возможны оба типа седловых состояний, но энергетически выгодным является вихревое состояние. Однако, в работе [4] было показано, что этот результат применим только для малых токов $I \ll I_c$, а при токах, близких к току распаривания, безвихревые седловые состояния обладают меньшей энергией, чем вихревые, даже при ширинах $w \gg 4.4\xi$, и флуктуационное переключение может происходить аналогично квазиодномерным сверхпроводникам. Таким образом, критерий применимости квазиодномерной модели не является универсальным и зависит от тока и магнитного поля.

Впервые влияние флуктуаций на квазиодномерные сверхпроводники было рассмотрено в рамках теории Гинзбурга-Ландау в работах Литтла [5], а также Лангера и Амбегаокара [6]. В этих работах в качестве механизма образования конечного сопротивления был предложен процесс проскальзывания фазы. В ходе этого процесса под действием тепловых флуктуаций параметр порядка подавляется в одной из точек сверхпроводника, и в той же точке происходит скачок фазы параметра порядка на 2π , после чего модуль параметра порядка восстанавливает своё первоначальное значение. При этом, согласно соотношению Джозефсона, изменение фазы приводит к появлению напряжения. Для перехода между сверхпроводящими состояниями до и после проскальзывания фазы системе необходимо преодолеть энергетический барьер δF_{thr} . Таким образом, частота проскальзываний фазы и, соответственно, сопротивление квазиодномерного сверхпроводника определяется законом Аррениуса $\exp(-\delta F_{thr}/k_B T)$, т.е. в основном величиной барьера. Согласно Лангеру и Амбегаокару [6], величина этого барьера определяется ближайшим к минимуму энергии седловым состоянием, которое является неустойчивым и пространственно-неоднородным, но при этом оно, как и состояние с минимальной энергией, стационарно, т.е. также удовлетворяет уравнению Гинзбурга-Ландау. Было получено выражение для седлового состояния в случае длинных (длина сверхпроводника $L \gg \xi$) проволок вблизи критической температуры, где тепловые флуктуации играют основную роль. В недавнее время стали активно исследоваться экспериментально квантовые флуктуации в квазиодномерных сверхпроводниках. В этом случае проскальзывание фазы происходит благодаря не преодолению барьера, а туннелированию через него, и сопротивление описывается законом $\exp(-\delta F_{thr}/\hbar\omega_0)$, где ω_0 – эффективная частота попыток, по порядку соответствующая сверхпроводящей щели. Таким образом, квантовые проскальзывания фазы, в отличие от тепловых, могут оказывать значимое влияние при низких температурах, что

требует обобщения результатов Лангера и Амбегаокара для седлового состояния на весь температурный диапазон ниже T_c . Кроме того, появление сверхпроводящих мостиков с длиной порядка длины когерентности делает интересным поиск седлового состояния для коротких мостиков, в которых можно ожидать влияния длины мостика на величину барьера.

В последние годы были открыты новые типы сверхпроводников. В 2001 году была открыта [7], что в MgB_2 существует два сверхпроводящих параметра порядка, связанных с различными поверхностями Ферми. Впоследствии двузонная сверхпроводимость была открыта во многих других материалах, включая некоторые бинарные соединения и пниктиды железа. Наличие двух параметров порядка в сверхпроводнике приводит к различным новым состояниям и эффектам, невозможным в обычном однозонном сверхпроводнике. В квазиодномерных системах таким уникальным для двузонных сверхпроводников пространственно-неоднородным состоянием является фазовый солитон, чьё существование было предсказано в работе Танаки 2001 года [8]. В основном состоянии разность фаз параметров порядка является однородной и принимает значения, равные 0 или π (в зависимости от характера межзонной связи). Фазовый солитон представляет собой неоднородное, кинкоподобное распределение межзонной разности фаз, на протяжении которого она меняется на 2π . Создание и обнаружение фазовых солитонов является нетривиальной задачей, и на настоящий момент свидетельства их существования весьма немногочисленны и представлены в основном в искусственных двузонных структурах, в которых различные параметры порядка соответствуют разным тонким сверхпроводящим плёнкам. В связи с этим влияние фазовых солитонов на свойства сверхпроводящей системы, через которое их можно обнаружить, представляет значительный интерес.

Другим интересным неоднородным состоянием является состояние Фульде-Феррелла-Ларкина-Овчинникова (ФФЛО) [9, 10], предсказанное для сверхпроводников с достаточно большой зеемановской энергией и представляющее собой модулированное сверхпроводящее состояние. Оно может возникнуть в квазиодномерных и квазидвумерных сверхпроводниках при приложении сильного параллельного магнитного поля. Аналогичное состояние может возникать в структурах сверхпроводник/ферромагнетик. Вызванное обменным полем магнетика зеемановское расщепление энергии Ферми приводит к компенсирующему изменению кинетической энергии пары и появлению у неё ненулевого импульса, из-за чего сверхпроводящие корреляции не только затухают, но и осциллируют в ферромагнетике в перпендикулярном слое направлению. Эти осцилляции представляют собой поперечное состояние ФФЛО. Кроме того, в этих структурах из-за обменного поля возникают спин-триплетные сверхпроводящие корреляции в слое ферромагнетика, соответствующие парам электронов с полным спином 1. Недавно было показано [11], что в гибридных структурах с определёнными параметрами достаточно большая амплитуда триплетных корреляций может привести к формированию модулированного в плоскости структуры

сверхпроводящего состояния – продольного состояния ФФЛО. Наличие продольного состояния ФФЛО в мостиках из гибридных структур может привести к появлению у таких структур необычных свойств. Триpletные сверхпроводящие корреляции приводят к возникновению парамагнитных мейснеровских токов, которые в состоянии ФФЛО полностью компенсируют диамагнитные токи, и в итоге эффект Мейснера в такой структуре исчезает. Наличие парамагнитных токов и исчезновение эффекта Мейснера являются причиной необычной немонотонной зависимости экранирующих свойств гибридной структуры. Подобный немонотонный характер зависимости сохраняется даже при параметрах структуры, близких к области существования состояния ФФЛО. Кроме того, приложение внешнего параллельного магнитного поля может увеличить критическую температуру структуры, находящейся в состоянии ФФЛО.

