

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

На правах рукописи

Вадимов Василий Львович

**Неоднородные состояния и неравновесные явления в
сверхпроводящих структурах с нарушенной симметрией
относительно обращения времени**

01.04.07 — физика конденсированного состояния

Научный доклад по научно-квалификационной работе (диссертации)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
Мельников Александр Сергеевич

Рецензент:

доктор физико-математических наук,
зав. отделом 120 ИФМ РАН
Курин Владислав Викторович

Нижний Новгород — 2019

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В силу принципа Паули, волновая функция электронов в куперовской паре обязана быть антисимметричной относительно перестановки частиц. Это требование накладывает определенное условие на связь спинового и орбитального момента пары [1]. Полный спин пары может быть равен нулю (спин-синглет), либо единице (спин-триплет). Спин-синглет отвечает нечетной по перестановкам спиновой волновой функции, следовательно синглетные куперовские пары должны обладать четным орбитальным моментом и наоборот, триплетные куперовские пары имеют нечетный орбитальный момент. В зависимости от симметрии спаривания, сверхпроводники классифицируются по орбитальному моменту куперовских пар как s -, p -, d -волновые сверхпроводники, где буквенные обозначения соответствуют обозначениям атомных орбиталей для состояний с моментом 0, 1, 2, и так далее. Разные типы спаривания соответствуют различной зависимости сверхпроводящей щели $\hat{\Delta}$ от импульса квазичастицы вблизи поверхности Ферми. Большинство сверхпроводников являются сверхпроводниками s -типа, куперовские пары в них обладают нулевым спиновым и орбитальным моментом, в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) реализуется d -тип спаривания, при котором сверхпроводящая щель имеет вид $\hat{\Delta}(\mathbf{k}) \propto k_x^2 - k_y^2$, где оси x и y соответствуют кристаллографическим осям кристалла. Также известно что p -волновое спаривание реализуется в сверхтекучем гелии-3. Из-за отсутствия кристаллической решетки и изотропии спектра нормальных квазичастиц, сверхтекучее состояние в нем реализуется в большом многообразии фаз [2; 3]. Однако температура сверхтекучего фазового перехода в гелии-3 крайне низка ($T_c \sim 10^{-3}$ К), что затрудняет экспериментальную работу с ним. Поэтому представляет интерес поиск твер-

дотельных аналогов сверхтекучего гелия-3 — p -волновых сверхпроводников. Наиболее вероятным кандидатом на роль такого сверхпроводника является Sr_2RuO_4 [4; 5]. В этом соединении сверхпроводящее состояние обладает нарушенной симметрией относительно обращения времени, а куперовские пары предположительно имеют орбитальный момент равный 1, ориентированный в одном из двух возможных направлений вдоль оси анизотропии кристалла. Такой тип спаривания носит название кирального p -волнового типа. Несмотря на наличие ряда экспериментальных свидетельств в пользу киральной p -волновой сверхпроводимости в Sr_2RuO_4 [4; 5], проблема типа спаривания в этом соединении остается открытой, в связи с чем представляет интерес поиск тестов на киральную p -волновую сверхпроводимость.

Помимо калибровочной $U(1)$ симметрии сверхпроводящее состояние в киральных p -волновых сверхпроводниках нарушает дискретную симметрию относительно обращения времени, что проявляется в двукратном вырождении основного состояния сверхпроводника. В таких сверхпроводниках возможно существование киральных доменов — пространственных областей, в которых куперовские пары имеют противоположные значения момента импульса. Экспериментальное обнаружение киральных доменов могло бы быть наглядным свидетельством киральной p -волновой сверхпроводимости. В связи с этим представляет интерес изучение механизма Киббла–Зурека — механизма генерации топологических дефектов из-за тепловых флуктуаций при неравновесных фазовых переходах второго рода из более симметричной фазы в менее симметричную [6; 7]. В обычных s -волновых сверхпроводниках этот механизм приводит к генерации вихрь–антивихревых пар, в киральных p -волновых сверхпроводниках помимо пар вихрей и антивихрей можно ожидать появления киральных доменов.

Нарушение симметрии относительно обращения времени в сверхпроводящих системах может быть не связано с особенностями спаривания в сверхпроводнике, например, достаточно привести сверхпроводник в контакт

с несверхпроводящей подсистемой, обладающей нарушенной симметрией относительно обращения времени. Среди таких гибридных систем наиболее интересными являются системы, основанные на взаимодействии сверхпроводимости и ферромагнетизма [8—15]. Особый интерес представляет собой изучение взаимодействия между сверхпроводником и ферромагнетиком в случае неоднородного распределения намагниченности в магнитной подсистеме. Примером таких неоднородных состояний могут быть топологически нетривиальные распределения намагниченности в ферромагнитных пленках, известные как скирмионы [16—18]. Однако магнитные скирмионы являются неустойчивыми и, в зависимости от материальных параметров ферромагнетика и его толщины, испытывают расширение или коллапс [19]. Поэтому представляет интерес задача о стабилизации скирмиона в гибридных структурах сверхпроводник/ферромагнетик.

