

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Аладышкина Алексея Юрьевича “Эффекты размерного квантования и локализованной сверхпроводимости в гибридных металлических наноструктурах”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности – 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Актуальность темы.

Большой интерес к гибридным металлическим структурам, постоянно наблюдаемый в последние два десятилетия, связан с развитием тонкопленочных нанотехнологий и перспективами применения низкоразмерных гибридных структур на основе сверхпроводников и ферромагнетиков для создания устройств сверхпроводниковой электроники и спинтроники. Кроме того, гибридные структуры сверхпроводник-ферромагнетик (SF), в которых ярко проявляется взаимодействие сверхпроводящего спаривания и ферромагнитного спинового упорядочения, являются уникальными объектами научных исследований, обеспечившими недавно наблюдение таких новых фундаментальных явлений, как возникновение спин-триплетной сверхпроводимости, возникновение майорановских нулевых мод и др. Данная диссертационная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию тонкопленочных, слоистых и гибридных сверхпроводящих структур, в которых под действием магнитного поля подавляется сверхпроводимость, возникают неоднородные сверхпроводящие (СП) состояния, а также появляются необычные вихревые структуры. Тема диссертации А.Ю. Аладышкина, безусловно, актуальна, как для фундаментальной физики, так и для практических приложений.

Общая характеристика диссертации.

Диссертация объемом 295 стр. состоит из Введения, шести глав с описанием результатов исследований, Заключения и 4х приложений. Она основана на 28 публикациях автора, опубликованных в ведущих российских и международных научных журналах.

Введение содержит все обязательные для докторской диссертации подразделы: актуальность тематики, основные цели работы, научная новизна и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, сформулирован личный вклад автора, обоснованы достоверность результатов, описана их апробация и кратко изложена структура диссертации. В частности, 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. Представленный обзор литературы полон (223

наименования) и отражает современное состояние исследований по выбранной тематике.

Первая глава диссертации посвящена исследованию транспортных свойств Al- и Nb-микроструктур в перпендикулярном магнитном поле. В ее вводном разделе излагаются основы феноменологической теории Гинзбурга-Ландау. Далее излагаются результаты измерения особенностей в транспорте при превышении полем критических значений H_{c2} и H_{c3} для Nb-мостиков. Описана методика низкотемпературной лазерной микроскопии и результаты визуализации распределения напряжения в Nb-микромостике. Результаты измерений сопоставляются автором с численным моделированием распределения тока. Исследовались не только сплошные, но и перфорированные мостики, в которых потенциал пиннинга не имеет центра симметрии. В линейном и нелинейном отклике выявлены особенности при соизмеримости магнитного потока через искусственную элементарную ячейку с квантом потока. Показано, что при несимметричном потенциале пиннинга вихрей возникают среднее “выпрямленное” напряжение и четные гармоники напряжения вблизи $T_{c2}(H)$.

Во второй главе диссертации рассмотрено зарождение сверхпроводимости в структурах S/F – СП пленке большой площади на поверхности неоднородно намагниченной подложки с крупномасштабной доменной структурой. Теоретическое рассмотрение основано на анализе уравнения Гинзбурга-Ландау для случая неоднородной магнитной структуры во внешнем магнитном поле. Экспериментально изучены свойства двухслойных структур Al/CoPt при управляемом варьировании доменной структуры, а также 3-слойных структур CoPd/Nb/CoPd. Здесь автор применил интересный прием, и, воспользовавшись тем, что верхний и нижний слои имели разную коэрцитивность, исследовал СП свойства в трех различных магнитных состояниях с размагниченными или намагниченными индивидуальными слоями. Далее автор теоретически и экспериментально исследовал зарождение локализованной сверхпроводимости в ультратонких пленках. Показано существование двух различных режимов - с квадратичной и линейной зависимостью T_c от поля, соответствующих зарождению сверхпроводимости в разных местах относительно доменной структуры.

