



О Т З Ы В

ведущей организации
на диссертацию Я.В. Фомина «Взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма и особенности нечётных по частоте сверхпроводящих состояний», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Большой интерес к гибридным структурам с ферромагнитными, нормально-металлическими и сверхпроводящими слоями связан в настоящее время, прежде всего, с началом активного практического использования магниторезистивных явлений в элементах памяти и считывающих устройствах современной вычислительной техники. Открытие эффекта гигантского магнетосопротивления в многослойных F/N системах (F-ферромагнетик, N - нормальный металл) было удостоено Нобелевской премии по физике 2007 г. В последние годы активно исследуются также многослойные системы со сверхпроводниками (гибридные SF структуры), использующие особенности сосуществование ферромагнетизма и сверхпроводимости. В таких структурах были теоретически предсказаны и экспериментально наблюдались эффекты «спинового клапана», инверсии сверхпроводящей фазы (π -состояние) и др., открывающие новые области научных исследований и практических применений. Особый фундаментальный интерес представляют триплетные и другие «нечетные по частоте» сверхпроводящие состояния, обнаруженные в гибридных сверхпроводящих системах. Диссертация Я.В. Фомина посвящена теоретическому изучению эффектов близости, транспортных и когерентных процессов в неоднородных и гибридных структурах на основе сверхпроводников, нормальных металлов и ферромагнетиков, построению классификации сверхпроводящих состояний в таких системах с учетом нечетных по частоте состояний. Тема представленной диссертации, несомненно, актуальна, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Диссертация состоит из Введения, четырех оригинальных глав, четырех приложений и Заключения, она основана на 20 работах, опубликованных в ведущих международных научных журналах, которые включены в перечень ВАК. Во Введении представлен краткий анализ направлений и актуальности исследований гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик (SF-структур), определены цели и методы выполненных в диссертации исследований, а также их научная и практическая значимость; перечислены положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

Первая глава диссертации посвящена теоретическому анализу особенностей нечетных по частоте сверхпроводящих состояний в различных гибридных структурах и нетривиальных сверхпроводниках. В первом разделе этой главы исследуется возникновение дальнедействующей спин-триплетной компоненты (ДТК) в SF и SFS

слоистых системах, в которых ферромагнетик содержит неелевские доменные стенки. Связанная с доменными стенками неоднородность ферромагнетика обеспечивает возможность существования ДТК в таких структурах. Подобная задача рассматривалась ранее теоретически Эшригом и др. для случая спиральной магнитной структуры неелевского типа, и ДТК не была обнаружена. В работе диссертанта рассматривался более стандартный случай тонкопленочной джозефсоновской SFS структуры с неелевской стенкой, граничащей с доменом в ферромагнитном слое. Для вычисления джозефсоновского критического тока через тонкопленочный SFS переход использовались уравнения Узаделя. Была введена новая матричная функция Грина, использование которой делает уравнения Узаделя более симметричными по отношению к вращению обменного поля. Джозефсоновский сверхток вычислен для случая, когда короткие (синглетная и триплетная) сверхпроводящие компоненты экспоненциально затухают на толщине F-слоя и весь ток переносится ДТК. Он делится поровну между областями с постоянной (домен) и вращающейся (неелевская стенка) намагниченностью, при этом SFS переход находится в состоянии с инверсной разностью фаз (π -состоянии). Набег фазы π обеспечивается $\pi/2$ -сдвигами на SF-границах раздела. Получены аналитические выражения в пределе тонкого F-слоя (по сравнению с характерным размером вращения намагниченности в доменной стенке и «температурной» длиной когерентности). Получены также результаты для случая многодоменного F-слоя. Модуль плотности джозефсоновского тока максимален на границах между доменами и доменными стенками, то есть сверхток переносится, в основном, вдоль этих границ. Рассмотрены оба случая относительного направления вращения намагниченностей в соседних доменных стенках. Модуль джозефсоновского тока, обусловленного ДТК, больше в случае разного направления вращения, т.к. он соответствует более неоднородной намагниченности, обеспечивающей возникновение ДТК. Показано также, что измерение плотности состояний на свободной поверхности F-слоя в SF-бислое может дать информацию о наличии спин-триплетной (нечетной по частоте) сверхпроводимости, т.к. пространственное (вдоль поверхности F-слоя) распределение плотности состояний в этом случае существенно отличается от распределения наведенной синглетной сверхпроводящей компоненты.