Для описания неравновесных явлений в сверхпроводниках, таких как генерация киральных доменов или других топологических дефектов в сверхпроводниках по механизму Киббла–Зурека, часто используется феноменологическая нестационарная теория Гинзбурга–Ландау. Однако ее применимость существенно ограничена, она может быть использована для описания флуктуационной сверхпроводимости при температурах выше критической температуры сверхпроводящего фазового перехода, а также в случае так называемой бесцелевой сверхпроводимости [20], имеющей место, например, в случае сильного рассеяния электронов на магнитных примесях или сильного неупругого рассеяния электронов за счет электрон–фононного взаимодействия. Для описания низкотемпературной бесстолкновительной динамики сверхпроводящих систем необходимо использовать микроскопические подходы, такие как нестационарная теория Боголюбова–де Жена [21] или техника Келдыша [22]. Исследование динамики сверхпроводящих систем особенно важно в контексте изучения приборов на основе гибридных систем, в которых за счет эффекта близости сверхпроводящие корреляции наводятся

в материалах, не являющихся сверхпроводниками, поскольку в таких системах возможно контролируемым образом получать сверхпроводящие состояния со свойствами, отличными от свойств первичного сверхпроводника. Так, сверхпроводящие корреляции, наводимые обычными s -волновыми сверхпроводниками в материалах с сильным зеемановским и спин–орбитальным взаимодействием, оказываются обладающими p -волновой симметрией [23]. Подобные гибридные системы предлагается использовать в ряде прикладных тематик, в частности для создания элементов классической [9; 24] и квантовой логики [25; 26]. Изучение динамических свойств гибридных систем может дать более глубокое понимание механизмов работы предлагаемых сверхпроводящих приборов и позволит оценить пределы их быстродействия.

Степень разработанности темы исследования. Обзор существующих экспериментальных данных о сверхпроводимости в Sr_2RuO_4 приведен в статьях [4; 5]. Первым экспериментальным наблюдением, указывавшем на необычность сверхпроводящего состояния в Sr_2RuO_4 являлась зависимость критической температуры от концентрации примесей в образце [27]. Результат другого эксперимента, связанного с измерением спиновой магнитной восприимчивости Sr_2RuO_4 с помощью ядерного магнитного резонанса на атомах кислорода, свидетельствует в пользу спин–триплетного спаривания в этом соединении. В синглетном состоянии спин куперовской пары равен нулю, поэтому спиновая восприимчивость должна быть подавлена при температурах ниже критической. Однако ЯМР измерения показывают, что в Sr_2RuO_4 спиновая восприимчивость остается константой вплоть до нуля температур [28]. Важным экспериментальным фактом является обнаруженные с помощью метода мюонной спиновой релаксации спонтанные магнитные поля [29], свидетельствующие о спонтанном нарушении симметрии обращения времени. Другим подтверждением этого обстоятельства является ненулевой полярный эффект Керра [30; 31], знак угла Керра при этом можно

контролировать с помощью охлаждения образца в ненулевом магнитном поле. Данные приведенные эксперименты свидетельствуют в пользу реализации в Sr_2RuO_4 киральной p -волновой сверхпроводимости. Однако есть экспериментальные данные, которые противоречат теоретическим выводам для кирального p -волнового сверхпроводника. Одним из наиболее ярких свидетельств наличия киральной p -волновой сверхпроводимости могли бы являться предсказанные теоретически спонтанные поверхностные токи, текущие вдоль краев образца [32; 33], однако, эти поверхностные токи не были обнаружены в эксперименте [34—37]. Одним из объяснений отсутствия поверхностных токов в Sr_2RuO_4 является их чувствительность к качеству поверхности [33; 38—40]. Также выдвигаются гипотезы о киральном, но не p -волновом характере сверхпроводимости в этом соединении [41]. В этом случае поверхностные токи обращаются в ноль для макроскопических образцов [42—44].

В области экспериментального исследования доменной структуры в Sr_2RuO_4 имеется большое число противоречивых данных о числе доменов в образцах. Результаты измерений стационарного эффекта Джозефсона в Sr_2RuO_4 оказываются в согласии с предположением о малом числе доменов в образце [45]. Однако данные экспериментов по спиновой мюонной релаксации можно интерпретировать как свидетельство в пользу существования в образце большого числа киральных доменов размером порядка 1 мкм и меньше, в предположении что магнитные поля рассеяния полностью обусловлены доменными стенками. Экспериментальное измерение эффекта Керра в Sr_2RuO_4 дает оценку 50 мкм на латеральные размеры доменов в плоскости ab и от 0.2 мкм вдоль оси c .

Магнитные скирмионы в ферромагнитных пленках могут быть стабилизированы с помощью внешнего магнитного поля, а также пространственной модуляции материальных параметров ферромагнетика [46; 47] или его толщины [48; 49]. Кроме того, скирмионы устойчивы в так называемых ки-

ральных ферромагнетиках, обладающих взаимодействием Дзялошинского–Мории [50—54]. В таких ферромагнетиках спонтанно возникают решетки скирмионов.

Было выяснено, что в бесстолкновительном пределе при нулевой температуре, динамика сверхпроводящего параметра порядка Δ имеет осцилляторный характер, в асимптотике больших времен имеющий вид $\Delta(t) \approx \Delta_\infty + a \cos(2\Delta_\infty t) / \sqrt{\Delta_\infty t}$, где предельное значение Δ_∞ совпадает с равновесным значением параметра порядка Δ_0 в случае слабого возмущения сверхпроводника [55; 56] и отлично от него, если сверхпроводник существенно выведен из равновесия [57—60]. Эти осцилляции абсолютной величины параметра порядка носят название мод Хиггса, по аналогии с бозоном Хиггса из физики элементарных частиц [61]. Моды Хиггса были впервые обнаружены с помощью рамановской спектроскопии в сверхпроводнике $2H - NbSe_2$, обладающем упорядочением типа волна зарядовой плотности, где они проявили себя в виде пика на частоте $2\Delta_0$ в рамановском спектре при температурах ниже критической температуры сверхпроводящего перехода [62; 63]. Недавний прогресс в области терагерцовой экспериментальной техники позволил напрямую пронаблюдать осцилляции сверхпроводящего параметра порядка с помощью *rimr-probe* методики [64]. Широкополосная накачка возбуждает моду с частотой $2\Delta_0$, в то время как узкополосная накачка с хорошо определенной частотой ω вызывает осцилляции модуля параметра порядка с частотой 2ω . Поскольку сверхпроводящий параметр порядка входит в материальное соотношение для сверхпроводника между током и сверхскоростью, возбуждение мод Хиггса приводит к нелинейному отклику на частоте третьей гармоники 3ω . Амплитуда нелинейного сигнала имеет пик при частоте совпадающей с собственной частотой мод Хиггса $2\omega = 2\Delta_0$, что подтверждается экспериментом [65] и теоретическими расчетами [66]. Альтернативный метод детектирования мод Хиггса посредством измерения генерации второй гармоники недавно был предложен для токонесущих состояний в сверхпро-

воднике [67].

