

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Самохвалова Алексея Владимировича  
“Неоднородные состояния и интерференционные явления в гибридных  
сверхпроводящих системах”,  
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности – 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

### Актуальность темы.

Большой интерес к гибридным сверхпроводящим системам, возникший в последнее десятилетие, связан с бурным развитием тонкопленочных нанотехнологий и перспективами применения низкоразмерных структур на основе сверхпроводников, нормальных металлов и ферромагнетиков в устройствах сверхпроводящей электроники и спинтроники. Кроме того, гибридные структуры сверхпроводник-ферромагнетик (SF), в которых ярко проявляется взаимодействие антагонистических сверхпроводящего и ферромагнитного спиновых упорядочений, являются уникальными объектами научных исследований, обеспечившими недавно наблюдение таких новых фундаментальных явлений, как инвертирование сверхпроводящей фазы и спина, возникновение спин-триплетной сверхпроводящей компоненты и др. Обсуждаемая диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию тонкопленочных, слоистых и гибридных сверхпроводящих структур, которые находятся под действием магнитного или обменного полей, приводящих к орбитальному или обменному (парамагнитному) подавлению сверхпроводимости, возникновению неоднородных и спин-триплетных сверхпроводящих состояний, а также к появлению необычных вихревых структур. Тема диссертации А.В. Самохвалова несомненно актуальна, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Диссертация состоит из Введения, пяти оригинальных глав с приложениями и Заключения. Она основана на 22 работах, опубликованных в ведущих российских и международных научных журналах. Во Введении дан общий анализ актуальности темы диссертации, определены цели и теоретические методы исследований, обоснована их научная новизна, а также достоверность и практическая значимость полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена теоретическому анализу взаимодействия абрикосовских вихрей в тонкопленочных слоистых сверхпроводниках в наклонном магнитном поле. В таких системах наряду с обычным (близкодействующим) отталкиванием вихрей одного знака существует и их притяжение, имеющее дальнедействующую "магнито-дипольную" природу. Главным нововведением в проведенном анализе является учет еще одного взаимодействия: дальнедействующего "пирловского" отталкивания вихрей, связанного с магнитными полями рассеяния вне сверхпроводящей пленки. Расчеты равновесной формы вихревых нитей и потенциалов межвихревого взаимодействия, выполненные в рамках модели Лондонов (Раздел 1.1 диссертации), показали, что конкуренция этих двух дальнедействующих взаимодействий приводит к образованию вихревых цепочек и кластеров конечного размера ("вихревых молекул"), а также многоквантовых вихревых решеток. В диссертационной работе (Раздел 1.2) рассчитаны зависимости энергии связи и размеров вихревых молекул от толщины сверхпроводящей пленки и угла наклона вихрей (магнитного поля) в слоистых сильно анизотропных сверхпроводниках. Определены условия, при которых более выгодной становится многоквантовая вихревая решетка, с числом квантов магнитного потока (вихрей) на элементарную ячейку более одного.

Такое описание полностью согласуется с экспериментами по лоренцевской микроскопии на тонких сверхпроводящих пленках анизотропных высокотемпературных сверхпроводников (YBCO), в которых обнаружено существование пороговых значений углов наклона магнитного поля, выше которых наблюдается образование длинных цепочек вихрей, обусловленное их сильным притяжением. Проведенные теоретические исследования показали, что образование вихревых кластеров и многоквантовых вихревых решеток возможно также в квазидвумерных высокотемпературных сверхпроводниках (типа BSCCO), помещенных в наклонное магнитное поле, в которых вихревая система состоит из чередующихся плоских (2D) вихрей Пирла, переносящих поперечное к слоям магнитное поле, и джозефсоновских вихрей, переносящих продольную компоненту поля (Раздел 1.3). В качестве приложения к первой главе приводятся подробные расчеты энергии взаимодействия вихрей.