Степень разработанности темы

Процесс проскальзывания фазы был впервые введен в работе Литтла [5] 1967 года в качестве механизма затухания сверхпроводящего тока в тонких кольцах. В его работе энергетический барьер, который системе под действием флуктуаций необходимо преодолеть для проскальзывания фазы, оценивался, исходя из предположения о полном подавлении сверхпроводимости на участке кольца порядка длины когерентности. В том же году в работе Лангера и Амбегаокара [6] на основе теории Гинзбурга-Ландау была построена количественная теория для энергетического барьера в длинном (длина $L \gg \xi$) сверхпроводящем проводе и найдена зависимость барьера от протекающего через провод тока. Для этого авторами было найдено выражение для ближайшего к минимуму седлового состояния системы. Неоднородное в пространстве седловое состояние, как и соответствующее минимуму однородное состояние, является стационарным (но неустойчивым) и потому удовлетворяет уравнению Гинзбурга-Ландау, что позволило найти аналитическое выражение для распределения параметра порядка в седловом состоянии. Лангер и Амбегаокар искали седловое состояние при условии заданного напряжения, но, как было показано в работе [12], полученные результаты применимы и в случае заданного тока, обычно реализуемого в экспериментах. Поскольку их результаты получены в рамках теории Гинзбурга-Ландау, они строго применимы только вблизи критической температуры. Обобщение результатов для седлового состояния на произвольные температуры было сделано на основе микроскопической теории в работах [13, 14]. В работе [13] зависимости энергетического барьера от температуры и тока были рассчитаны в чистом пределе на основе уравнений Эйленбергера для длинного провода в одноканальном приближении. Однако, величина барьера оказалась значительно завышенной при конечных токах, поскольку не был учтен вклад, связанный с работой источника тока. В работе [14] был рассчитан барьер мостиков в грязном пределе на основе теории Узаделя. Авторы обнаружили, что полученная вблизи сверхпроводящего перехода токовая зависимость со степенью $5/4$ сохраняется в широком диапазоне температур. Однако, во всех этих

работах были рассмотрены только длинные квазиодномерные сверхпроводники, и не рассматривался случай произвольных длин, в частности малых, когда длина сверхпроводника начинает влиять на величину барьера.

В пределе малых токов результаты Лангера и Амбегаокара были подтверждены в работах [15, 16] в измерениях сопротивления оловянных вискерсов. Вид зависимости энергетического барьера от тока в нанопроводах экспериментально впервые был получен на основе анализа статистики токов переключения в работе [17] и в дальнейшем в работах [18–22]. Однако, в работах [19, 20] наблюдалось расхождение с токовой зависимостью δF_{thr} , полученной ранее в теоретических работах для длинных проводов. Попытка объяснить это расхождение была предпринята Хлебниковым [23]. Им была разработана модель, в которой мостик рассматривался как дискретная цепочка узлов, соединённых сверхпроводящими связями. При этом не было учтено подавление параметра порядка в сверхпроводнике. Также неясно, насколько данная модель применима к работам [19, 20].

Неоднородные в пространстве фазовые солитоны в двузонных сверхпроводниках были предсказаны на основе теории Гинзбурга-Ландау в 2001 году в работе Танаки [8]. В работе [24] было показано на основе численных расчётов, что фазовые солитоны будут устойчивы только в сверхпроводниках со слабой межзонной связью. Поскольку в основном состоянии фазовые солитоны, как правило, отсутствуют, были предложены различные методы их создания. Возбуждение подобных объектов предполагает создание каких-либо неравновесных условий. Гуревич и Винокур в своей работе [25] предложили возбуждать фазовые солитоны в двузонных сверхпроводниках электрическим полем. Предложенным источником являлась граница сверхпроводящей проволоки с нормальным контактом. Также возможно создание фазовых солитонов в равновесном состоянии. Для этого сверхток в зоне с меньшей амплитудой сверхпроводящего параметра порядка должен превышать критический ток этой зоны. Это приведёт к проскальзываниям фазы в такой зоне, что, в свою очередь, породит фазовый солитон в мостике, как было показано в работе [26]. Поскольку проскальзывания фазы могут возникать флуктуационным образом, представляет интерес возможность флуктуационного образования фазовых солитонов, не рассмотренная ранее. Кроме того, в предыдущих работах рассматривались длинные мостики. Случай короткого двузонного сверхпроводящего мостика, помимо токовых состояний в длинном мостике, был рассмотрен в работе [27], однако авторы ограничивали своё рассмотрение однородным распределением межзонной разности фаз. Вопрос о влиянии размеров квазиодномерного сверхпроводника на систему с фазовыми солитонами ранее не рассматривался. Косвенные свидетельства существования фазовых солитонов наблюдались в искусственных многозонных структурах, таких как мезоскопические алюминиевые кольца [28] и двуслойная структура из тонких плёнок ниобия [29], а также есть свидетельства их существования, полученные в экспериментах с плёнками купратов [30].