Цель и задачи работы. Целью данной диссертации является теоретическое исследование неоднородных состояний и неравновесных процессов в сверхпроводниках с нарушенной симметрией относительно обращения времени, гибридных структурах сверхпроводник/ферромагнетик, а также изучению низкотемпературной динамики сверхпроводящих гетероструктур. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Исследование термоиндуцированных магнитных полей и эффекта Киббла–Зурека в киральных p -волновых сверхпроводниках.
- Изучение электронной структуры запиннированного на колумнарном дефекте вихря в киральном p -волновом сверхпроводнике.
- Исследование стабильности магнитных скирмионов в наноструктурированных бислоях сверхпроводник/ферромагнетик.
- Изучение низкотемпературной когерентной динамики сверхпроводящего параметра порядка в гибридных структурах сверхпроводник/изолятор/нормальный металл с учетом эффекта близости.

Научная новизна работы. Научная новизна работы определяется оригинальностью полученных результатов и заключается в следующем:

- показано, что в локальное подавление сверхпроводимости в киральном p -волновом сверхпроводнике посредством нагрева образца лазерным излучением приводит к генерации сверхтекучего тока и магнитного поля. Выполнены оценки величины создаваемого магнитного поля.
- показана возможность генерации доменов в p -волновых сверхпроводниках по механизму Киббла–Зурека при осуществлении фазового пере-

хода в сверхпроводящее состояние с нарушенной симметрией относительно обращения времени неадиабатическим образом.

- найден спектр и волновые функции квазичастиц в запиннированном на колумнарном дефекте вихре в киральном p -волновом сверхпроводнике. Продемонстрирована качественная зависимость спектра от взаимной ориентации киральности сверхпроводящего домена и завихренности вихря. Выполнено сравнение со случаем обычного s -волнового сверхпроводника. С помощью найденного спектра вычислен дифференциальный туннельный кондактанс и СВЧ проводимость.
- продемонстрирована возможность стабилизации магнитных скирмионов в гибридных структурах сверхпроводник-ферромагнетик с наноструктурированным сверхпроводящим слоем.
- Найдены частоты малых колебаний модуля сверхпроводящего параметра порядка (моды Хиггса) в гибридных структурах сверхпроводник/изолятор/нормальный металл. Показано, что в таких системах в дополнение к обычным для сверхпроводников модам Хиггса на частоте двойной сверхпроводящей щели, появляются колебания на частоте удвоенной наведенной в нормальном металле щели, а также на частоте равной сумме сверхпроводящей и наведенной щелей.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты вычисления термоиндуцированных магнитных полей, демонстрация возможности генерации киральных доменов по механизму Киббла–Зурека, а также вычисления локального дифференциального кондактанса и СВЧ проводимости является полезным в контексте обнаружения киральной сверхпроводимости p -типа в реальных соединениях, в частности, для определения симметрии спаривания в Sr_2RuO_4 .

Демонстрация возможности стабилизации скирмионов в наноструктурированных бислоях сверхпроводник/ферромагнетик представляет интерес в контексте изучения гетероструктур сверхпроводник/ферромагнетик с неоднородным распределением намагниченности.

Результаты расчета динамики сверхпроводящего параметра порядка в гибридных структурах сверхпроводник/изолятор/нормальный металл могут быть полезны для определения динамических характеристик приборов, основанных на сверхпроводящих гетероструктурах.

Методология и методы исследования. В работе были использованы такие феноменологические подходы, как равновесная и нестационарная теория Гинзбурга–Ландау и теория Лондонов. Помимо этих методов, были использованы микроскопические модели, а именно уравнения Боголюбова–де Жена и неравновесная техника Келдыша. Большая часть вычислений была выполнена аналитически, с привлечением при необходимости численного счета.

Положения, выносимые на защиту.

1. Локальное подавление сверхпроводимости в киральных p -волновых сверхпроводниках с помощью нагрева лазерным излучением приводит к возникновению сверхтока и магнитного поля вокруг горячего пятна.
2. При осуществлении неравновесных фазовых переходов в состояние с киральной p -волновой сверхпроводимостью возможна генерация киральных доменов по механизму Киббла–Зурека.
3. Локальный дифференциальный туннельный кондактанс кирального p -волнового сверхпроводника вблизи запиннированного на колумнарном дефекте вихря чувствителен к направлению магнитного поля в вихре.

4. Вклад в высокочастотную холловскую проводимость от запиннированных на колумнарных дефектах вихрей в киральных p -волновых сверхпроводниках асимметричен по направлению магнитного поля, создающего вихри.
5. Скирмион в бислое ферромагнетик/сверхпроводник может стабилизирован путем наноструктурирования сверхпроводящего слоя.
6. В гибридных структурах сверхпроводник/изолятор/нормальный металл помимо обычных мод Хиггса с частотой равной удвоенной сверхпроводящей щели имеются две дополнительные моды, с частотами равными сумме сверхпроводящей щели сверхпроводника и наведенной щели в нормальном металле и удвоенной наведенной щели.