Второй раздел первой главы посвящен дифференциальной проводимости NS-контакта между нормально-металлической проволокой и сверхпроводником в нечетном по частоте состоянии. В качестве индикатора такого s-волнового триплетного состояния предложено использовать андреевское отражение на NS-границе раздела, поскольку оно связывает квазичастицы с положительной и отрицательной энергией и чувствительно к частотной симметрии. В расчетах использовалась аномальная функция Грина, нечетная по мацубаровской частоте. Было показано, что при малых энергиях андреевское отражение отсутствует, и проводимость определяется только квазичастичным вкладом. Даже в туннельном пределе (низкой прозрачности NS-границы раздела) проводимость всей структуры оказывалась выше, чем в нормальном состоянии. В другом предельном случае прозрачной NS-границы раздела проводимость монотонно убывает, начиная с самых малых энергий. Такое необычное поведение проводимости NS-контактов может быть использовано для экспериментального обнаружения нечетной по частоте сверхпроводимости, например, при исследованиях с помощью сканирующего туннельного микроскопа.

В третьем разделе первой главы обсуждается «расширенная» классификация сверхпроводящих состояний с учётом обсуждаемых в литературе нечётных по частоте корреляций с двумя различными типами мейсснеровского отклика (диамагнитного и парамагнитного). Известно, что в наведенном нечётном по частоте сверхпроводящем состоянии (например, в неоднородном F-слое FS-системы) отклик на внешнее поле парамагнитен, в то время, как в самом сверхпроводнике (S) – диамагнитен. В обсуждаемом разделе диссертации рассмотрены физические следствия предположения о

возможности реализации нечётного по частоте состояния с диамагнитным откликом. Показано, что сверхпроводящие корреляции, в целом, можно разбить на 8 классов и объединить попарно. В реальных сверхпроводящих системах наблюдались i) четные по частоте объемные синглетные состояния с диамагнитным откликом, реализующиеся в металлических сверхпроводниках и высокотемпературных купратах, и нечетные по частоте синглетные сверхпроводящие состояния с парамагнитным откликом, наведенные в гибридных структурах с такими сверхпроводниками, а также ii) объемные четные триплетные состояния с диамагнитным откликом, реализующиеся в Sr_2RuO_4 и UPt_3 , и нечетные по частоте триплетные сверхпроводящие состояния с парамагнитным откликом, наведенные в гибридных структурах с этими сверхпроводниками. Нарушение спиновой симметрии перемешивает между собой состояния (i) и (ii). Частотная симметрия, пространственная чётность и тип магнитного отклика наведенных корреляций оказываются противоположными аналогичным характеристикам в объёме. Этот вывод остаётся справедливым и при обобщении на случай недавно предложенных диамагнитных нечётных по частоте однородных сверхпроводников. С учётом возможности нарушения трансляционной инвариантности и спиновой симметрии восемь типов состояний делятся на две несмешивающиеся группы, причём нечётные по частоте состояния с диамагнитным и парамагнитным откликом относятся к разным группам. Нечетный по частоте спаривания сверхпроводник с диамагнитным откликом был предложен для решения проблемы устойчивости объемного нечетного по частоте сверхпроводящего состояния с парамагнитным откликом. В диссертации детально анализируется сделанное ранее вычисление нового состояния и его сосуществование с нечетным по частоте парамагнитным состоянием, которое реализуется как наведенная сверхпроводящая компонента, например, в SF-структурах. Было показано, что возникающие мейснеровские токи имеют мнимые вклады и поэтому являются нефизическими. Дальнейший анализ показал также, что реализация такого состояния означает отсутствие гамильтонова описания системы на любом уровне (многочастичном и среднеполевым). Важным выводом этого раздела является утверждение, что из обсуждаемых восьми сверхпроводящих состояний физически могут реализовываться только указанные выше четыре состояния (i) и (ii). Таким образом, наведенные нечётные по частоте состояния, порождаемые однородными сверхпроводниками любой симметрии, всегда должны характеризоваться парамагнитным мейснеровским откликом.