Продольное состояние Фульде-Феррелла-Ларкина-Овчинникова, неоднородное в параллельном сверхпроводящей плёнке направлении, в гибридных структурах сверхпроводник/ферромагнетик (S/F) было предсказано в работе [11]. В этой работе было показано, что переход в такое состояние из однородного вдоль слоёв сопровождается исчезновением диамагнитного мейснеровского отклика структуры. В работе [31] было теоретически показано, что для реализации такого состояния выгодны S/F/N структуры, где N – нормальный металл с проводимостью, много большей проводимости S слоя в нормальном состоянии. Для таких систем продольное состояние ФФЛО может быть реализовано в области параметров, соответствующих реальным материалам, широко используемым в сверхпроводящей электронике. Кроме того, было показано, что из-за большого вклада триплетных сверхпроводящих корреляций мейснеровский отклик характеризуется немонотонной температурной зависимостью не только в области параметров, соответствующих существованию продольной фазы ФФЛО, но и в окрестности этой области. В работе [32] было рассмотрено влияние параллельного магнитного поля на S/F структуру в продольном состоянии ФФЛО и обнаружен эффект увеличения внешним полем критической температуры таких структур. В статье Самохвалова [33] было рассмотрено продольное состояние ФФЛО в S/F/S структурах, его влияние на экранирующие свойства таких структур и переходы в π -состояние с изменением толщины F слоя. Однако, в этой статье не был рассмотрен температурный переход из фазы ФФЛО в π -состояние.

Цели и задачи

Целями данной работы являлись:

- 1) Расчёт зависимости энергии седлового состояния от тока для квазиодномерного токнесущего сверхпроводника конечной длины при произвольных температурах. Анализ влияния дефектов на токовую зависимость энергии седлового состояния.
- 2) Исследование влияния фазовых солитонов на транспортные свойства двузонных сверхпроводящих мостиков конечного размера. Изучение флуктуационного механизма образования фазовых солитонов.
- 3) Исследование влияния параллельного магнитного поля и продольного тока на свойства неоднородного вдоль слоёв состояния Фульде-Феррелла в гибридных структурах сверхпроводник/ферромагнетик/нормальный металл.

Научная новизна

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

- 1) В рамках теории Гинзбурга-Ландау рассчитана зависимость энергии пороговой флуктуации, переводящей токнесущий сверхпроводящий мостик

в резистивное состояние, при различных длинах мостика. Получено аналитическое выражение для энергии пороговой флуктуации в случае мостика с длиной порядка или меньше длины когерентности. Показано, что полученные при $T \sim T_c$ результаты для энергии пороговой флуктуации остаются применимыми и при низких температурах $T \ll T_c$.

- 2) Показано, что наличие даже сравнительно слабо влияющих на величину критического тока сверхпроводящего мостика дефектов может привести к изменению токовой зависимости энергии пороговой флуктуации от обычного для длинных мостиков степенного закона с показателем $5/4$ к закону с показателем $3/2$.
- 3) Предсказана осцилляционная зависимость критической плотности тока j_c от длины мостика в случае двузонного сверхпроводящего мостика со слабой межзонной связью.
- 4) Показано, что в случае слабой межзонной связи и достаточно длинного мостика существует область токов, при которых возможно флуктуационное образование фазовых солитонов в двузонном сверхпроводящем мостике.
- 5) Исследованы транспортные и экранирующие свойства тонкоплёночных структур сверхпроводник/ферромагнетик/нормальный металл (S/F/N) с реалистичными параметрами, находящиеся в продольном состоянии ФФЛО или вблизи него. Предсказан новый тип $0-\pi$ переходов, индуцируемых током или магнитным полем и сопровождающихся резким изменением экранирующих свойств гибридной структуры.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты расчётов энергии пороговой флуктуации в квазиодномерных сверхпроводниках могут быть использованы при изучении явления макроскопического квантового туннелирования и создании устройств, использующих это явление. Также эти результаты могут быть использованы для анализа данных экспериментов, в которых изучалась статистика переключения из сверхпроводящего в нормальное состояние под действием тока.

Результаты исследования влияния фазовых солитонов на критический ток мостиков из двузонных сверхпроводников могут быть использованы для обнаружения фазовых солитонов и определения того, является ли сверхпроводник двузонным.

Результаты теоретического исследования влияния параллельного магнитного поля и тока на экранирующие свойства S/F/N и S/F/N/F/S структур могут быть использованы для обнаружения продольного состояния ФФЛО. Температурные, токовые и полевые $\pi \leftrightarrow \text{ФФЛО}$ переходы могут быть использованы в сверхпроводящей электронике для управления состоянием логических элементов. Необычная зависимость экранирующих свойств таких структур от внешних параметров (магнитного поля, тока и температуры) может быть использована в

магнитных сенсорах или детекторах электромагнитного излучения, основанных на кинетической индуктивности.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовался теоретический анализ, а также численные методы. Для поиска седловых состояний в однозонных квазиодномерных сверхпроводниках использовалась теория Гинзбурга-Ландау, а также микроскопические уравнения Эйленберга и Узаделя для квазиклассических функций Грина. Для исследования двузонных сверхпроводников использовалось нестационарное уравнение Гинзбурга-Ландау, обобщённое на случай двузонной сверхпроводимости. Свойства гибридных структур сверхпроводник/ферромагнетик/нормальный металл рассчитывались на основе решения уравнения Узаделя.