Вклад автора в полученные результаты. Соискатель принимал активное участие в постановке задач и интерпретации результатов. Вклад автора в решение поставленных задач является определяющим.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов работы обеспечена выбором адекватных моделей, использованных для описания исследуемых систем.

Результаты работы докладывались на семинарах Института Физики Микроструктур РАН (Нижний Новгород), Института Теоретической Физики РАН имени Н. И. Ландау (Черноголовка), Королевского технологического института (Стокгольм, Швеция) и Университета Аалто (Хельсинки, Финляндия), а также на конференциях «Нанозфизика и наноэлектроника» (2014–2019 гг., Нижний Новгород), «International workshop Localization, Interactions and Superconductivity» (2015 г., Черноголовка), «Проблемы физики твердого тела и высоких давлений» (2015, 2019 г., Сочи), «Winter School on Quantum Condensed-matter Physics» (2017 г., Черноголовка), «Many body quantum theory

meets quantum information» (2018 г., Солнечногорск). Результаты диссертации опубликованы в 11 работах, из них 6 статей в рецензируемых журналах [A1—A6] и 5 работ в сборниках тезисов докладов и трудов конференций [A7—A11].

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка публикаций автора и библиографии. Общий объем диссертации — 110 страниц, включая 17 рисунков. Библиография включает 106 наименований на 10 страницах.

Во введении описывается состояние исследований по теме диссертации на момент её написания, обосновывается актуальность выбранной темы, раскрывается новизна и значимость работы, приводятся выносимые на защиту положения и план диссертации.

В первой главе рассматривается задача о генерации магнитного поля вокруг локально нагретой области в киральном p -волновом сверхпроводнике, а также изучается механизм Киббла–Зурека генерации киральных доменов. В разделе 1.1 приведена постановка задачи и выполнен обзор предшествующих работ. В разделе 1.2 изложена математическая модель: в данной главе для описания киральной p -волновой сверхпроводимости используется феноменологическая двухкомпонентная теория Гинзбурга–Ландау, в которой компоненты параметра порядка соответствуют куперовским парам с противоположной ориентацией орбитального момента. В разделе 1.3 изложено решение задачи о генерации магнитного поля вокруг области с подавленной сверхпроводимостью, созданной с помощью разогрева образца лазерным излучением, см. Рис. 1. Показано, что при локальном разогреве однородного кирального домена возникает примесь побочной компоненты параметра порядка, а их сосуществование приводит к появлению сверхтекучего тока и магнитного поля. В рамках адиабатического приближения $\xi|\nabla T| \ll T - T_c$ получено выражение для величины магнитного поля в центре горячего пятна и магнитного момента системы токов, выполнено сравнение с численным

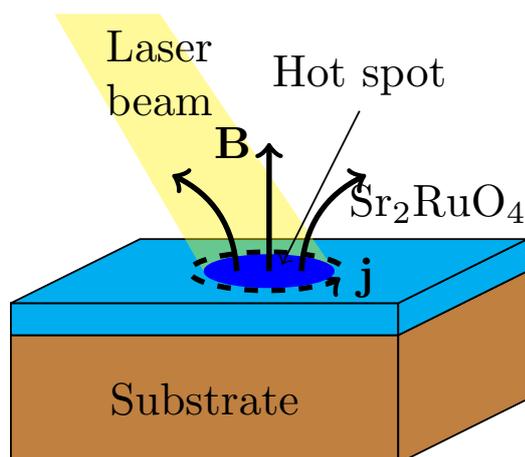


Рис. 1: Предлагаемая схема эксперимента. Лазерный пучок нагревает образец, создавая сверхпроводящий ток вокруг области с подавленной сверхпроводимостью. Магнитное поле, создаваемое током, может быть задетектировано с помощью датчиков Холла или СКВИД микроскопов.

счетом. Проанализирована зависимость магнитного поля и магнитного момента от интенсивности и размера горячего пятна. В разделе 1.4 исследована генерация киральных доменов по механизму Киббла–Зурека. Рассмотрен случай температурного фазового перехода, при котором при охлаждении образца с конечной скоростью происходит переход из нормальной фазы в сверхпроводящую с нарушенной симметрией относительно обращения времени, а также переход в пленке сверхпроводника, помещенной в продольное магнитное поле, при этом переход в фазу с нарушенной симметрией относительно обращения времени происходит на фоне развитой сверхпроводимости. Результаты первой главы опубликованы в работах [A1; A4; A6—A9].

Во второй главе с помощью уравнений Боголюбова–де Жена решается задача об электронной структуре вихря, запинингованного на колумнарном дефекте в киральном p -волновом сверхпроводнике. В разделе 2.1 приведена постановка задачи и выполнен обзор предшествующих работ. В разделе 2.2 изложена математическая модель: в данной главе используются уравнения Боголюбова–де Жена и их квазиклассический предел — уравнения Андреева. В разделе 2.3 вычислен спектр квазичастиц в запинингованном