Во второй главе диссертации рассмотрен важный для экспериментальных исследований и практических применений вопрос об электронной структуре вихря и его депиннинге при закреплении (пиннинге) на колумнарной (колончатой) неоднородности. Искусственные протяженные колончатые дефекты специально создаются в пленках высокотемпературных сверхпроводников литографически или путем облучения высокоэнергетическими ионами для создания пиннинга магнитного потока, направленного вдоль дефектов. Особенно сильный пиннинг возникает при характерном диаметре  $R$  таких несверхпроводящих пор, сравнимым с длиной когерентности  $\xi_0$  в сверхпроводнике. Однако, до последнего времени не существовало последовательной микроскопической теории, необходимой в случае  $R \leq \xi_0$  (особенно при температурах значительно ниже критической температуры  $T_c$ ). Для последовательного учета микроскопических эффектов на основе квазиклассических уравнений Андреева была рассчитана электронная структура одноквантового и многоквантового вихря, закрепленного цилиндрической полостью с радиусом  $R \leq \xi_0$  (Раздел 2.1). Показано, что присутствие диэлектрической области в нормальном коре вихря приводит к сильным изменениям известного спектра подщелевых состояний в коре, вычисленных в теории Кароли-де Жена-Матрикона. В частности, вблизи уровня Ферми в квазичастичном спектре возникает минищель, увеличивающаяся и приближающаяся к энергетической щели сверхпроводника по мере приближения  $R$  к  $\xi_0$ . Важным следствием полученной особенности спектра, обсуждаемым в Разделе 2.3, является то, что при срыве вихря с центра пиннинга происходит топологический электронный переход с изменением спектра от щелевого к бесщелевому, что обеспечивается рождением пары вихрь-антивихрь и "ландау-зинеровским" туннелированием квазичастиц. Поскольку описанные изменения спектра квазичастиц в коре вихря, закрепленного на диэлектрическом колумнарном дефекте, могут быть надежно обнаружены с помощью исследования локальной плотности электронных состояний и локальной проводимости с помощью сканирующего туннельного микроскопа, в Разделе 2.2 вычислены зависимости локальной дифференциальной проводимости от напряжения и расстояния от центра кора вихря. В качестве приложения ко второй главе приведен расчет спектра подщелевых квазичастичных состояний для малых значений прицельного параметра квазичастиц, налетающих на кор вихря.

Третья глава диссертации связана с исследованиями неоднородных сверхпроводящих состояний (состояний типа Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррела - ЛОФФ) в структурах с непосредственным контактом сверхпроводника (S) и ферромагнетика (F). Для описания SF структур в диффузном пределе использовались уравнения Узаделя, представленные в Разделе 3.1. Особый интерес представляет

исследование неоднородных состояний в неодносвязных структурах, где наблюдается одновременное влияние орбитального и парамагнитного (обменного) эффектов распаривания (Раздел 3.2). Изучены особенности осцилляций Литтла-Паркса в цилиндрических SF структурах с эффектом близости, представляющих собой тонкостенный сверхпроводящий цилиндр с ферромагнитным заполнением или сверхпроводящее кольцо на ферромагнитной пластине. Показано, что близость ферромагнетика существенно модифицирует поведение тонкостенного сверхпроводящего цилиндра (кольца), описанное Литтлом и Парксом. Знакопеременные пространственные осцилляции наведенного сверхпроводящего параметра порядка поперек ферромагнитного цилиндра могут приводить к спонтанным незатухающим токам (ненулевому орбитальному моменту) в сверхпроводящем цилиндрическом покрытии даже в отсутствие внешнего приложенного магнитного поля. Интересным новым результатом являются предсказанные осциллирующие зависимости критической температуры  $T_c$  таких систем от радиуса ферромагнитного цилиндра. В магнитном поле  $H$  вдоль оси цилиндра близость ферромагнетика приводит к нарушению известной периодичности зависимости осцилляций Литтла-Паркса  $T_c(H)$ . Отдельный подраздел диссертации посвящен реальным оценкам и экспериментальным условиям наблюдения предсказанного эффекта. В Разделе 3.3 анализируются свойства структур со сверхпроводящими наночастицами в ферромагнетике. Рассчитан джозефсоновский ток и условия переходов с инверсией сверхпроводящей фазы ( $0-\pi$  переходов) в структурах, представляющих собой два сверхпроводящих наноцилиндра в ферромагнитной среде и сверхпроводящую наночастицу на поверхности FS-бислоя. Обнаружены осцилляции критического тока как от расстояния между S-электродами, так и от температуры. В следующем разделе (3.4) анализировался очень интересный и слабо исследованный ранее вопрос о термодинамике  $0-\pi$  переходов в SFS структурах. Изучалась SFS структура с тонкими ( $d_s \sim \xi_s$ ) S-электродами при изменении температуры. Показано что температурный  $0-\pi$  переход является фазовым переходом первого рода. Вычислены скачки энтропии и скрытая теплота при таком фазовом переходе. Показано также, что  $0-\pi$  переход проявляется в резком изменении глубины проникновения магнитного поля, что уже наблюдалось экспериментально. Последний раздел (3.5) третьей главы посвящен неоднородным ЛОФФ состояниям и квантовым осцилляциям критической температуры в двумерном (2D) сверхпроводнике и сверхтекучем Ферми-газе, соответственно, в присутствии магнитного поля и радиочастотного возбуждения. Для теоретического анализа в этом разделе используется модифицированный функционал Гинзбурга-Ландау, учитывающий изменение знака коэффициента при градиентном члене второго порядка в соответствующем разложении выражения для свободной энергии при сильном парамагнитном возмущении. Показано, что в тонком сверхпроводящем диске продольное магнитное поле приводит к пространственным модуляциям параметра порядка. Добавление перпендикулярной к поверхности диска компоненты магнитного поля  $H_z$ , в принципе, приводит к квантовым осцилляциям критической температуры, связанным с переходами между состояниями с различной завихренностью. Однако, как показано в диссертации, размерные эффекты в мезоскопических дисках подавляют осцилляции  $T_c(H_z)$  перехода сверхпроводника из нормального состояния в ЛОФФ состояния с различной завихренностью. Подобная ситуация имеет место и в системах со сверхтекучим Ферми-газом, при этом роль поперечного поля выполняет вращение конденсата. В качестве приложения к третьей главе приведен расчет джозефсоновского тока в системе сверхпроводящая наночастица - FS-бислой.