Положения, выносимые на защиту

- 1) Зависимость энергии пороговой флуктуации δF_{thr} , приводящей к появлению проскальзывания фазы, в квазиодномерном токнесущем сверхпроводящем мостике произвольной длины описывается выражением $\delta F_{thr} = \alpha \hbar I_c (1 - I/I_c)^b / e$. Показатель степени b варьируется от $5/4$ для однородных мостиков с длиной много больше длины когерентности ξ до $3/2$ для мостиков с дефектами или с длиной $L \lesssim \xi$. Данный результат справедлив в "грязном" и "чистом" пределах, а также при произвольных температурах ниже критической.
- 2) Критический ток двузонного сверхпроводящего мостика со слабым межзонным взаимодействием немонотонно зависит от его длины. Эффект связан с возникновением в мостике фазовых солитонов, чьё число изменяется с изменением длины мостика.
- 3) В двузонном сверхпроводящем мостике со слабой межзонной связью возможно флуктуационное образование фазовых солитонов. Этот механизм действует при токах выше определенного значения j_s (растущего с уменьшением длины мостика и увеличением силы межзонного взаимодействия), при котором синфазное состояние становится метастабильным.
- 4) В тонкопленочных структурах сверхпроводник/ферромагнетик/нормальный металл (S/F/N), находящихся в фазе Фульде-Феррелла, эффективная обратная глубина проникновения магнитного поля Λ^{-1} немонотонно зависит от параллельного магнитного поля и тока. В пятислойных S/F/N/F/S структурах реализуются переходы при изменении температуры, тока или поля в фазу Фульде-Феррелла и из неё, сопровождаемые скачком Λ^{-1} .

Личный вклад автора в получение результатов

Автор принимал активное участие в решении задач и интерпретации результатов. Автором были проведены все численные расчёты, использованные

для получения результатов работы, а также, где возможно, проведены аналитические расчёты.

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Достоверность результатов обеспечена адекватным выбором физических моделей, отражающих основные свойства исследуемых систем.

Результаты работы представлялись на семинарах ИФМ РАН. Также полученные результаты были представлены на ряде российских и международных конференций, в частности, на международном симпозиуме "Нанозифика и наноэлектроника" (2016-2019 г., Нижегородская область), на Всероссийской конференции молодых ученых «Микро-, нанотехнологии и их применение» им. Ю.В. Дубровского (2017 г., Черноголовка), на Нижегородской сессии молодых учёных (2018 г., Нижний Новгород) и на летней научной школе Фонда «БАЗИС» "Many body theory meets quantum information" (2018 г., Московская область).

Результаты диссертации опубликованы в 12 работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах [A1–A5] и 7 работ в сборниках тезисов докладов и трудов конференций [B1–B7].

Структура диссертации

Данная диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций автора. Объём диссертации составляет 83 страницы, включая 42 рисунка. Список цитируемой литературы состоит из 87 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи диссертации, показана её научная новизна и значимость, указаны сведения о личном вкладе автора, апробации работы и публикациях.

Глава 1 содержит обзор литературы по неоднородным состояниям в квазиодномерных сверхпроводящих структурах, таким, как седловые состояния и центры проскальзывания фазы, фазовые солитоны в многозонных сверхпроводниках и состояния Фульде-Феррелла-Ларкина-Овчинникова.

Глава 2 посвящена расчёту энергии пороговой флуктуации δF_{thr} , переводящей сверхпроводящий мостик конечной длины в резистивное состояние, и её зависимости от тока. Для определения величины δF_{thr} находилось, помимо основного состояния, наименьшее по энергии седловое состояние системы. Параграф 2.1 содержит постановку задачи и излагает структуру главы 2. В параграфе 2.2 в рамках теории Гинзбурга-Ландау рассмотрена зависимость энергии δF_{thr} от длины мостика вблизи критической температуры. С учётом подавления параметра порядка в берегах получено аналитическое выражение для зависимости δF_{thr} от длины и тока в случае $L < \xi$ (сравнение с численными расчётами представлено на рисунке 1). Показано, что это выражение приходит к виду $\delta F(I) \simeq (1 - I/I_c)^{3/2}$ в пределе малых длин $L \ll \xi$. В параграфе 2.3 в рамках той

же модели изучено влияние дефектов различного типа на зависимость $\delta F_{thr}(I)$. Обнаружено, что наличие в длинных мостиках даже "слабых" дефектов (приводящих к небольшому подавлению критического тока мостика) может повлиять на зависимость $\delta F(I)$, изменяя её от $\delta F(I) \simeq (1 - I/I_{dep})^{5/4}$, типичной для длинных мостиков без дефектов, до $\delta F(I) \simeq (1 - I/I_c)^{3/2}$. В параграфе 2.4 результаты параграфа 2.2 на основе теорий Эйленбергера и Узаделя обобщены на случай произвольных температур. Показано, что полученные вблизи критической температуры выражения для δF_{thr} в случаях и длинных и коротких мостиков остаются применимыми при температурах много ниже T_c . В разделе 2.5 собраны основные результаты главы.