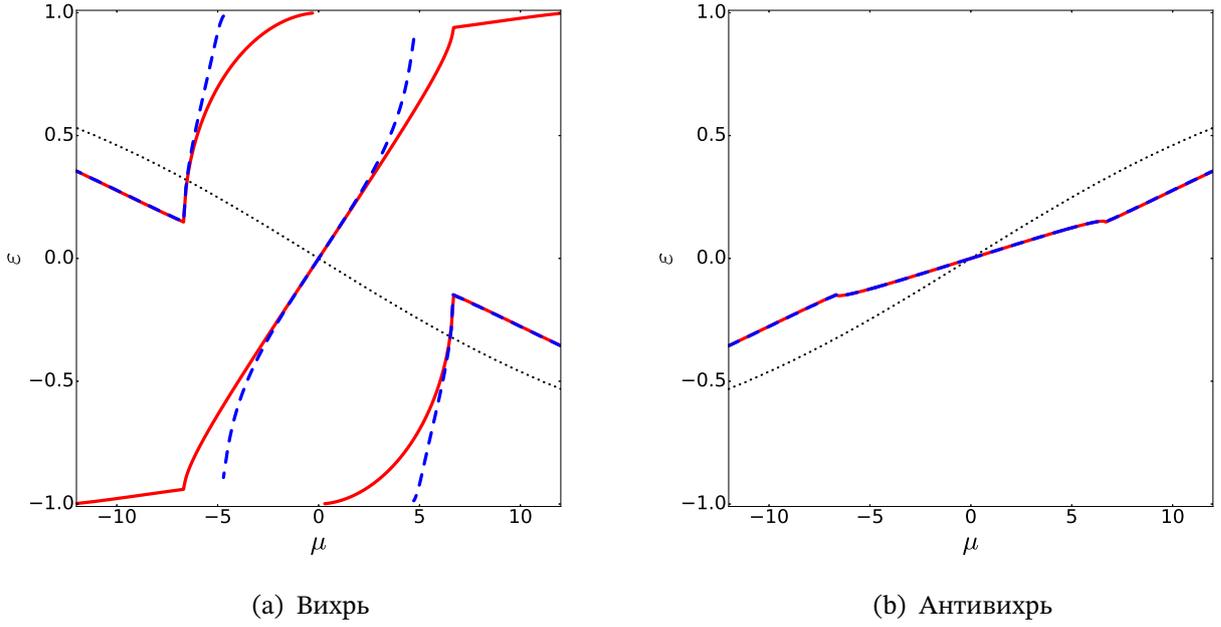


Рис. 2: Квазичастичный спектр для вихрей противоположной ориентации. Численное решение обозначено красными сплошными линиями, синие пунктирные линии соответствуют результату пертурбативного подхода. Черная пунктирная линия соответствует спектральной ветви Кароли-де Жена – Матрикона для свободного вихря [68]. Радиус дефекта $R = 0.4\xi$, $(k_F\xi)^{-1} = 0.06$, ξ — длина когерентности, $\hbar k_F$ — импульс Ферми.

на колумнарном дефекте вихре в киральном p -волновом сверхпроводнике, см. Рис. 2. Продемонстрировано качественное различие в спектре квазичастиц для вихрей противоположной ориентации. Далее, в разделе 2.4 с помощью найденного спектра и квазичастичных волновых функций вычислены туннельный кондактанс, измеряемый в экспериментах по сканирующей туннельной спектроскопии, и вклад в высокочастотную холловскую проводимость от локализованных в вихрях состояний. Результаты второй главы опубликованы в работах [A2; A3].

В третьей главе в рамках теории Лондонов рассматривается задача об устойчивости магнитного скирмиона в гетероструктуре ферромагнетик/сверхпроводник. В разделе 3.1 приведена постановка задачи и выполнен обзор предшествующих работ. В разделе 3.2 изложена модель Лондо-

нов, а также решена задача о цилиндрическом магнитном домене в однородной гетероструктуре ферромагнетик/сверхпроводник. Показано, что магнитостатическая энергия скирмиона имеет разную зависимость от его радиуса R в ферромагнитной пленке $E_f \propto -R \ln R$ и в бислое ферромагнетик/сверхпроводник $E_f \propto -R$. За счет этого возможна стабилизация скирмиона при помощи наноструктурирования сверхпроводящего слоя, что подтверждено численным счетом, изложенным в разделе 3.3. Результаты третьей главы опубликованы в работах [A5; A11].

В четвертой главе в рамках неравновесной техники Келдыша изучается низкотемпературная когерентная динамика сверхпроводящего параметра порядка в гетероструктурах сверхпроводник/изолятор/нормальный металл. В разделе 4.1 приведена постановка задачи и выполнен обзор предшествующих работ. В разделе 4.2 изложена математическая модель: в данной главе используется неравновесная техника Келдыша. Далее, в разделе 4.3 исследуются колебания сверхпроводящего параметра порядка вблизи положения равновесия — моды Хиггса. Рассмотрены случаи массивного нормального металла с нулевой наведенной щелью и мезоскопического нормального металла с конечной наведенной щелью. Показано, что помимо моды Хиггса с частотой $2\Delta_0$ появляются еще две моды Хиггса с частотами, равными $\Delta_0 + \Delta_i$ и $2\Delta_i$, где Δ_0 и Δ_i — мягкая щель в сверхпроводнике и наведенная щель в нормальном металле. Результаты четвертой главы опубликованы в работе [A10].

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

- В рамках модели Гинзбурга–Ландау изучен механизм генерации магнитных полей в из-за неоднородного нагрева кирального p -волнового сверхпроводника. Выполнена оценка на величину возникающего магнитного поля. Данный эффект может быть обнаружен экспериментально с помощью измерения локального магнитного поля вблизи области с подавленной сверхпроводимостью, что может быть полезно для экспе-

риментального обнаружения киральной p -волновой сверхпроводимости в реальных соединениях.