В заключительном разделе первой главы приведены вычисления комплексной проводимости и поверхностного импеданса на диффузной поверхности сверхпроводника с киральной r -волновой симметрией параметра порядка и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Для вычислений динамического отклика нечетной по мацубаровской частоте сверхпроводящей компоненты на электромагнитное поле использован квазиклассический подход Эйленбергера-Ларкина-Овчинникова, в рамках которого самосогласованно найдена пространственная зависимость потенциала пар. Показано возникновение «подщелевой» зоны андреевских состояний, рассмотрен отклик на внешнее электромагнитное поле как на подщелевых, так и на надщелевых частотах. Получены выражения для комплексной проводимости и поверхностного импеданса. Показано, что низкочастотный микроволновый отклик проявляет аномальные особенности, в частности, высокие значения активной части (R) поверхностного импеданса из-за вклада низкоэнергетической подщелевой андреевской зоны, который возникает в связи с генерацией вблизи поверхности r -волнового сверхпроводника нечётных по частоте сверхпроводящих корреляций. Кроме того, поверхностные андреевские состояния приводят к аномальному соотношению $R > X$ между активной и реактивной частями поверхностного импеданса.

Вторая глава диссертации связана с важной практической проблемой реализации сверхпроводящих переключателей – SF-спиновых клапанов. Наиболее успешным в экспериментальном смысле оказался сверхпроводящий спиновый клапан S/F1/F2-типа, в

котором подавление сверхпроводимости в тонком сверхпроводящем слое (S) регулируется изменением направлений взаимной намагниченности внешних ферромагнитных слоев F1 и F2, расположенных с одной стороны от слоя S. Такие структуры рассчитаны в работе диссертанта при произвольном угле направлений взаимной намагниченности. Прежде всего, изучены традиционные случаи коллинеарной взаимной ориентации. Показано, что наряду с ранее предсказанным и наблюдаемым в экспериментах «обычным» эффектом сверхпроводящего спинового клапана, когда критическая температура T_c^{AP} для антипараллельных направлений намагниченностей в F-слоях выше, чем для параллельных (T_c^P), должен также наблюдаться (для больших толщин ближайшего к сверхпроводнику ферромагнитного слоя F1) и «обратный» эффект сверхпроводящего спинового клапана, когда $T_c^{AP} < T_c^P$. В диссертационной работе показано, что такая знакопеременная (осциллирующая) зависимость от толщины d_{F1} – результат интерференции сверхпроводящих волновых функций в этом слое, которая определяется фазой $k_d d_{F1}$, где k_d – волновой вектор, обратно-пропорциональный характерной длине затухания синглетной сверхпроводящей волновой функции в ферромагнетике. Однако, главным результатом этого раздела является теоретическое предсказание эффекта «триплетного спинового клапана», связанное с исследованием неколлинеарных ориентаций намагниченностей в F-слоях. Было показано, что критическая температура T_c^{Tr} при неколлинеарных ориентациях оказывается меньше, чем как T_c^{AP} , так и T_c^P за счет ухода сверхпроводящей ДТК из сверхпроводящего слоя в ферромагнитные и большего подавления сверхпроводимости. Экспериментальные подтверждения обратного и триплетного эффектов сверхпроводящего спинового клапана были вскоре обнаружены и обсуждались при участии диссертанта. Полученные экспериментальные результаты потребовали дальнейшего развития теории, которое вместе с анализом экспериментальных данных представлено в диссертации.

В следующем разделе второй главы рассматривается еще один интересный вариант сверхпроводящего спинового клапана, представляющего собой двухконтактный интерферометр (сквид), в котором в качестве джозефсоновских переходов выступают нормально-металлические (баллистические) рукава с полуметаллическими ферромагнитными вставками, играющими роль спиновых фильтров. Так как синглетная куперовская пара не может пройти через такой отдельный джозефсоновский переход, транспорт заряда происходит через расщеплённые пары, когда два электрона когерентно проходят по разным плечам сквида. В рамках формализма матриц рассеяния на основе использования уравнений Боголюбова-де Жена в пределе короткого контакта получено общее выражение для андреевских уровней в джозефсоновском переходе между двумя сверхпроводниками с учётом спин-зависящего рассеяния. Вычислен переносимый через эти уровни джозефсоновский ток в зависимости от угла между намагниченностями ферромагнитных вставок и внешнего магнитного потока через сквид. Показано, что в результате абсолютной спиновой фильтрации транспорт куперовских пар при антипараллельных намагниченностях полностью определяется процессами с расщеплением пар, при котором два электрона проходят через разные плечи интерферометра. Критический ток такого сквида может быть немонотонной функцией угла между параллельной и антипараллельной конфигурациями намагниченностей. Периодичность по магнитному потоку равна $2\Phi_0$, т.е. удвоена по сравнению с обычным сквидом и соответствует когерентному переносу через переходы отдельных электронов, а не пар. Ток-фазовое соотношение может менять свою амплитуду и форму, в частности, демонстрируя переход из 0- в π -состояние. Переход происходит через промежуточные состояния, в которых $I(\phi)$ составлена из 0- и π -сегментов с резкими скачками между ними.