В третьей главе диссертации описаны исследования зарождения сверхпроводимости в мезоскопических сверхпроводниках в неоднородном магнитном поле. Экспериментально изучались Pb-мостики на поверхности кристалла мультиферроика гексаферрита бария. Теоретически исследовано формирование локализованной сверхпроводимости в поле доменной стенки. Экспериментально, методом низкотемпературной лазерной микроскопии исследованы переходы между локализованными и делокализованными СП состояниями при изменении поля и температуры. Исследован процесс зарождения сверхпроводимости в мезоскопическом Al/Nb криотроне с

перпендикулярной ориентацией управляющего Nb-проводника и Al-микромостика. Для геометрии СП диска теоретически и экспериментально исследовано зарождение сверхпроводимости в поле магнитных частиц расположенных над диском. Наконец, экспериментально изучены гибридные структуры из ферромагнитного (CoPt) и сверхпроводящего (Al) дисков, в которых прикраевая сверхпроводимость подавлена полем рассеяния намагниченного ферромагнетика.

В четвертой главе изучены транспортные свойства сверхпроводящих микромостиков в неоднородном магнитном поле. Измерения проведены на Al-мостиках на поверхности гексаферрита бария. Обнаружена анизотропия сопротивления в 10^3 раз при направлениях тока перпендикулярно или параллельно доменным границам, подтверждающая формирование квазиодномерных каналов локализованной сверхпроводимости. Экспериментально исследована асимметрия вольт-амперных характеристик в состоянии компенсированной сверхпроводимости, связанная с возникновением безвихревого бездиссипативного канала. Теоретически исследовано возникновение связанных многовихревых комплексов в мезоскопических криотронах и предсказаны особенности на зависимостях критического тока от управляющего тока. Эти осцилляции критического тока выявлены экспериментально в микро-криотронах Al/Nb.

Пятая глава диссертации посвящена изучению морфологии островков Pb, возникающих при осаждении сверхтонких пленок в высоком вакууме. Методом низкотемпературной сканирующей туннельной спектроскопии при малых напряжениях смещения изучены квантовые интерференционные размерные эффекты, позволившие автору идентифицировать толщину островков. При этом автор использовал метод синхронного измерения топографии в режиме с постоянным туннельным током и спектроскопию с помощью модуляции тока на высокой частоте. Помимо предвидимых эффектов ступенчатого изменения свойств при изменении числа монослоев, автором обнаружены крупномасштабные плавные неоднородности туннельной проводимости, указывающие на присутствие внутренних напряжений и дефектов в Pb пленках.

В шестой главе экспериментально исследованы особенности электронных свойств Pb-островков на поверхности Si-подложки, методом низкотемпературной сканирующей туннельной спектроскопии при больших напряжениях смещения, сравнимых с работой выхода. Здесь основной упор сделан автором на изучение электронных состояний, левитирующих над поверхностью Pb в поле электростатических сил. Проведено приближенное вычисление спектра таких состояний и связанных с ним эмиссионных резонансов. Из положения максимумов измеренной дифференциальной туннельной проводимости получена численная оценка локальной работы выхода. Экспериментально установлено, что эта оценка не зависит от формы

иглы-зонда и от толщины пленки Pb. Обнаружена пространственная зависимость спектра резонансов для террас Pb с неквантованной толщиной и, тем самым подтверждено сделанное предположение о неоднородном распределении работы выхода и/или локального электрического потенциала вблизи дефектов.

Научная новизна и достоверность.

В диссертации получено множество новых результатов. Как правило, в диссертации рассмотрены вопросы, долгое время остававшиеся нерешенными, ни экспериментально, ни теоретически. Среди новых научных результатов, полученных в диссертации, можно выделить следующие:

- Экспериментально обнаружена “возвратная” сверхпроводимость в тонкопленочных структурах S/F и F/S/F (Al/CoPt и CoPd/Nb/CoPd) с крупномасштабной лабиринтной доменной структурой, проведен теоретический и экспериментальный анализ влияния различных факторов на T_c .
- Для тонкопленочных S/F гибридных систем с ламинарной магнитной структурой аналитически, численным моделированием и численным решением уравнений Гинзбурга-Ландау рассчитан новый режим зарождения сверхпроводимости между центрами доменов и проанализировано зарождение СП в толстых пленках с учетом неоднородности поля по толщине.
- Для мезоскопических S/F систем (Al мостиков на поверхности гексаферрита бария) обнаружена сильная анизотропия сопротивления, указывающая на существование квазиодномерных СП каналов вдоль доменных границ.
- Обнаружен диодный эффект в мезоскопических S/F мостиках (Al/гексаферрит бария).
- Обнаружена генерация четных гармоник для перфорированных СП микромостиков с пространственно-несимметричным потенциалом пиннинга.
- Методом лазерной микроскопии экспериментально визуализирована доменная сверхпроводимость, возвратная сверхпроводимость, прикраевая сверхпроводимость и ее трансформация в объемную в мезоскопических структурах S/F.
- Теоретически предсказаны и экспериментально исследованы осцилляции критического тока в мезоскопических криотронах Al/Nb.
- Предложен и реализован оригинальный способ визуализации протяженных дефектов в островках Pb(111) и террас с квантованным и неквантованным изменением толщины; с помощью низкотемпературной сканирующей туннельной спектроскопии измерена работа выхода электронов и показано, что результаты измерений характеристик спектра не зависят от формы острия зонда и толщины пленки.