- С помощью нестационарной теории Гинзбурга–Ландау исследован механизм Киббла–Зурека генерации киральных доменов в p -волновых сверхпроводниках. Рассмотрен случай температурного фазового перехода и перехода, вызванного продольным магнитным полем в тонкой пленке сверхпроводника. Полученные результаты интересны в контексте обнаружения киральной p -волновой сверхпроводимости в реальных материалах.
- В рамках микроскопической модели Боголюбова–де Жена найден спектр квазичастиц в вихре, запиннингованном на колумнарном дефекте в p -волновом сверхпроводнике. Продемонстрирована качественная зависимость спектра от взаимной ориентации киральности сверхпроводящего домена и завихренности вихря, проведено сравнение со случаем обычного s -волнового сверхпроводника. Спектр квазичастиц в таких системах может быть экспериментально исследован с помощью техники сканирующей туннельной спектроскопии, также обсуждается влияние электронной структуры запиннингованных вихрей на СВЧ проводимость. Полученные результаты могут быть использованы в качестве теста на киральную p -волновую сверхпроводимость.
- В рамках модели Лондонов продемонстрирована возможность стабилизации магнитных скирмионов в гибридных структурах ферромагнетик/сверхпроводник с наноструктурированным сверхпроводящим слоем. Результат представляет интерес в контексте изучения гетероструктур ферромагнетик/сверхпроводник с неоднородным распределением намагниченности.
- С помощью неравновесной техники Келдыша исследованы колеба-

ния сверхпроводящего параметра порядка (моды Хиггса) в гибридных структурах сверхпроводник/изолятор/нормальный металл. Показано, что в таких системах в дополнение к обычным для сверхпроводников модам Хиггса на частоте удвоенной сверхпроводящей щели, появляются колебания на частотах, равным сумме сверхпроводящей и наведенной щелей и также удвоенной наведенной щели.

Список публикации автора по теме диссертации

- A1. *Vadimov V., Silaev M.* Predicted Nucleation of Domain Walls in $p_x + ip_y$ Superconductors by a Z_2 Symmetry-Breaking Transition in External Magnetic Fields // *Phys. Rev. Lett.* — 2013. — Т. 111, № 17. — С. 177001.
- A2. *Mel'nikov A. S., Samokhvalov A. V., Vadimov V. L.* Microscopic theory of vortex pinning on columnar defects in conventional and chiral superconductors // *Pis'ma v ZhETF.* — 2015. — Т. 102, № 11. — С. 886—895.
- A3. *Vadimov V., Mel'nikov A.* Electronic Structure of Vortices Pinned by Columnar Defects in $p_x \pm ip_y$ Superconductors // *Journal of Low Temperature Physics.* — 2016. — Т. 183, № 5/6. — С. 342—358.
- A4. *Vadimov V., Mel'nikov A.* Laser pulse probe of the chirality of Cooper pairs // *Phys. Rev. B.* — 2017. — Т. 96, № 18. — С. 184523.
- A5. *Vadimov V., Sapozhnikov M., Mel'nikov A.* Magnetic skyrmions in ferromagnet-superconductor (F/S) heterostructures // *Applied Physics Letters.* — 2018. — Т. 113, № 3. — С. 032402.
- A6. Фотоиндуцированные локальные неравновесные состояния в сверхпроводниках: модель горячего пятна / В. Л. Вадимов [и др.] // *Письма в ЖЭТФ.* — 2018. — Т. 108, № 4. — С. 278—287.
- A7. *Вадимов В. Л., Силаев М. А.* Генерация доменных стенок в $p_x + ip_y$ сверхпроводниках при помощи переходов, нарушающих Z_2 симметрию // *Труды XVIII Симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника».* Т. 1. — Нижний Новгород, Россия, 2014. — С. 23.

- A8. *Вадимов В. Л., Мельников А. С.* Пиннинг вихрей в киральных p -волновых сверхпроводниках // Труды XX Симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». Т. 1. — Нижний Новгород, Россия, 2016. — С. 27.
- A9. *Вадимов В. Л., Мельников А. С.* Термоиндуцированные токи в киральных p -волновых сверхпроводниках // Труды XXI Симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». Т. 1. — Нижний Новгород, Россия, 2017. — С. 37.
- A10. *Vadimov V. L., Khaymovich I. M., Mel'nikov A. S.* Coherent dynamics of a superconductor in hybrid structures with the proximity effect // Труды XXIII Симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». Т. 1. — Нижний Новгород, Россия, 2019. — С. 33.
- A11. *Vadimov V. L., Sapozhnikov M. V., Mel'nikov A. S.* Magnetic skyrmions in ferromagnet–superconductor (FS) heterostructures // Труды XXIII Симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». Т. 1. — Нижний Новгород, Россия, 2019. — С. 35.

Список литературы

1. *Минеев В. П., Самохин К. В.* Введение в теорию необычной сверхпроводимости. — МФТИ, 1998.
2. *Volovik G. E.* The universe in a helium droplet. Т. 117. — Oxford University Press on Demand, 2003.
3. *Volovik G. E., Gor'kov L. P.* Superconducting classes in heavy-fermion systems // *ЖЭТФ*. — 1985. — Т. 88. — С. 1412—1428.
4. *Mackenzie A. P., Maeno Y.* // *Rev. Mod. Phys.* — 2003. — Т. 75. — С. 657.
5. *Kallin C.* Chiral p-wave order in Sr_2RuO_4 // *Rep. Prog. Phys.* — 2012. — Т. 75. — С. 042501.
6. *Kibble T. W. B.* Topology of cosmic domains and strings // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. — 1976. — Т. 9, № 8. — С. 1387.
7. *H. Zurek W. Zurek, W. H.* Cosmological experiments in superfluid helium? *Nature* 317, 505-508. — 1985. — Окт.
8. *Bergeret F. S., Volkov A. F., Efetov K. B.* Long-Range Proximity Effects in Superconductor-Ferromagnet Structures // *Phys. Rev. Lett.* — 2001. — Апр. — Т. 86, вып. 18. — С. 4096—4099.
9. *Buzdin A. I.* Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures // *Rev. Mod. Phys.* — 2005. — Сент. — Т. 77, вып. 3. — С. 935—976.
10. *Eschrig M.* Spin-polarized supercurrents for spintronics: a review of current progress // *Reports on Progress in Physics*. — 2015. — Т. 78, № 10. — С. 104501.

