

## ОТЗЫВ 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

### I. Актуальность темы

Несмотря на давнюю историю изучения явления сверхпроводимости, интерес к нему не ослабевает, однако центр тяжести переместился на исследования высокотемпературной сверхпроводимости и сверхпроводящих гетероструктур. Последние оказались чрезвычайно интересными как с точки зрения богатства и разнообразия фундаментальных физических эффектов, так и с точки зрения приложений в области сверхпроводящей электроники. Сверхпроводящие гибриды обладают уникальными свойствами, которые позволяют реализовать быстродействие и энергоэффективность, на порядки превосходящие таковые, основанные на других принципах функционирования вычислительных устройств. Источником уникальности и многообразия свойств сверхпроводящих гетероструктур является взаимодействие тонкого и очень чувствительного дальнего порядка, которым является сверхпроводимость, с несверхпроводящими материалами, такими как нормальные металлы, ферромагнитные металлы и полупроводники, топологические изоляторы, низкоразмерные системы (графен и двумерный электронный газ). Несверхпроводящие материалы могут обладать своим дальним порядком, который взаимодействует со сверхпроводящим дальним порядком, приводя к их конкуренции или взаимной подстройке, что проявляется в новых транспортных или электромагнитных свойствах гибридов. Развитие технологии микро- и наноструктурирования привнесло в физику сверхпроводящих гетероструктур возможность работать с геометрическими размерами, сопоставимыми с характерными физическими длинами, такими как сверхпроводящая длина когерентности, джозефсоновская длина и т.д., что обогатило физику сверхпроводящих гетероструктур мезоскопическими и размерными эффектами, а также позволило сопрягать сверхпроводящие материалы с низкоразмерными системами. Поэтому интенсивность и конкурентность экспериментальных и

теоретических работ в области сверхпроводящих гетероструктур чрезвычайно высоки.

Диссертация Самохвалова А.В., посвященная исследованию неоднородных состояний и интерференционным явлениям в гибридных сверхпроводящих системах, находится в фокусе активности в области физики сверхпроводящих гетероструктур, поэтому чрезвычайно актуальна. Она соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации в области индустрии наносистем.

## **II. Новизна исследований и полученных результатов**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с приложениями, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и библиографии из 494 наименований. Общий объем – 303 страницы, включая 81 рисунок. В работе были поставлены следующие основные цели:

1. построение феноменологической теории взаимодействия вихрей и образования необычных вихревых состояний в тонких пленках слоистых сверхпроводников в наклонном магнитном поле. Применение для объяснения наблюдаемых в экспериментах нестандартных вихревых структур;
2. построение теории равновесных и транспортных свойств вихрей Абрикосова при наличии пиннинга на протяженных дефектах, в том числе искусственного происхождения;
3. исследование конкуренции орбитального и обменного механизмов подавления сверхпроводимости, фазовых переходов и джозефсоновского транспорта в диффузных неодносвязных структурах сверхпроводник-ферромагнетик;
4. построение теории джозефсоновского транспорта в переходах с мелкомасштабной фазовой модуляцией, создаваемой полем однодоменных ферромагнитных частиц. Применение к экспериментам по полевой зависимости критического тока контакта;
5. теоретическое исследование интерференционных механизмов дальнедействующего джозефсоновского транспорта в баллистических структурах сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник и возможностей управления им.

При достижении поставленных целей были получены следующие основные результаты:

1. вычислен потенциал парного взаимодействия наклонных вихрей и деформированных вихревых нитей в тонких пленках слоистого

сверхпроводника, учитывающий дальнедействующее отталкивание из-за полей рассеяния вихрей вне пленки. Показана возможность формирования в слоистых сверхпроводниках нового типа вихревых структур – вихревых кластеров и многоквантовых решеток вихрей.

2. на основе микроскопической теории вычислен спектр подщелевых квазичастичных возбуждений в одноквантовых и многоквантовых вихрях Абрикосова, захваченных цилиндрической полостью, и показано существование области запрещенных состояний, минищели, в окрестности уровня Ферми; предложена модель депиннинга вихря внешним током, учитывающая качественные изменения вида спектра подщелевых квазичастичных возбуждений в вихре Абрикосова;
3. исследованы свойства неоднородных состояний с различным значением орбитального момента в неодносвязных гибридных структурах сверхпроводник-ферромагнетик и в мезоскопических сверхпроводниках в ЛОФФ фазе; проанализированы фазовые переходы между состояниями с различным орбитальным моментом;
4. развито микроскопическое описание джозефсоновского транспорта в гранулярных системах сверхпроводник в ферромагнитной матрице, точечных SFS контактах, а также термодинамических характеристик фазового перехода первого рода между  $0$  и  $\pi$  сверхпроводящими состояниями трехслойной гибридной SFS структуры с тонкими сверхпроводящими слоями; результаты применены к экспериментам для объяснения аномального увеличения глубины проникновения магнитного поля в системе Nb/PdNi/Nb;
5. развита теория джозефсоновского транспорта в переходах, находящихся в неоднородном поле однодоменных ферромагнитных частиц, объясняющая экспериментально наблюдаемые резонансные пики соизмеримости в зависимости критического тока контакта от внешнего магнитного поля;
6. предложены новые модели и механизмы компенсации разбаланса фаз между электронными и дырочными частями парной волновой функции в ферромагнитном слое с баллистическим типом проводимости, обеспечивающие дальнедействующий синглетный джозефсоновский транспорт в отличие от дальнедействующего триплетного транспорта, рассмотренного ранее;
7. предложена и разработана модель управления синглетным дальнедействующим джозефсоновским транспортом в баллистических