В третьей главе диссертации рассматривается сосуществование сверхпроводимости и неоднородного или неупорядоченного магнетизма. В первом разделе изучается сверхпроводящая минищель в ферромагнетике в SF и SFS контактах со спиральной

намагниченностью ферромагнетика. Показано, что обменное поле эффективно усредняется из-за спиральности, и щель в плотности состояний в магнитной области сохраняется до значений много больших, чем в случае однородного обменного поля. Во втором разделе для диффузных систем, составленных из сверхпроводящих и нормальных (или ферромагнитных) областей с магнитным беспорядком развито описание слабого магнитного беспорядка с произвольной корреляционной длиной как рассеяния с переворотом спина. Показано, что такое локальное описание применимо на масштабах много больше корреляционной длины беспорядка. Показано также, что нет качественной разницы между эффективными интенсивностями в неупорядоченных и периодических магнитных структурах в пределе, когда характерные длины неоднородностей достаточно малы. В третьем разделе с помощью квазиклассического подхода исследована диссипация в диффузном сверхпроводнике со слабыми неборновскими магнитными примесями при произвольном соотношении между температурой, частотой и величиной подавления щели в случае, когда все три параметра малы по сравнению со щелью БКШ. Примесные состояния, возникающие при малых плотностях магнитных примесей, могут служить ловушками для неравновесных квазичастиц, уменьшая поглощение в некотором диапазоне низких частот электромагнитного поля. В рассмотренном пределе низких температур и малых частот в равновесии диссипация пропорциональна концентрации термически возбуждённых квазичастиц, поэтому экспоненциально подавлена из-за щелевого характера спектра. Однако, как показано в последнем разделе третьей главы, флуктуационные эффекты, обусловленные сильными магнитными примесями, могут приводить и к конечной плотности состояний внутри щели, найденной по теории среднего поля. В этом разделе представлена теория «хвостов» плотности состояний в диффузных сверхпроводниках с сильными магнитными примесями, подчиняющимися статистике Пуассона. В то время как по теории среднего поля все края спектра (включая края примесной зоны) являются резкими, инстантонный подход в технике репличной сигма-модели позволил найти размытие этих краёв и хвосты плотности состояний. Показано, что неоднородность концентрации магнитных примесей приводит к появлению подщелевых состояний за счёт двух механизмов: флуктуаций паразаразрушающего параметра (магнитный аналог мезоскопических флуктуаций) и флуктуаций параметра порядка.

В последней (четвертой) главе диссертации обсуждаются кулоновские эффекты в гранулированных сверхпроводниках в магнитном поле. Показано, что даже в режиме хорошей межгранульной проводимости может возникать сверхпроводящая диэлектрическая фаза, в которой при наличии локальной сверхпроводимости плёнка в целом является диэлектриком. В реальных системах чередование S и N гранул может возникать в результате разброса размеров гранул, который в свою очередь приводит к разбросу критических полей для них. Магнитное поле, близкое к среднему критическому полю отдельной гранулы, переводит порядка половины гранул в нормальное состояние, таким образом, создавая сетку S и N гранул, которая даже при хорошей межгранульной проводимости проявляет особенности, связанные с кулоновской блокадой. В диссертации представлена разработанная теория диэлектрического состояния в двумерном гранулированном сверхпроводнике с хорошей межгранульной проводимостью под действием магнитного поля в предположении шахматного порядка чередования сверхпроводящих и нормальных гранул. Исследовано влияние магнитного поля и кулоновского взаимодействия на эффект близости в контакте между сверхпроводником и гранулой из нормального металла в пределе хорошей проводимости границы. Показано, что возможны три фазы нормальной гранулы: сильное и слабое сверхпроводящее (т.е. щелевое), а также нормальное (т.е. бесщелевое) состояние; исследованы фазовые переходы между ними. Показано, что туннельная плотность состояний в нормальной грануле может содержать две щели, соответствующие эффекту близости (минищель) и кулоновской блокаде (кулоновская щель).