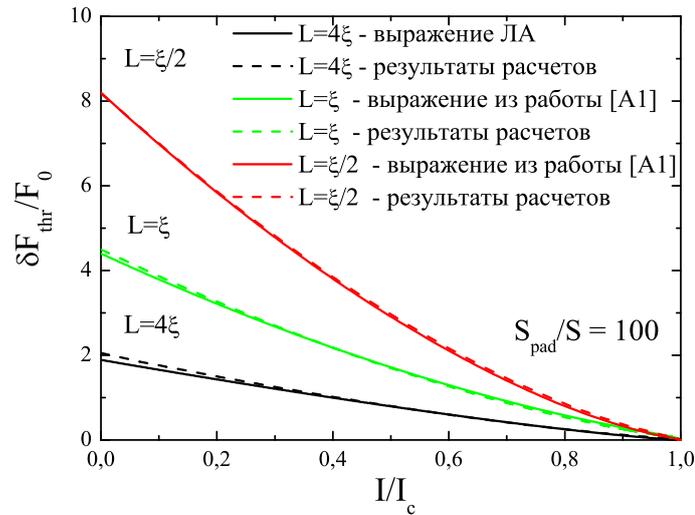


Рис. 1. Зависимость энергии порогового возмущения от тока для мостиков различной длины и отношении площадей $S_{pad}/S = 100$. Пунктирные кривые получены из численных расчетов, сплошные кривые - выражение для длинных мостиков из работы ЛА [6] для мостика с длиной $L = 4\xi$ и выражение для коротких мостиков из работы [A1] для мостиков с длиной $L = \xi$ и $L = \xi/2$.

Глава 3 диссертации посвящена ряду эффектов, связанных с возникновением в двузонных сверхпроводящих мостиках фазовых солитонов. Помимо двузонных сверхпроводников, эти эффекты также могут проявляться в двухслойных структурах из слабо связанных сверхпроводящих плёнок. В параграфе 3.1 приведена структура главы 3. В параграфе 3.2 приводятся исходные уравнения нестационарной теории Гинзбурга-Ландау, обобщённой на случай двузонной сверхпроводимости. В параграфе 3.3 обсуждается влияние наличия фазовых солитонов в мостике на его критический ток j_c . Вначале рассматривается случай двузонного сверхпроводника без межзонной связи. Получены выражения для критических сверхскоростей и плотностей тока в системе с фазовыми солитонами и продемонстрировано наличие осцилляций в зависимости критического тока от длины мостика. Также показано наличие минимума зависимости $j_c(L)$ при $L \sim 10 - 20\xi_1$ (где ξ_1 — длина когерентности зоны с большим параметром порядка), соответствующего переходу между областями с однородной

межзонной разностью фаз (малые длины) и состояниями с одним солитоном (большие длины). Далее рассмотрено влияние конечной межзонной связи и показано, что осцилляции сохраняются в случае достаточно слабого межзонного взаимодействия и исчезают в случае сильного (рисунок 2). В конце параграфа показано влияние времени релаксации модуля параметра порядка на зависимость критического тока от длины.

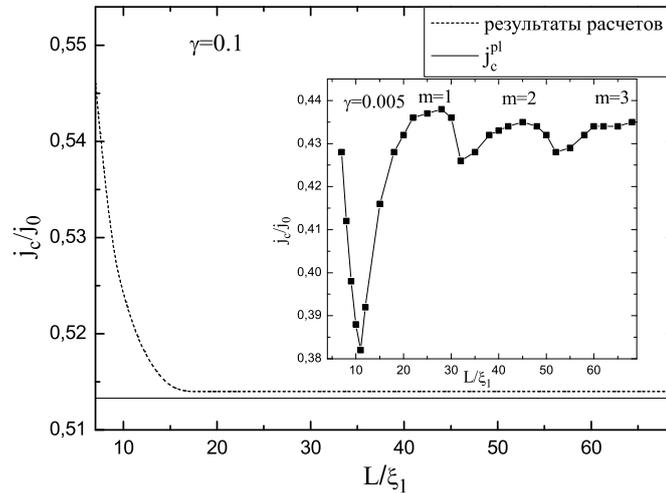


Рис. 2. Зависимость критической плотности тока $j_c(L)$ для случая слабого (константа межзонной связи $\gamma = 0.005$, вставка) и сильного межзонного взаимодействия (константа межзонной связи $\gamma = 0.1$).

В параграфе 3.4 исследуется флуктуационное образование фазовых солитонов и его влияние на энергию образования ПФ. Показано, что такой механизм возможен только при достаточно больших длинах и токах. Рассчитаны зависимости δF_{thr} от тока для случаев двузонных сверхпроводников с нулевой и конечной межзонной связью. Как и в случае токового механизма генерации, флуктуационный механизм действует только в случае слабой межзонной связи, а при сильной межзонной связи он подавляется, и $\delta F_{thr}(I)$ приходит к обычному для однозонного сверхпроводника виду. В параграфе 3.5 приведены основные результаты данной главы.