гибридных SFS структурах путем формирования в центральной части однородного ферромагнитного канала мелкомасштабной неоднородности обменного поля.

Все перечисленные выше результаты оригинальны, они соответствуют мировому уровню развития физики сверхпроводящих наноструктур и гетероструктур. Расчеты выполнены с большой тщательностью, их достоверность и обоснованность обеспечена как использованием хорошо зарекомендовавших себя и адекватных поставленным задачам методов теоретической физики конденсированных сред, таких как теория Гинзбурга-Ландау, метод Боголюбова-деЖена, формализм квазиклассических функций Грина, а также верификация полученных аналитических результатов численным решением соответствующих уравнений с использованием проверенных алгоритмов нахождения собственных значений и собственных функций, решения дифференциальных уравнений квазиклассической теории быстро сходящимися методами. Там, где это возможно, проверялось воспроизведение результатов прежних работ, получающихся как частные или предельные случаи из более общих результатов автора диссертации. Новизна исследований и полученных результатов подтверждается также экспертизой самых авторитетных профильных научных журналов, в которых были опубликованы результаты исследований, вошедших в диссертацию.

### **III. Научная значимость результатов**

Научная и практическая значимость работы обусловлена тем, что совокупность полученных в ней результатов представляет собой решение ряда крупных проблем, важных, прежде всего, в фундаментальном отношении, а также имеющих приложения для объяснения результатов существующих экспериментов и постановки новых экспериментальных исследований. В фундаментальном плане, проведены комплексные исследования вихревых состояний в слоистых, мезоскопических и гибридных сверхпроводящих системах, а также, в основном, джозефсоновских характеристик в сверхпроводящих гибридах с магнитными материалами.. В прикладном отношении, создана теоретическая база для расчета критических токов, ток-фазовых соотношений и возможностей управления этими характеристиками в джозефсоновских наноггибридах сверхпроводник-ферромагнетик.

#### **IV. Рекомендации для использования результатов и выводов работы**

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке магнитоэлектронных и спинтронных функциональных элементов сверхпроводящей электроники. Они могут быть интересны для исследовательских учреждений и организаций, работающих в области сверхпроводящих метаматериалов и гетероструктур, а также создания приборов на их основе: ИФТТ РАН, г. Черноголовка МО; НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина, г. Москва (Зеленоград); Институт радиотехники и электроники РАН им. В.А. Котельникова, г. Москва; Физико-технологический институт РАН (ФТИ РАН), г. Москва; Институт физики полупроводников РАН им. А.В. Ржанова, г. Новосибирск; Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт Петербург.

#### **V. Замечания по работе**

Диссертация содержит большой объем информации, изложенной предельно кратко, что само по себе является большой нагрузкой для читателя. Кроме того имеется ряд нестыковок и огрехов, приведенных ниже, которые затрудняют гладкое восприятие материала:

1. на мой субъективный взгляд, не все Положения, выносимые на защиту, сформулированы примерно равнозначно по содержанию и значению, а именно, я бы объединил Положения 2 и 3, т.к. Положение 2 логически содержит только отрицание известного ранее и общепринятого утверждения, но не предлагает альтернативы (по крайней мере, так воспринимается до прочтения диссертации, когда хочется посмотреть заранее на «сухой остаток» представленной работы). Альтернатива известному вихревому состоянию в слоистых сверхпроводниках предлагается в Положении 3, которое и обосновывает Положение 2, которое, однако, сформулировано ранее. И вообще, материала в диссертации настолько много, что безо всякого ущерба для качества и уровня работы первую главу вообще можно было бы убрать, чтобы вся работа была построена только на мезоскопических структурах и гибридах сверхпроводников с несверхпроводящими материалами;
2. иногда применяется терминология, принятая в узком кругу специалистов в области исследований и не расшифрованная в тексте, например «джозефсоновский переход с поперечной геометрией». Если бы не было написано в скобках (overlap), читатель бы споткнулся, соображая, что поперечность означает протекание джозефсоновского

тока перпендикулярно плоскости тонкопленочного контакта, приготовленного внахлест;