В четвертой главе изучается влияние на джозефсоновскую разность фаз ферромагнитных частиц, осажденных поверх одного из электродов джозефсоновского перехода. В первом разделе рассмотрен торцевой джозефсоновский контакт, на один из сверхпроводящих берегов которого помещена периодическая цепочка магнитных диполей, создающих периодическое поле и модуляцию разности фаз в контакте. На основе развитой модели рассчитана зависимость критического тока  $I_c$  такой системы от внешнего магнитного поля  $H$ , которая соответствует пиннингу джозефсоновских вихрей на неоднородностях магнитного поля, создаваемых цепочкой диполей. Показано, что при соизмеримости длины, проникающих в переход джозефсоновских вихрей, и периода цепочки магнитных диполей на зависимости  $I_c(H)$  возникают дополнительные пики, соответствующие резкому увеличению критического тока. В следующем разделе (4.2) предложен другой способ изменения разности фаз в джозефсоновском переходе с помощью ферромагнитной (однодоменной) частицы. Рассматривается случай (чаще реализуемый экспериментально) перехода в виде нахлеста ("overlap") двух сверхпроводящих слоев, поверх одного из которых нанесена однодоменная ферромагнитная частица, поле которой создает абрикосовскую пару вихрь-антивихрь в верхнем тонком сверхпроводящем слое по разные стороны от частицы. Поскольку поле вихрей не "пробивает" толстый нижний сверхпроводящий электрод перехода, вихрь и антивихрь вносят существенное изменение (сдвиг  $\phi_0$ ) в разность фаз на переходе. Получены выражения для распределения разности фаз и зависимости  $I_c(H)$  для разных размеров ферромагнитной частицы и различного ее расположения над переходом (которые определяют размер и расположение пары вихрь-антивихрь). Предсказана возможность возникновения состояния с инверсией разности фаз ( $\pi$ -контакта) в такой структуре. Исследование эффектов соизмеримости продолжено в Разделе 4.3 для квадратной периодической решетки ферромагнитных частиц, нанесенных на верхний электрод перехода типа overlap. Вычислено распределение разности фаз в переходе, связанное с проникновением в верхний сверхпроводящий электрод пар вихрь-антивихрь от каждой частицы решетки, выполнены численные расчеты зависимости критического тока такой структуры от внешнего магнитного поля. Показано, что полученная полевая зависимость критического тока существенно отличается от обычной («фраунгоферовской») зависимости  $I_c(H)$  джозефсоновского перехода в связи с возникновением пиков соизмеримости, которые качественно аналогичны тем, что были получены в Разделе 4.1 для торцевого контакта и линейной цепочки ферромагнитных частиц. Последний раздел главы посвящен обсуждению экспериментальных результатов, полученных на SIS и SNS переходах, в которых принимал участие автор диссертации. Наблюдаемые явления соизмеримости в джозефсоновских структурах с решеткой ферромагнитных частиц хорошо подтверждают теоретические выводы.