11. Flux pinning by regular arrays of ferromagnetic dots / M. J. Van Bael [и др.] // *Physica C: Superconductivity*. — 2000. — Т. 332, № 1—4. — С. 12—19.
12. Local Observation of Field Polarity Dependent Flux Pinning by Magnetic Dipoles / M. J. Van Bael [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2001. — ЯНВ. — Т. 86, ВЫП. 1. — С. 155—158.
13. Nanoengineered Magnetic-Field-Induced Superconductivity / M. Lange [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2003. — Май. — Т. 90, ВЫП. 19. — С. 197006.
14. *Kayali M. A.* Theory of pinning in a superconducting thin film pierced by a ferromagnetic columnar defect // *Phys. Rev. B*. — 2005. — Т. 71, № 2. — С. 024515.
15. *Mironov S., Mel'nikov A., Buzdin A.* Electromagnetic proximity effect in planar superconductor-ferromagnet structures // *Applied Physics Letters*. — 2018. — Т. 113, № 2. — С. 022601.
16. *Belavin A., Polyakov A.* Metastable states of two-dimensional isotropic ferromagnets // *JETP Lett.* — 1975. — Т. 22, № 10. — С. 245—248.
17. *Dzyaloshinskii I., Ivanov B.* Localized topological solitons in a ferromagnet // *JETP Lett.* — 1979. — Т. 29, № 9. — С. 540—542.
18. *Kovalev A., Kosevich A., Maslov K.* Magnetic vortex-topological soliton in a ferromagnet with an easy-axis anisotropy // *JETP Lett.* — 1979. — Т. 30, № 6. — С. 296—299.
19. *O'Dell T.* *Ferromagnetodynamics: The Dynamics of Magnetic Bubbles // Domains, and Domain Walls* A Holsted Press Book. — 1981.
20. *Kopnin N. B.* *Theory of Nonequilibrium Superconductivity*. — 2000.
21. *Ketterson J. B., Song S. N.* *Superconductivity*. — 1999.

22. *Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П.* Статистическая физика. Часть 2. Теория конденсированного состояния. — Москва: Физматлит, 2004.
23. *Oreg Y., Refael G., Oppen F. von.* Helical liquids and Majorana bound states in quantum wires // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Т. 105, № 17. — С. 177002.
24. *Mironov S. V., Buzdin A. I.* Standard, inverse, and triplet spin-valve effects in F1/S/F2 systems // *Phys. Rev. B: Condensed matter and materials physics.* — 2014. — Апр. — Т. 89, № 14. — 144505 (1—8). — DOI: 10.1103/PhysRevB.89.144505.
25. Majorana zero modes in superconductor–semiconductor heterostructures / R. Lutchyn [и др.] // *Nature Reviews Materials.* — 2018. — С. 1.
26. Milestones toward Majorana-based quantum computing / D. Aasen [и др.] // *Physical Review X.* — 2016. — Т. 6, № 3. — С. 031016. — URL: <https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.6.031016>.
27. Extremely Strong Dependence of Superconductivity on Disorder in Sr_2RuO_4 / A. P. Mackenzie [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 1998. — Янв. — Т. 80, вып. 1. — С. 161—164.
28. Spin-triplet superconductivity in Sr_2RuO_4 identified by ^{17}O Knight shift / K. Ishida [и др.] // *Nature.* — 1998. — Т. 396, № 6712. — С. 658.
29. Time-reversal symmetry-breaking superconductivity in Sr_2RuO_4 / G. M. Luke [и др.] // *Nature.* — 1998. — Т. 394, № 6693. — С. 558.
30. High resolution polar Kerr effect measurements of Sr_2RuO_4 : Evidence for broken time-reversal symmetry in the superconducting state / J. Xia [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Т. 97, № 16. — С. 167002.
31. Polar Kerr effect as probe for time-reversal symmetry breaking in unconventional superconductors / A. Kapitulnik [и др.] // *New Journal of Physics.* — 2009. — Т. 11, № 5. — С. 055060.

32. *Stone M., Rahul R.* Edge modes, edge currents, and gauge invariance in $p_x + ip_y$ superfluids and superconductors // *Phys. Rev. B.* — 2004. — Т. 69. — С. 184511.
33. *Sauls J. A.* Surface states, edge currents, and the angular momentum of chiral p -wave superfluids // *Phys. Rev. B.* — 2011. — Дек. — Т. 84, вып. 21. — С. 214509.
34. Upper limit on spontaneous supercurrents in Sr_2RuO_4 / J. Kirtley [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2007. — Т. 76, № 1. — С. 014526.
35. Scanning magnetic imaging of Sr_2RuO_4 / P. G. Björnsson [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2005. — Т. 72, № 1. — С. 012504.
36. Limits on superconductivity-related magnetization in Sr_2RuO_4 and $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ from scanning SQUID microscopy / C. W. Hicks [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2010. — Т. 81, № 21. — С. 214501.
37. Observation of half-height magnetization steps in Sr_2RuO_4 / J. Jang [и др.] // *Science.* — 2011. — Т. 331, № 6014. — С. 186—188.
38. Suppression of spontaneous currents in Sr_2RuO_4 by surface disorder / S. Lederer [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2014. — Окт. — Т. 90, вып. 13. — С. 134521.
39. Nontopological nature of the edge current in a chiral p -wave superconductor / W. Huang [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2015. — Март. — Т. 91, вып. 9. — С. 094507.
40. Observability of surface currents in p -wave superconductors / S. V. Bakurskiy [и др.] // *Superconductor Science and Technology.* — 2017. — Т. 30, № 4. — С. 044005.
41. *Scaffidi T., Simon S. H.* Large Chern Number and Edge Currents in Sr_2RuO_4 // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Авг. — Т. 115, вып. 8. — С. 087003.

