

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу 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

Экспериментальные исследования, составляющие диссертационную работу Аладышкина А.Ю., относятся к активно развивающейся области науки – физике гибридов сверхпроводник-магнитный материал, а также мезоскопических сверхпроводящих и низкоразмерных металлических структур, в которых проявляются эффекты размерного квантования. Кроме того, что гетероструктуры сверхпроводник-магнетик интересны с точки зрения фундаментальной физики, так как сочетают два антагонистических дальних порядка, они важны и с точки зрения приложений в сверхпроводящей спинтронике, которая рассматривается в качестве составляющей элементной базы для суперкомпьютерных приложений экзафлопного уровня. Поэтому исследования, представленные в диссертационной работе, являются чрезвычайно актуальными, что подтверждается множеством научных публикаций в этой области за последние 10 лет.

В качестве наиболее интенсивно и специфически примененных методов и инструментов исследования использовались низкотемпературная сканирующая холловская микроскопия, атомно-силовая и магнитно-силовая микроскопия, низкотемпературная сканирующая лазерная микроскопия, низкотемпературная сканирующая туннельная микроскопия и сканирующая туннельная спектроскопия с применением техники синхронного детектирования. Использование и мастерское владение перечисленными методами было определяющим в достижении целей исследований, поставленных в диссертационной работе.

Диссертационная работа имеет следующую структуру: введение, шесть оригинальных глав, заключение, четыре приложения, отдельные списки авторской и цитированной литературы (509 наименований в последнем), общим объемом 295 страниц, включая 147 рисунков.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, представлено краткое описание текущего состояния исследований по теме,

сформулированы цели работы, описаны методы исследования, аргументирована научная новизна и значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, и детально описан личный вклад диссертанта в работы, вошедшие в диссертацию.

Первая глава посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям особенностей транспортных свойств сверхпроводящих микромостиков из ниобия и алюминия, включая перфорированные, во внешнем однородном магнитном поле H , ориентированном перпендикулярно плоскости образца. Обнаружена и визуализирована прикраевая сверхпроводимость в однородных и перфорированных микромостиках, а также теоретически и экспериментально исследованы особенности транспортных свойств в режиме прикраевой сверхпроводимости.

Во второй главе теоретически и экспериментально исследуются особенности зарождения сверхпроводимости в тонкоплёночных гибридных S/F и F/S/F системах с магнитной связью и крупномасштабной лабиринтной доменной структурой в ферромагнитных слоях. Предсказана локализованная сверхпроводимость над центрами магнитных доменов, и исследованы особенности ее формирования. Обнаружена возвратная сверхпроводимость в гибридных структурах на основе ферромагнитных слоев с перпендикулярной анизотропией и тонких пленок алюминия и ниобия, показана возможность управления сверхпроводимостью через воздействие магнитным полем на магнитную компоненту гетероструктур.

Третья глава посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям особенностей зарождения сверхпроводимости в мезоскопических сверхпроводниках в неоднородном магнитном поле магнитных частиц, доменных стенок и токонесущих проводников. Обнаружены и визуализированы состояния прикраевой и объёмной компенсированной сверхпроводимости над доменами обратной полярности, прикраевой и объёмной сверхпроводимости над параллельными доменами.

В четвертой главе теоретически и экспериментально исследованы транспортные свойства сверхпроводящих каналов в неоднородном магнитном поле доменных стенок и токонесущих проводников. Обнаружена и объяснена гигантская анизотропия электрического сопротивления и критического тока, индуцированные неоднородным магнитным полем. Обнаружена асимметрия критического тока в

гибридных структурах, состоящих из сверхпроводящих алюминиевых микромостиков и ферромагнитных кристаллов феррита бария с полосовой доменной структурой; и в гибридной структуре, состоящей из тонкой сверхпроводящей пленки и ферромагнитной подложки с перпендикулярной магнитной анизотропией и уединённой доменной стенки.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию особенностей электронных свойств nanoостровков свинца при малых напряжениях. Показано, что спектры локальной дифференциальной туннельной проводимости характеризуются наличием хорошо определенных пиков проводимости, причиной которых являются квантово-размерные эффекты, обусловленные формированием стоячих электронных волн. Продемонстрирована возможность визуализировать скрытые дефекты под слоем металла с толщиной до 15 нм с субнанометровым пространственным разрешением.

В шестой главе приводятся результаты экспериментального исследования особенностей электронных свойств nanoостровков свинца в режиме квантованной электронной эмиссии при больших напряжениях, сравнимых или превышающих работу выхода W . В этих условиях становятся важными квантово-размерные состояния над слоем металла в локализирующем электрическом поле иглы и потенциале сил электрического изображения. Разработанная методика измерений и интерпретация результатов позволяют определить работу выхода электронов со свинцовых террас с хорошей точностью, не зависящей от формы иглы и локальной толщины пленки.