3. стиль формулировки выводов по главам такой, что изолированно от содержания самих глав они зачастую выглядят неполными, что-то нужно знать, помнить и додумывать из головы, например: (1) стр. 156, глава 3, выводы к главе, «(4) В диффузном пределе изучены свойства композитной SF среды, состоящей из сверхпроводящих гранул, размещенных регулярно или случайно в матрице ферромагнитного металла, с характерным размером гранул сравнимым с масштабом затухания сверхпроводящих корреляций в ферромагнетике. ...». А расстояние между гранулами? Если оно (точнее, расстояние между обращенными друг к другу поверхностями гранул) значительно больше длины затухания любых сверхпроводящих корреляций (низкий коэффициент заполнения), то джозефсоновского тока не будет. В самой главе присутствует все, и зависимость от размера гранул, и зависимость от расстояния между ними с графическими иллюстрациями; (2) стр. 241, Глава 5, выводы к главе, «(2) ... Данные решения содержат (синглетную – *добавлено мной, Л.Р.Т.*) дальнедействующую компоненту аномальной квазиклассической функции Грина, амплитуда которой не зависит от длины траектории и, поэтому, не будет подавлена из-за деструктивной интерференции лучей при усреднении по различным траекториям.». Изюмина результата состоит в том, что дальнедействующей в рассмотренной задаче является синглетная компонента спаривания (*добавлено мною в скобках*), а не триплетная с единичной проекцией полного спина, как это было предложено Волковым, Ефетовым и Бергеретом. Именно эта изюмина и выпала из формулировки выводов, хотя в тексте самой главы все акценты стоят на месте;
4. в главе 5 дальнедействующий синглетный эффект Джозефсона рассматривается в «чистом пределе», т.е. длина свободного пробега электронов проводимости считается больше любых других характерных длин в задаче и не учитывается в квазиклассических уравнениях. В эксперименте чистый предел реализуется в элементных ферромагнетиках, таких как кобальт, железо или никель, полученных с помощью молекулярно-лучевого осаждения в условиях сверхвысокого вакуума. В таких пленках реализуется баллистический транспорт. При этом длина когерентности  $\xi_f = \hbar v_F / 2E_{ex}$  в сильных ферромагнетиках как

Co, Fe, Ni чрезвычайно мала, порядка 1 nm, так как энергия обменного расщепления  $E_{ex}$  зоны проводимости этих ферромагнетиков велика, порядка долей электрон-вольта. Мне не известен слабый ферромагнетик (как правило, магнитный сплав), в котором бы реализовался чистый предел, и длина когерентности была бы порядка 10 или более нанометров. Поэтому утверждение в пункте (4) выводов к главе 5 на стр. 242 «... Оптимальный пространственный масштаб неоднородности – **несколько длин когерентности** в ферромагнетике  $\xi_f$ , что обычно составляет от 10 до 100 nm.» вряд ли обоснован, особенно в его верхней оценке в 100 nm;

5. в списке цитированной литературы ссылки 170 и 209 дублируют друг друга, ссылки 181 и 191 дублируют друг друга, ссылки 60, 83, 220, 221, 279, 455 неполные, отсутствуют или название журнала, или страницы, или соавтор и т.п.;
6. имеется ряд опечаток и недочетов в пунктуации;
7. если бы соискатель не снабдил меня электронной версией диссертации с цветными рисунками, многое из подписей к рисункам, ссылающихся на цвет линий, было бы непонятным при чтении только печатной версии.

Сделанные замечания носят, в основном технический и презентативный характер, не затрагивают основное содержание диссертации и не снижают в целом положительного впечатления от содержания и значимости проведенных исследований и самой диссертационной работы.

## VI. Общая оценка работы

Диссертационная работа Самохвалова А.В. представляет собой цельное, логически завершенное исследование с хорошо просматриваемым объединяющим началом всех глав диссертации. Совокупность полученных результатов является научно обоснованным решением крупной научной задачи, имеющей важное фундаментальное значение и потенциальное практическое применение. Автором внесен существенный вклад в исследование неоднородных состояний и интерференционных явлений в гибридных сверхпроводящих системах.

Основные результаты работы своевременно опубликованы в самых высокорейтинговых реферируемых журналах по профилю диссертации (Physical Review Letters, Physical Review B, Письма в ЖЭТФ, Superconductor Science and Technology и др.) и материалах отечественных и международных



конференций, они известны специалистам в области сверхпроводящих материалов и гетероструктур. Личный вклад автора в получение результатов является определяющим.

Автореферат правильно отражает содержание диссертационной работы, содержательная компонента которой полностью отвечает требованиям Положения "О порядке присуждения ученых степеней" к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Ее автор – Самохвалов Алексей Владимирович, несомненно заслуживает присуждения ему искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния.

2 июня 2015 г.

Официальный оппонент



Тагиров Л.Р.

Зав. кафедрой Физики твердого тела,  
Казанского (Приволжского)  
федерального университета,  
д. ф.-м. н., профессор

Тагиров Ленар Рафгатович,  
420008 Казань,  
ул. Кремлевская 18,  
тел. 8(843)2337698, 8-917-2680182  
e-mail: [ltagirov@mail.ru](mailto:ltagirov@mail.ru)