42. *Huang W., Taylor E., Kallin C.* Vanishing edge currents in non- p -wave topological chiral superconductors // *Phys. Rev. B.* — 2014. — Дек. — Т. 90, вып. 22. — С. 224519.
43. *Tada Y., Nie W., Oshikawa M.* Orbital Angular Momentum and Spectral Flow in Two-Dimensional Chiral Superfluids // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Май. — Т. 114, вып. 19. — С. 195301.
44. *Volovik G. E.* Orbital momentum of chiral superfluids and the spectral asymmetry of edge states // *Письма в ЖЭТФ.* — 2014. — Т. 100, № 11. — С. 843.
45. K. D. Nelson [и др.] // *Science.* — 2004. — Т. 306. — С. 1151.
46. *Sapozhnikov M.* Skyrmion lattice in a magnetic film with spatially modulated material parameters // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* — 2015. — Т. 396. — С. 338—344.
47. Artificial dense lattice of magnetic bubbles / M. Sapozhnikov [и др.] // *Applied Physics Letters.* — 2016. — Т. 109, № 4. — С. 042406.
48. *Sapozhnikov M., Ermolaeva O.* Two-dimensional skyrmion lattice in a nanopatterned magnetic film // *Phys. Rev. B.* — 2015. — Т. 91, № 2. — С. 024418.
49. M. V. Sapozhnikov [и др.] // *Pis'ma v ZhETF.* — 2018. — Т. 107, № 6. — С. 378—382.
50. *Bogdanov A., Hubert A.* Thermodynamically stable magnetic vortex states in magnetic crystals // *Journal of magnetism and magnetic materials.* — 1994. — Т. 138, № 3. — С. 255—269.
51. Skyrmion lattice in a chiral magnet / S. Mühlbauer [и др.] // *Science.* — 2009. — Т. 323, № 5916. — С. 915—919.
52. Real-space observation of a two-dimensional skyrmion crystal / X. Yu [и др.] // *Nature.* — 2010. — Т. 465, № 7300. — С. 901—904.

53. Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions / S. Heinze [и др.] // *Nature Physics*. — 2011. — Т. 7, № 9. — С. 713—718.
54. *Rößler U., Bogdanov A., Pfleiderer C.* Spontaneous skyrmion ground states in magnetic metals // *Nature*. — 2006. — Т. 442, № 7104. — С. 797—801.
55. *Volkov A. F., Kogan S. M.* Collisionless relaxation of energy-gap in superconductors // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* — 1973. — Т. 65. — С. 2038.
56. *Barankov R., Levitov L., Spivak B.* Collective Rabi Oscillations and Solitons in a Time-Dependent BCS Pairing Problem // *Phys. Rev. Lett.* — 2004. — Ноябрь. — Т. 93. — С. 160401.
57. *Yuzbashyan E. A., Tsypliyatyev O., Altshuler B. L.* Relaxation and Persistent Oscillations of the Order Parameter in Fermionic Condensates // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Март. — Т. 96, вып. 9. — С. 097005.
58. *Yuzbashyan E. A., Tsypliyatyev O., Altshuler B. L.* Erratum: Relaxation and Persistent Oscillations of the Order Parameter in Fermionic Condensates [Phys. Rev. Lett. **96**, 097005 (2006)] // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Т. 96. — С. 179905. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.179905. — URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.96.179905>.
59. *Yuzbashyan E. A., Kuznetsov V. B., Altshuler B. L.* Integrable dynamics of coupled Fermi-Bose condensates // *Phys. Rev. B*. — 2005. — Октябрь. — Т. 72, вып. 14. — С. 144524.
60. *Yuzbashyan E. A., Dzero M.* Dynamical Vanishing of the Order Parameter in a Fermionic Condensate // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Июнь. — Т. 96, вып. 23. — С. 230404.
61. *Higgs P. W.* Broken symmetries and the masses of gauge bosons // *Phys. Rev. Lett.* — 1964. — Т. 13, № 16. — С. 508.
62. Amplitude Higgs mode in the $2H - \text{NbSe}_2$ superconductor / M.-A. Méasson [и др.] // *Phys. Rev. B*. — 2014. — Февр. — Т. 89, вып. 6. — С. 060503.

63. *Sooryakumar R., Klein M. V.* Raman Scattering by Superconducting-Gap Excitations and Their Coupling to Charge-Density Waves // *Phys. Rev. Lett.* — 1980. — Август. — Т. 45, вып. 8. — С. 660—662.
64. Higgs Amplitude Mode in the BCS Superconductors $\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x\text{N}$ Induced by Terahertz Pulse Excitation / R. Matsunaga [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2013. — Июль. — Т. 111, вып. 5. — С. 057002.
65. Light-induced collective pseudospin precession resonating with Higgs mode in a superconductor / R. Matsunaga [и др.] // *Science*. — 2014. — Т. 345, № 6201. — С. 1145—1149. — ISSN 0036-8075.
66. *Silaev M.* Nonlinear electromagnetic response and Higgs mode excitation in BCS superconductors with impurities // arXiv preprint arXiv:1902.01666. — 2019.
67. *Moor A., Volkov A. F., Efetov K. B.* Amplitude Higgs mode and admittance in superconductors with a moving condensate // *Physical review letters*. — 2017. — Т. 118, № 4. — С. 047001. — URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.118.047001>.
68. *Caroli C., Gennes P. G. de, Matricon J.* // *Phys. Lett.* — 1964. — Т. 9. — С. 307.