В разделе **Заключение** суммируются основные оригинальные результаты и выводы, которые согласуются с выносимыми на защиту положениями и отвечают целям и задачам, сформулированным в настоящей диссертационной работе.

В приложениях приводятся существенные детали расчетных схем для интерпретации результатов измерений, а также туннельные микроскопические и спектроскопические изображения с деталями их получения и интерпретации.

Практически исчерпывающий **список цитирований из 509 наименований** позволяет заключить, что автор рассмотрел все существенные аспекты интерпретации и моделирования явлений,

затронутых в диссертационной работе явлений, что также повышает достоверность сделанных в диссертации выводов.

Положения, вынесенные диссертантом на защиту, несомненно оригинальны, они обладают научной **новизной**, а также теоретической и практической значимостью. Так, можно особо отметить в качестве новых и наиболее значимых результатов следующие:

1. для тонкоплёночных гибридных S/F и F/S/F систем с крупномасштабной лабиринтной доменной структурой в ферромагнитных слоях экспериментально обнаружена возвратная сверхпроводимость;
2. для тонкоплёночных S/F систем с ламинарной доменной структурой на основе аналитических оценок и результатов численного моделирования предсказан новый режим зарождения сверхпроводимости над центрами магнитных доменов при $H \sim 0$, сопровождающийся изломом на зависимости $T_C(H)$ при $H=0$ при изменении знака внешнего поля H ;
3. для S/F систем с полосовой доменной структурой на основе численного решения уравнений Гинзбурга-Ландау проведен теоретический анализ зарождения сверхпроводимости в плёнках конечной толщины с учётом неоднородности магнитного поля по толщине;
4. для мезоскопических S/F систем (микромостиков из алюминия крестообразной формы в поле ламинарной доменной структуры в кристаллах феррита бария экспериментально обнаружена гигантская анизотропия сопротивления, индуцированная полями рассеяния магнитных доменов и свидетельствующая о появлении квазиодномерных сверхпроводящих каналов в окружении нормального металла;
5. для мезоскопических S/F систем (микромостиков Al на кристаллах феррите бария) экспериментально обнаружен диодный эффект в состоянии компенсированной сверхпроводимости. Показано, что диодный эффект обусловлен формированием безвихревого канала, который переносит значительную часть сверхпроводящего тока для транспортного тока определенной полярности. Для мезоскопических гибридных S/F структур предсказан диодный эффект в состоянии доменной сверхпроводимости;

6. для перфорированных сверхпроводящих микромостиков исследована связь нелинейных свойств таких образцов и симметрии потенциала пиннинга, в частности, обнаружена генерация чётных фурье-гармоник в отклике наноструктурированных микромостиков Al с нарушенной пространственной симметрией потенциала пиннинга;
7. для мезоскопических S/F систем (микромостиков Pb/BaFe₁₂O₁₉) экспериментально визуализирована доменная сверхпроводимость, а также переходы между доменной и компенсированной сверхпроводимостью над обратными доменами при изменении внешнего поля. Для сверхпроводящих Nb микромостиков в перпендикулярном магнитном поле экспериментально визуализирована прикраевая сверхпроводимость, а также переходы между прикраевой и объёмной сверхпроводимостью при изменении внешнего поля;
8. для сверхпроводящих микромостиков в поле управляющего провода с током (мезоскопических криотронов) предсказаны осцилляции критического тока, аналогичные осцилляциям критического тока джозефсоновских переходов; эти осцилляции для мезоскопических Al/Nb криотронов были обнаружены экспериментально;
9. для тонких плёнок Pb(111) предложен оригинальный способ визуализации скрытых дефектов, таких, как монокатомные ступени в подложке, инородные включения, дислокационные линии и террасы с неквадратными толщинами;
10. для тонких плёнок Pb(111) на основе результатов туннельных спектроскопических измерений получена оценка локальной работы выхода 3.8 ± 0.1 эВ. Показано, что эта величина не зависит от толщины плёнки и формы иглы туннельного микроскопа.

Практическая значимость работы связана с возможностью создания квазиодномерных сверхпроводящих каналов и управления их параметрами для применения в устройствах сверхпроводящей электроники (флаксоники); возможностью создания сверхпроводящих элементов с анизотропными характеристиками; существенным развитием методов диагностики металлических наноструктур, основанных на резонансном туннелировании, с возможностью визуализации скрытых дефектов в металлических плёнках и оценки микроскопических параметров таких плёнок.