Последняя глава диссертации посвящена актуальной проблеме реализации дальнего действия эффекта близости в системах ферромагнетик – сверхпроводник. Предложен новый интерференционный механизм дальнего действия, обусловленный обычной синглетной куперовской парой (без участия спин-триплетной сверхпроводящей компоненты с одинаковым направлением проекций спина частиц). Показано, что создаваемую обменным полем ферромагнетика деструктивную интерференцию между налетающей электронной волной и отраженной когерентной дыркой можно существенно уменьшить путем изменения знака обменного поля вдоль соответствующей квазиклассической траектории или путем рассеяния с переворотом спина посередине такой траектории. Для теоретического анализа баллистических гибридных SFS структур использовались линеаризованные уравнения Эйленберга, представленные в Разделе 5.1. Было показано, что сдвиг фаз между электронной и

дырочной частями сверхпроводящей волновой функции в ферромагнетике определяется синглетной частью аномальной квазиклассической функции Грина. Во втором разделе главы рассмотрен случай прохождения парами ферромагнитного бислоя с произвольной разориентацией намагниченностей. На основании решения уравнений Эйленберга получены выражения для первой и второй Фурье-компонент ток-фазового соотношения для джозефсоновского перехода с двухслойным ферромагнитным барьером. При равенстве толщин ферромагнитных слоев  $F_1$  и  $F_2$  в бислое в таком баллистическом джозефсоновском  $S-F_1/F_2-S$  переходе должен наблюдаться заметный «дальнодействующий» критический ток, резко возрастающий от нуля до максимума при увеличении разворота намагниченностей в  $F_1$  и  $F_2$  слоях от нуля до  $\pi$ . Более того, вторая Фурье-компонента может «выживать» в  $S-F_1/F_2-S$  переходе на длинах заметно больших «ферромагнитной» длины когерентности даже при различных толщинах слоев  $F_1$  и  $F_2$ . В Разделе 5.3 рассмотрен еще один механизм компенсации сдвига фаз между электронной и дырочной частями волновой функции, приводящего к деструктивной интерференции. Поскольку в тонкопленочном однодоменном ферромагнетике со спин-орбитальным взаимодействием обменное поле изменяет свой знак при изменении направления квазиимпульса, последовательные зеркальные отражения от границ такой баллистической тонкой пленки обеспечивают компенсацию сдвига фаз и дальнодействующий эффект близости в SFS контакте с однородной намагниченностью F-барьера. Механизм подавления деструктивной интерференции с помощью рассеяния с переворотом спина посередине тонкопленочного F-барьера рассмотрен в последнем разделе (5.4) главы. Формирование локальной неоднородности обменного поля, обеспечивающей spin-flip рассеяние, предложено делать с помощью зонда сканирующего микроскопа магнитных сил (ферромагнитного острья). За счет изменения спиновой структуры синглетной сверхпроводящей пары на противоположную точно в центре F-барьера, сдвиг фаз между электронной и дырочной частями изменяет знак, компенсируя деструктивный набег, возникший на первой половине F-барьера. В качестве приложения к пятой главе диссертации описано использование трансфер-матрицы для уравнений Эйленберга и получение блоховских решений для ферромагнитного барьера с неоднородным, периодически меняющимся обменным полем.

#### Научная новизна и достоверность.

В качестве новых научных результатов, полученных в диссертации, можно выделить следующие:

- показана возможность образования вихревых цепочек и кластеров конечного размера ("вихревых молекул") и многоквантовых вихревых решеток в тонких пленках слоистого сверхпроводника;

- показано, что присутствие диэлектрической области (дефекта) в нормальном коре вихря Абрикосова приводит к возникновению минищели вблизи уровня Ферми в спектре квазичастиц. Величина минищели растет с увеличением размера дефекта, приближаясь к сверхпроводящей щели, а срыв вихря с подобного центра пиннинга сопровождается топологическим электронным переходом, изменяющим спектр от щелевого к бесщелевому;

- предсказано резкое изменение глубины проникновения магнитного поля при температурном  $0-\pi$  переходе гибридной SFS структуры с тонкими S-электродами, что уже наблюдалось экспериментально.

- развита теория джозефсоновского транспорта в переходах, находящихся в неоднородном поле однодоменных ферромагнитных частиц, создающих мелкомасштабную модуляцию джозефсоновской разности фаз;

- предложены новые механизмы дальнедействующего когерентного транспорта в баллистических джозефсоновских структурах с ферромагнитным барьером.

Достоверность полученных в работе теоретических результатов подтверждается сопоставлением их с экспериментальными данными, хорошим совпадением аналитических и численных расчетов, согласием с результатами других авторов и публикацией этих результатов в журналах с высоким рейтингом.