В Заключениях сформулированы основные результаты диссертации, которые свидетельствуют о том, что в работе теоретически исследованы новые электромагнитные и транспортные свойства гибридных сверхпроводящих структур, связанные, в частности с возникновением нетривиальных нечетных по частоте сверхпроводящих состояний. Успешное выполнение задач диссертационной работы основано на прекрасном владении диссертантом современными теоретическими методами описания гибридных сверхпроводниковых систем, а также с детальным пониманием прорывов и проблем в текущих экспериментальных исследованиях в этой области.

В качестве замечаний можно отметить следующие моменты.

1. Для оценки места работ диссертанта в общем потоке исследований был бы полезен более подробный общий обзор или обзоры по главам предшествующих теоретических и экспериментальных результатов по теме диссертации. В частности, более подробное обсуждение работ по исследованиям парамагнитных откликов нечетных по частоте сверхпроводящих состояний, а также обсуждение проблемы устойчивости объемного нечетного по частоте сверхпроводящего состояния с парамагнитным откликом и т.п.

2. На стр 20 отмечено, что существование нечётной по частоте дальнедействующей триплетной компоненты в SF структурах с неоднородной намагниченностью «было предсказано в работе [39], а В ДАЛЬНЕЙШЕМ обсуждалось также в работе [40]». Вместе с тем работа [40] Кадигробова и др. опубликована в 2001 г. в номере от 1 мая, а работа Бергерета и др. – в том же году в номере от 30 апреля. Таким образом, справедливее было бы использовать слово «НЕЗАВИСИМО» вместо «В ДАЛЬНЕЙШЕМ».

3. В разделе 1.2 для контакта нормального металла и сверхпроводника Березинского рассмотрен только предел малых энергий, сравнимых с энергией Таулеса. Не меньший интерес представляет случай более высоких энергий, сравнимых с энергетической щелью в сверхпроводнике.

4. В разделе 1.4 при сравнении разработанной теории с экспериментом явно недостает адекватных теоретическому рассмотрению экспериментальных данных. Декларируется качественное согласие, основанное на наблюдаемых больших значениях активной части (R) поверхностного импеданса при низких температурах и отсутствии когерентного пика. Однако, при внимательном сравнении теоретических и экспериментальных результатов, можно видеть, что монотонный температурный рост реактивной части импеданса (X), наблюдаемый в эксперименте при сравнительно низких частотах, в теории существует только вблизи «околощелевых» частот (Рис. 1.19 d). А предсказанное аномальное превышение активной частью импеданса его реактивной части не наблюдается совсем.

5. Исследования последней четвертой главы несколько выпадают из общей тематики диссертации, связанной с взаимовлиянием сверхпроводимости и магнетизма. Следовало бы хотя бы как-то обосновать появление этой главы в диссертации (связать, например с близостью рассматриваемых проблем, техники вычислений и т.п.)

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

В целом диссертация выполнена и изложена на самом высоком теоретическом уровне, она является цельным и законченным исследованием. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений. Диссертация вносит существенный вклад в теоретические исследования взаимовлияния сверхпроводимости и магнетизма в гибридных и неупорядоченных системах, обобщает ряд наблюдаемых явлений с точки зрения проявления особенностей нечетных по частоте сверхпроводящих состояний.

Практическая значимость работы связана с развитием теоретических моделей и подходов, предсказанием новых свойств гибридных структур, имеющих перспективу использования в качестве элементов криоэлектроники. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН г.Черноголовка, ИПТМ РАН г.Черноголовка, ИРЭ РАН, г.Москва, ФИ РАН г.Москва, ФТИ РАН г. Санкт-Петербург. Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации. Представленные результаты докладывались на престижных российских и международных семинарах и конференциях.

По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов диссертационная работа «Взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма и особенности нечётных по частоте сверхпроводящих состояний» соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор – Фоминов Яков Викторович - достоин присуждения искомой степени по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв составил

Зав. Лаборатории сверхпроводимости
ИФТТ РАН, д. ф.-м. н., проф.

В.В. Рязанов

10 июня 2019 г.

Подпись В.В. Рязанова удостоверяю
Ученый секретарь ИФТТ РАН

А. Н.Терещенко

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на заседании Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук (протокол №14 от 10 июня 2019 года).