Глава 4 посвящена теоретическому исследованию влияния параллельного магнитного поля H и тока I вдоль слоёв на продольное состояние Фульде-Феррелла (ФФ) в мостиках из трёхслойных S/F/N и симметричных пятислойных S/F/N/F/S структур, где в качестве нормального металла используется металл с малым удельным сопротивлением. Также рассматривается область параметров структуры, близкая к области существования продольного состояния ФФ в рассматриваемой системе. В параграфе 4.1 изложена структура главы 4. В параграфе 4.2 приводятся используемые в данной главе уравнения Узаделя. В параграфе 4.3 представлены результаты исследований влияния параллельного магнитного поля на трёхслойную S/F/N структуру, находящуюся в продольном состоянии ФФ или в состоянии с большим вкладом триплетной компоненты в

обратную эффективную глубину проникновения магнитного поля Λ^{-1} . В этих случаях Λ^{-1} немонотонно зависит от магнитного поля и возрастает в слабых полях. В параграфе 4.4 изучено продольное токовое состояние ФФ. В таком состоянии (как и вблизи него) зависимость Λ^{-1} от тока, аналогично зависимости $\Lambda^{-1}(H)$, становится немонотонной (рисунок 3). Такое немонотонное поведение в основном связано с подавлением магнитным полем или током триплетной сверхпроводимости в F/N слоях.

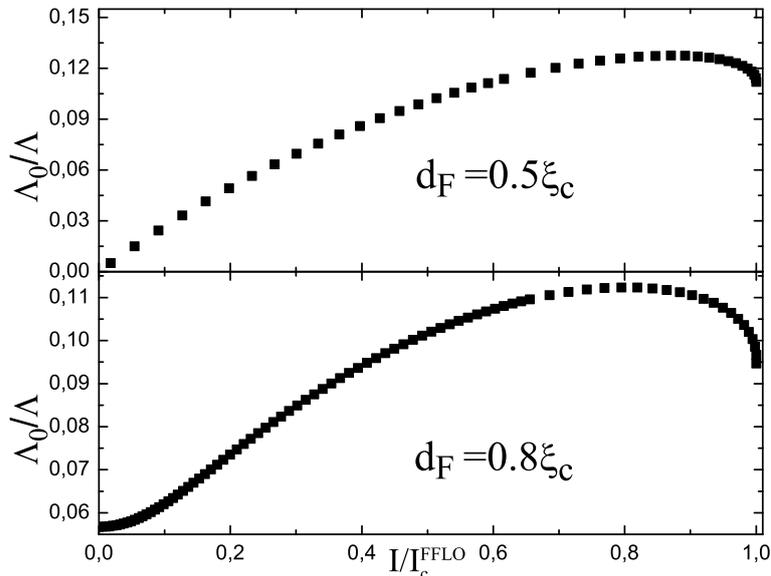


Рис. 3. Зависимость обратной эффективной глубины проникновения магнитного поля Λ^{-1} для трёхслойной S/F/N структуры от продольного тока I при различных толщинах F слоя d_F : (а) $0.5\xi_c$ (состояние ФФ); (б) $0.8\xi_c$. Остальные параметры структуры являются следующими: обменная энергия $h = 5k_B T_{c0}$, $d_S = 1.1\xi_c$, $d_N = \xi_c$ и $T = 0.2T_{c0}$.

В параграфе 4.5 исследована зависимость $\Lambda^{-1}(H, I)$ и рассмотрены различные типы переходов $\pi \rightarrow \text{ФФ}$ в S/F/N/F/S структурах. В этих структурах область толщин ферромагнетика, в которой возможно существование продольного состояния ФФ, значительно уменьшается по сравнению с трёхслойной структурой (с теми же параметрами) из-за конкуренции с π -состоянием. Аналогично обычным S/F/S структурам, в S/F/N/F/S структурах возможен температурный $0 \rightarrow \pi$ переход, но в пятислойной структуре он может сопровождаться значительным возрастанием Λ^{-1} , а не падением. Показано, что в таких структурах также возможны $\pi \rightarrow 0$ переходы, индуцируемые током или параллельным полем, которые сопровождаются значительным изменением величины Λ^{-1} . В параграфе 4.6 приведены выводы и обсуждается практическое применение полученных результатов.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты

- 1) В случае коротких мостиков с длиной $L < \xi$ пороговая энергия δF_{thr} , необходимая для образования проскальзывания фазы сверхпроводящего

параметра порядка, растёт при уменьшении длины мостика как $1/L$, что связано с подавлением параметра порядка в берегах. Обнаружено, что полученные вблизи критической температуры аналитические зависимости $\delta F_{thr}(I)$ остаются применимыми в широком диапазоне температур ниже T_c . Найдено, что наличие в длинных мостиках дефектов, которые относительно слабо подавляют критический ток мостика, может значительно изменить функциональную зависимость $\delta F_{thr}(I)$, приведя её к виду, характерному для джозефсоновских контактов и коротких мостиков.

- 2) Для мостиков из двузонных сверхпроводников со слабой межзонной связью обнаружена осцилляционная зависимость критического тока I_c от длины мостика, объяснённая образованием фазовых солитонов при токе $I < I_c$ и изменением их числа при изменении длины. Обнаружено, что в случае достаточно длинных мостиков и слабой межзонной связи существует область токов, при которых возможно флуктуационное переключение в состояние с фазовым солитоном и изменение числа фазовых солитонов в мостике, что отражается в значительном уменьшении пороговой энергии образования центра проскальзывания фазы.
- 3) В тонкоплёночных гибридных структурах сверхпроводник/ферромагнетик/нормальный металл (S/F/N) подавление магнитным полем или током триплетной сверхпроводимости в F/N слоях приводит к необычной зависимости обратной эффективной глубины проникновения поля $\Lambda^{-1}(H, I)$ не только в продольном состоянии Фульде-Феррелла (ФФ), но и при параметрах, близких к области существования этого состояния. Λ^{-1} возрастает в слабых полях и токах и достигает максимума при конечных H или I . Также предсказано, что пятислойную S/F/N/F/S структуру можно перевести из однородного π -состояния в продольное состояние ФФЛО (и обратно) с помощью параллельного магнитного поля, продольного тока или изменения температуры. Данный переход сопровождается гигантским изменением Λ^{-1} .