Важным достоинством обсуждаемой работы является большая доля и высокий уровень теоретических исследований, которые сопоставляются автором с результатами проводимых экспериментов, а также применение

различных моделей и теоретических подходов для исследованных систем и проблем. Такая синергия, безусловно, способствовала достижению достоверности результатов.

Замечания и вопросы.

- 1) Рис. 59. В подписи не указаны номера формул, с которыми сравниваются экспериментальные результаты.
- 2) На стр. 145 указана температура 1.222К. Возникает вопрос, на который я не нашел ответа в диссертации: какова точность стабилизации и измерений температуры?
- 3) На рис.118 приведена карта dI/dV и ее Фурье-образ. К сожалению, не написано, какое количество пикселей было использовано, поэтому трудно оценить, какие детали на Рис.118b несут физическую информацию, а какие-артефакт.
- 4) В разделе 5.1 приведен обзор текущего состояния исследований электронных свойств Pb наноструктур. Здесь автор обсуждает разнообразные размерные эффекты, их проявление в экспериментах и теоретическую трактовку. Это сложное изложение, к сожалению, не иллюстрируется рисунками и остается очень сложным для восприятия.
- 5) В формуле (6.3) по-видимому опечатка: вместо x должно быть z .
- 6) Приготовление игл для СТМ/СТС не описано совсем. Не описан независимый от измерений контроль формы острия, в то время как из результатов Главы 6 видно, что форма острия оказывает существенное влияние на результаты спектроскопических измерений.
- 7) Главы 2-4 имеют очень детально проработанную теоретическую составляющую и эксперимент, с которым сравнивается теория. В отличие от этого Глава 5 имеет в основном качественный методический характер и не столь заметное физическое содержание. Мне кажется, что Главу 5 можно было бы вынести в Приложение.
- 8) Все главы устроены одинаковым образом. Вначале излагается и развивается теория, затем эксперимент. Обычно, теория сопоставляется с результатами эксперимента, а не наоборот. Интересно узнать, чем мотивировался автор при таком порядке изложения.

Сделанные замечания, однако, несколько не умаляют общей высокой оценки диссертации, представляющей собой выдающееся детально исследование, открывающее новое направление в исследовании природы

низкоразмерной мезоскопической сверхпроводимости в присутствии неоднородного магнитного поля. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, является цельным и законченным исследованием. Новизна и достоверность результатов не вызывает сомнений. Сделанные автором выводы и заключения полностью обоснованы результатами, полученными автором теоретически и экспериментально.

Результаты работы могут быть использованы в ведущих научных центрах, таких как Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, ИФП им. П. Л. Капицы РАН, ИФТТ РАН, ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского РАН, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Новосибирский государственный университет, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Практическая значимость диссертационной работы связана с возможностью использования полученных автором результатов для устройств криотроники, сверхпроводниковой электроники, мезоскопических устройств спинтроники, а также для развития методов диагностики скрытых дефектов и определения параметров электронного спектра в тонких пленках. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Основные результаты работы полностью и своевременно опубликованы в 28 статьях ведущих научных журналах и доложены автором в более чем 40 докладах на основных российских и международных конференциях.

Диссертация А. Ю. Аладышкина несомненно удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки в редакции Постановления Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

1 февраля 2021 года

Официальный оппонент
Главный научный сотрудник
Физического института
им. П. Н. Лебедева РАН,
д.ф.-м.н., член-корр. РАН

Пудалов
Владимир Моисеевич

Подпись В.М. Пудалова удостоверяю
Ученый секретарь ФИАН
К.ф.-м.н.



Колобов А.В.

Согласен на обработку персональных данных

Контактная информация: Пудалов Владимир Моисеевич, ФГБУН
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский
проспект, д. 53, e-mail: pudalov@lebedev.ru, тел. +7(499)1326780



В. М. Пудалов