Большим достоинством обсуждаемой работы является высокий уровень теоретических исследований, применение целого ряда различных моделей и теоретических подходов для различных исследованных систем и проблем. Вместе с тем, экспериментаторов, изучающих работу (к которым относится оппонент) должна привлекать конкретная направленность большинства поставленных и исследованных в диссертации проблем на возможность экспериментального наблюдения предсказанных эффектов. В этом смысле следует отметить также последовательность и четкость изложения постановок задач и результатов, чередование подробных теоретических выкладок и качественных обсуждений и пояснений на ясном физическом языке.

#### Замечания и вопросы.

В качестве замечаний можно отметить следующие моменты.

1. В Главе 2 получены интересные, в принципе, практически важные результаты для индивидуального пиннинга вихрей на цилиндрических непроводящих дефектах с размерами меньшими длины когерентности. С практической точки зрения было бы важно довести эти результаты до объемного пиннинга вихревой жидкости и критического тока пиннинга таких объектов. Подобное замечание касается и результатов Раздела 3.3.1, где, фактически, представлен расчет критического тока и переход с инверсией фазы только для двух сверхпроводящих гранул в ферромагнитной матрице. Для проведения экспериментов более важными являются результаты для массива гранул (например, полученного в расплаве) или для периодической решетки сверхпроводящих островков, находящихся в непосредственном контакте с пленкой слабого ферромагнетика. Обсуждение проблемы для массива частиц лишь слегка намечено в выводах. Надо отметить, что сам автор, начиная с постановки задачи о влиянии формы отдельных гранул на  $0-\pi$ -переход (которое оказалось несущественным), в выводах делает акцент именно на массивах сверхпроводящих частиц в ферромагнетике.
2. В Разделе 3.4 представлены очень интересные результаты по термодинамике  $0-\pi$ -перехода в отдельной SFS-структуре. Поскольку “визитной карточкой”  $0-\pi$ -перехода является, как известно, возникновение спонтанного магнитного потока в кольце с SFS контактом, было бы очень полезным рассмотреть термодинамику  $0-\pi$ -перехода с учетом индуктивной энергии, возникающей в кольце, особенно в случае, когда эта энергия сравнима с разностью энергий  $0$ - и  $\pi$ - состояний.
3. Не вполне удачным представляется название Главы 4: “Свойства джозефсоновских переходов в гибридных системах с магнитной связью”. Ферромагнитные частицы здесь являются источниками магнитного возмущения, а слово “связь”, скорее ассоциируется с джозефсоновским барьером.
4. В Главе 5 предложено несколько новых механизмов реализации дальнедействующего эффекта близости в SFS структурах. Поскольку экспериментальная реализация механизмов, связанных с «выживанием» первой Фурье-компоненты ток-фазового соотношения представляется более чем проблематичной, следовало бы большее внимание уделить второй Фурье-

компоненте. Обсудить физическую картину причины «выживания» четных компонент, сделать оценки их амплитуд, пригодные для реальных экспериментов.

Сделанные замечания имеют характер пожеланий или относятся к форме представления материала и не снижают общей высокой оценки работы.

Заключение.

Диссертация выполнена и изложена на самом высоком уровне, она является цельным и законченным исследованием. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений. Выводы и заключения, сделанные автором, обоснованны. Диссертация вносит существенный вклад в исследование когерентного транспорта и неоднородных состояний в гибридных сверхпроводящих системах. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН г. Черноголовка, ИПТМ РАН г.Черноголовка, МГУ г. Москва, ИРЭ РАН, г.Москва, ФТИ РАН г. Санкт-Петербург. Практическая значимость работы связана с возможностью использования полученных результатов и разработанных методов для расчета характеристик структур при разработке устройств сверхпроводящей электроники и спинтроники. Автореферат и опубликованные работы подробно и правильно отражают содержание диссертации. Представленные результаты своевременно опубликованы в ведущих физических журналах, докладывались на престижных международных семинарах и конференциях.

В целом, диссертационная работа вполне соответствует критериям, установленным Положением "О порядке присуждения ученых степеней" к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а её автор – Самохвалов Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07- Физика конденсированного состояния.

01.06.15

Официальный оппонент

Валерий Владимирович Рязанов

Зав. лаб. сверхпроводимости,  
Институт физики твердого тела РАН,  
д. ф.-м. н., профессор

адрес: 142432 Черноголовка, Московская область,  
ул. Центральная д.20, кв. 83  
тел. 8 496 522 25 74  
e-mail: ryazanov@issp.ac.ru

Подпись Рязанова удостоверено  
Ученый секретарь ИФТТ РАН  
Г.Е.Абросимова