Список литературы

- [1] Fink H. J. Vortex Nucleation in a Superconducting Slab near a Second-Order phase Transition and Excited States of the Sheath near H_{c3} // Physical Review. — 1969. — Vol. 177, no. 2. — P. 732–737.
- [2] Likharev K. K. Superconducting weak links // Reviews of Modern Physics. — 1979. — Vol. 51, no. 1. — P. 101–159.
- [3] Qiu Chunyin, Qian Tiezheng. Numerical study of the phase slip in two-dimensional superconducting strips // Physical Review B. — 2008. — Vol. 77, no. 17. — P. 174517.

- [4] Vodolazov D. Yu. Saddle point states in two-dimensional superconducting films biased near the depairing current // *Physical Review B*. — 2012. — Vol. 85, no. 17. — P. 174507.
- [5] Little W.A. Decay of Persistent Currents in Small Superconductors // *Physical Review*. — 1967. — Vol. 156, no. 2. — P. 396–403.
- [6] Langer J.S., Ambegaokar V. Intrinsic resistive transition in narrow superconducting channels // *Physical Review*. — 1967. — Vol. 164, no. 2. — P. 498–510.
- [7] The origin of the anomalous superconducting properties of MgB_2 / H. J. Choi [et al.] // *Nature*. — 2002. — Vol. 418, no. 6899. — P. 758–760.
- [8] Tanaka Y. Soliton in Two-Band Superconductor // *Physical Review Letters*. — 2001. — Vol. 88, no. 1. — P. 017002.
- [9] Fulde P., Ferrell R. A. Superconductivity in a Strong Spin-Exchange Field // *Physical Review*. — 1964. — Vol. 135, no. 3A. — P. A550–A563.
- [10] Ю.Н. Ларкин А.И. и Овчинников. Неоднородное состояние сверхпроводников // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 1964. — Т. 47, № 3. — С. 1136–1146.
- [11] Mironov S., Mel'nikov A., Buzdin A. Vanishing Meissner effect as a Hallmark of in-Plane Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov Instability in Superconductor–Ferromagnet Layered Systems // *Physical Review Letters*. — 2012. — Vol. 109, no. 23. — P. 237002.
- [12] McCumber D. E. Intrinsic Resistive Transition in Thin Superconducting Wires Driven from Current Sources // *Physical Review*. — 1968. — Vol. 172, no. 2. — P. 427–429.
- [13] Microscopic Theory of Thermal Phase Slips in Clean Narrow Superconducting Wires / A. Zharov [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — Vol. 98, no. 19. — P. 197005.
- [14] Semenov A. V., Krutitskii P. A., Devyatov I. A. Microscopic theory of phase slip in a narrow dirty superconducting strip // *JETP Letters*. — 2010. — Vol. 92, no. 11. — P. 762–766.
- [15] Lukens J. E., Warburton R. J., Webb W. W. Onset of Quantized Thermal Fluctuations in "One-Dimensional" Superconductors // *Physical Review Letters*. — 1970. — Vol. 25, no. 17. — P. 1180–1184.

- [16] Newbower R. S., Beasley M. R., Tinkham M. Fluctuation Effects on the Superconducting Transition of Tin Whisker Crystals // Physical Review B. — 1972. — Vol. 5, no. 3. — P. 864–868.
- [17] Hysteretic I-V curves of superconducting nanowires / M. Tinkham [et al.] // Physical Review B. — 2003. — Vol. 68, no. 13. — P. 134515.
- [18] Individual topological tunnelling events of a quantum field probed through their macroscopic consequences / M. Sahu [et al.] // Nature Physics. — 2009. — Vol. 5, no. 7. — P. 503–508.
- [19] Switching Currents Limited by Single Phase Slips in One-Dimensional Superconducting Al Nanowires / P. Li [et al.] // Physical Review Letters. — 2011. — Vol. 107, no. 13. — P. 137004.
- [20] Quantitative analysis of quantum phase slips in superconducting $\text{Mo}_{76}\text{Ge}_{24}$ nanowires revealed by switching-current statistics / T. Aref [et al.] // Physical Review B. — 2012. — Vol. 86, no. 2. — P. 024507.
- [21] Stochastic and deterministic phase slippage in quasi-one-dimensional superconducting nanowires exposed to microwaves / Myung-Ho Bae [et al.] // New Journal of Physics. — 2012. — Vol. 14, no. 4. — P. 043014.
- [22] Statistics of localized phase slips in tunable width planar point contacts / Xavier D.A. Baumans [et al.] // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7. — P. 44569.
- [23] Khlebnikov S. Decay of near-critical currents in superconducting nanowires // Physical Review B. — 2016. — Vol. 94, no. 6. — P. 064517.
- [24] Lin S.-Z., Hu X. Phase solitons in multi-band superconductors with and without time-reversal symmetry // New Journal of Physics. — 2012. — Vol. 14, no. 6. — P. 063021.
- [25] Gurevich A., Vinokur V. M. Interband Phase Modes and Nonequilibrium Soliton Structures in Two-Gap Superconductors // Physical Review Letters. — 2003. — Vol. 90, no. 4. — P. 047004.
- [26] Gurevich A., Vinokur V. M. Phase textures induced by dc current pairbreaking in multilayer structures and two-gap superconductors // Physical Review Letters. — 2006. — Vol. 97, no. 13. — P. 137003.
- [27] Yerin Y. S., Omelyanchouk A. N. Coherent current states in a two-band superconductor // Low Temperature Physics. — 2007. — Vol. 33, no. 5. — P. 401–407.