Достоверность полученных в диссертации теоретических результатов обеспечена адекватным выбором моделей, корректно описывающих основные свойства реальных систем, и методов численного моделирования. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена адекватным выбором методик измерения и процедур анализа полученных результатов. Все полученные в диссертации экспериментальные результаты воспроизводимы, теоретические и экспериментальные результаты качественно и, как правило, количественно согласуются друг с другом и результатами, полученными в других исследовательских группах. Кроме того, экспертиза высокорейтинговых научных журналов, таких, как Physical Review Letters, Physical Review B, Applied Physics Letters, Journal of Applied Physics, Journal of Physics: Condensed Matter, Письма в ЖЭТФ, в которых были опубликованы основные результаты диссертационной работы, также подтверждает их достоверность. В 2009 году диссертант с коллегами опубликовали тематический обзор, посвященный обсуждению особенностей зарождения сверхпроводимости и вихревых структур в гибридных S/F структурах. Активное цитирование обзора свидетельствует о его полезности и может расцениваться как признание диссертанта как эксперта по вопросам физики гибридных структур с магнитной связью.

Высокий уровень работы, который я бы назвал классом, отражается в высококачественном исполнении самой рукописи диссертации – прекрасная организация материала, замечательный и методически выверенный стиль подачи материала, и что является отличительным признаком данной работы – четкий, правильный и почти безошибочный русский язык.

Работа настолько «вылизана», что составляет большую проблему найти в ней недостатки. Мои замечания – это скорее вопросы по деталям, которые автор, возможно, счел общеизвестными:

1. почему автор предпочел проводить измерения зависимости $R(H)$, а не как $R(T)$, как часто делают? Связано ли это со скоростью измерений, обеспечивающей приемлемую точность, или с расходом хладагента на полный цикл измерений?
2. линии $T_c(H)$, полученные по результатам транспортных измерений, могут меняться в зависимости от критерия их определения из резистивных измерений. Проверялось ли, что характерные особенности, такие как изломы, дополнительные максимумы

критической температуры и участки с немонотонной зависимостью критической температуры от поля, сохраняются при разных уровнях оценки сопротивлений?

3. можно ли было создать гибридную систему с прямолинейной доменной стенкой и управлять положением такой стенки, перемещая ее по мостику и контролируя изменение проводимости после выхода доменной стенки из проекции мостика? Это было бы красивым и убедительным результатом!
4. чем результаты диссертанта по исследованию анизотропии транспортных свойств планарный гибридных S/F структур отличаются от результатов группы Власко-Власова (например, работы Phys. Rev. B 78, 21451 (2008) [105] и Phys. Rev. B 77, 134518 (2008) [106])?
5. Можно ли по рис. 63, панель с, изображение 7 утверждать, что авторы наблюдают одновременно и доменную сверхпроводимость, и прикраевую?
6. Обычно, толщину слоев обозначают строчной буквой, например, d_s и d_f , а D_s и D_f (стр. 9 и 12) обозначают коэффициенты диффузии электронов в сверхпроводнике и ферромагнетике; есть несколько очевидных опечаток, которые я не буду обозначать.

Приведенные выше замечания не затрагивают суть работы и несколько не умаляют ее положительной оценки.

Результаты, полученные Аладышкиным А.Ю., полностью соответствует специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», в частности, пунктам 1 – «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления»; 3 – «Изучение экспериментального состояния конденсированных веществ (сильное сжатие, ударные воздействия, изменение гравитационных полей, низкие температуры), фазовых переходов в них и их фазовые диаграммы состояния» и 5 – «Разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения» Паспорта данной специальности.

Диссертация Аладышкина Алексея Юрьевича «Эффекты размерного квантования и локализованной сверхпроводимости в гибридных металлических наноструктурах» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на очень высоком научном уровне. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 28 статьях в высокорейтинговых отечественных и зарубежных научных журналах. Работа полностью отвечает требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», принятого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а именно, диссертация является крупным научным достижением в разработке экспериментальных методов исследований, обработки результатов измерений, теоретических расчетов, моделирования и интерпретации эффектов размерного квантования и локализованной сверхпроводимости в гибридных металлических наноструктурах, что представляет существенный научный интерес и практическую ценность в области сверхпроводящей электроники. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации и достаточно полно отражает его. Автор диссертации, Аладышкин Алексей Юрьевич, несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

2 февраля 2021 года

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Тагиров Ленар Рафгатович

Адрес: 420029, г. Казань,
ул. Сибирский тракт, д.10/7,
тел. (843)2319074
e-mail: ltagirov@mail.ru

Согласен на обработку персональной информации.

Подпись Л.Р. Тагирова
Главный ученый секретарь
ФИЦ КазНЦ РАН