- [28] Magnetic response of mesoscopic superconducting rings with two order parameters / H. Bluhm [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2006. — Vol. 97, no. 23. — P. 237002.
- [29] Experimental formation of a fractional vortex in a superconducting bi-layer / Y. Tanaka [et al.] // *Physica C*. — 2018. — Vol. 548. — P. 44–49.
- [30] Observation of quantum oscillations in a narrow channel with a hole fabricated on a film of multiband superconductors / Y. Tanaka [et al.] // *Solid State Communications*. — 2015. — Vol. 201. — P. 95–97.
- [31] Temperature controlled Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov instability in superconductor-ferromagnet hybrids / S. V. Mironov [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2018. — Vol. 121, no. 7. — P. 077002.
- [32] Bobkov A. M., Bobkova I. V. Enhancing of the Critical Temperature of an In-Plane FFLO State in Heterostructures by the Orbital Effect of the Magnetic Field // *JETP Letters*. — 2014. — Vol. 99, no. 6. — P. 333–339.
- [33] Самохвалов А. В. Фазовые переходы в гибридных SFS-структурах с тонкими сверхпроводящими слоями // *Физика твердого тела*. — 2017. — Т. 59, № 11. — С. 2123–2129.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи

- [A1] P.M. Marychev, D.Yu. Vodolazov. Threshold perturbations in current-carrying superconducting bridges with a finite length near the critical temperature // *JETP Letters*. — 2016. — Vol. 103, no. 6. — P. 409–414.
- [A2] P.M. Marychev, D.Yu. Vodolazov. Threshold fluctuations in a superconducting current-carrying bridge // *Superconductor Science and Technology*. — 2017. — Vol. 30, no. 7. — P. 075008.
- [A3] P.M. Marychev, D.Yu. Vodolazov. Soliton-induced critical current oscillations in two-band superconducting bridges // *Physical Review B*. — 2018. — Vol. 97, no. 10. — P. 104505.
- [A4] Марычев П. М. Флуктуационное образование фазовых солитонов в двухзонных сверхпроводящих мостиках // *Физика твердого тела*. — 2018. — Т. 60, № 11. — С. 2110–2115.
- [A5] P.M. Marychev, D.Yu. Vodolazov. Tuning the in-plane Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov state in a superconductor/ferromagnet/normal-metal hybrid structure by current or magnetic field // *Physical Review B*. — 2018. — Vol. 98, no. 21. — P. 214510.

Материалы конференций

- [B1] Марычев П. М. и Водолазов Д. Ю. Флуктуационный переход в резистивное состояние токонесущих сверхпроводящих проволок конечной длины // Труды XX Международного симпозиума "Нанозелектроника". — Т. 1. — Нижний Новгород : Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2016. — С. 80–81.
- [B2] Марычев П. М. и Водолазов Д. Ю. Флуктуационное переключение в резистивное состояние сверхпроводящих токонесущих мостиков: влияние дефектов и температуры // Сборник тезисов VII-й Всероссийской конференции молодых ученых «Микро-, нанотехнологии и их применение» им. Ю.В. Дубровского. — Черногловка, 2017. — С. 38.
- [B3] Марычев П. М. и Водолазов Д. Ю. Флуктуационное переключение в резистивное состояние сверхпроводящих токонесущих мостиков при произвольной температуре // Труды XXI Международного симпозиума "Нанозелектроника". — Т. 1. — Нижний Новгород : Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2017. — С. 82–83.
- [B4] Марычев П. М. и Водолазов Д. Ю. Индуцированные солитонами осцилляции критического тока в мостиках из двузонных сверхпроводников // Труды XXII Международного симпозиума "Нанозелектроника". — Т. 1. — Нижний Новгород : Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2018. — С. 86–87.
- [B5] Марычев П. М. и Водолазов Д. Ю. Индуцированные фазовыми солитонами осцилляции критического тока в двузонных сверхпроводящих мостиках // XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки): материалы докладов. — Т. 2. — Княгинино : НГИЭУ, 2018. — С. 33.
- [B6] Марычев П. М. и Водолазов Д. Ю. Управление ФФЛО-состоянием в структурах сверхпроводник-ферромагнетик-нормальный металл магнитным полем или током // Труды XXIII Международного симпозиума "Нанозелектроника". — Т. 1. — Нижний Новгород : Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2019. — С. 81–82.
- [B7] Марычев П. М. и Водолазов Д. Ю. Управление ФФЛО-состоянием в структурах сверхпроводник-ферромагнетик-нормальный металл магнитным полем или током // XVIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых "Проблемы физики твердого тела и высоких давлений". — Москва : ФИАН, 2019. — С. 76–78.

Марычев Павел Михайлович

**Стационарные неоднородные состояния в токонесущих
квазиодномерных сверхпроводниках**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Подписано к печати 17 января 2020 г.
Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур Российской
академии наук — филиала Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт
прикладной физики Российской академии наук»
603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афоново, ул.
Академическая, д. 7.