

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор ИФТТ РАН



А.А. Левченко

3 февраля 2021 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию А.Ю. Аладышкина
«Эффекты размерного квантования и локализованной сверхпроводимости
в гибридных металлических наноструктурах»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук.

Гибридные структуры на основе сверхпроводников (S) и ферромагнетиков (F) в настоящее время предмет отдельной области изучения явлений сверхпроводимости. Особое место занимают исследования неоднородных явлений, связанных с электромагнитным взаимодействием многодоменной структуры ферромагнитных слоев со сверхпроводящими. Активное развитие тонкопленочных технологий, зондовых и сканирующих методов исследований дает возможность контролируемо изготавливать и визуализировать локальные особенности электронных и сверхпроводящих свойств неоднородных гибридных структур. Настоящая диссертация посвящена изучению областей параметров, разработке методов контроля и манипулирования локальными и размерными эффектами в гибридных тонкопленочных системах, пригодных для использования в новых сверхпроводниковых и металлических устройствах нанoeлектроники. Таким образом, тема диссертации, несомненно, актуальна, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Диссертация состоит из Введения, шести глав, четырех приложений и Заключения, она основана на 28 научных работах, опубликованных в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и базы Web of Science и Scopus. Во Введении дан общий анализ текущего состояния исследований по теме диссертации, актуальности и степени разработанности темы исследования, обоснованы цели и задачи работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, перечислены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В работах, связанных с Главой 1 диссертации, эффективно использована методика низкотемпературной сканирующей лазерной спектроскопии (НСЛС) для визуализации прикраевой сверхпроводимости в области магнитных полей между вторым и третьим сверхпроводящим критическим полем. Изготовлены сверхпроводниковые тонкопленочные образцы с заданной симметрией потенциала пиннига вихрей Абрикосова, что позволило реализовать анизотропную вдоль пленки нелинейность сверхпроводящих свойств и обнаружить диодный эффект, а также резонансную генерацию четных Фурье-гармоник, которые связаны с возникновением суперструктуры вихрей. Наблюдаемые здесь явления в тонких сверхпроводящих пленках в присутствии транспортного тока и магнитного поля были успешно промоделированы в рамках теории Гинзбурга-Ландау, при этом учтено, в частности,

неоднородное распределение температуры вдоль сверхпроводящих слоев, индуцированное лазерным лучом, который используется в методе НСЛС.

В Главе 2 диссертации теоретически и экспериментально исследовано зарождение локализованных сверхпроводящих областей в слое сверхпроводника под влиянием доменной структуры в соседнем слое магнетика. Это явление было исследовано экспериментально с помощью магнитных, транспортных измерений и метода магнито-силовой микроскопии (MFM). Продемонстрирован сверхпроводящий квантово-размерный эффект в неоднородном магнитном поле ферромагнетика, связанный с зарождением сверхпроводящей фазы над магнитными доменами с обратной полярностью по отношению к приложенному полю. Показано также, что зарождение «доменной» сверхпроводимости вблизи доменных стенок ферромагнетика с out-of-plane магнитной анизотропией приводит к возникновению режима возвратной сверхпроводимости с немонотонным и обратимым изменением критической температуры. Численные расчеты подтвердили экспериментально наблюдаемую тенденцию, появляющуюся в том, что увеличение толщины сверхпроводящего слоя приводит к уменьшению влияния неоднородного поля ферромагнетика, а также что в отсутствие приложенного поля в SF-структурах преобладает доменная сверхпроводимость.

Глава 3 посвящена исследованиям зарождения сверхпроводимости в мезоскопических (латерально ограниченных) системах, т.е. структурах, размеры элементов которых сравнимы с характерными длинами магнитных структур (доменов, магнитных частиц, токунесущих проводников). С помощью магнитных, магниторезистивных измерений и метода НСЛС исследованы неоднородные сверхпроводящие состояния в сверхпроводниковых микромостиках над ламинарной доменной магнитной структурой и в поле провода с током, а также в сверхпроводящих дисках в поле малых магнитных частиц. Особенно впечатляющи эксперименты по визуализации состояний над доменами и доменными стенками с помощью лазерной сканирующей спектроскопии, которые надежно подтверждают зарождение сверхпроводящей фазы над магнитными доменами с обратной полярностью и, по-видимому, свидетельствуют о возникновении «доменной» сверхпроводимости над доменными стенками. Несомненное практическое значение имеют теоретические и экспериментальные результаты исследований мезоскопических криотронов – микромостиков, сверхпроводящие свойства которых контролируются полем проводов с током.

Продолжение исследований сверхпроводящих микромостиков с различной геометрией и размерами в неоднородном магнитном поле представлено в Главе 4. Экспериментально обнаружена гигантская (более 10^3) анизотропия сопротивления сверхпроводящих крестообразных микромостиков, изготовленных на подложке из монокристалла феррита. Показано, что эффект обусловлен формированием линейных сверхпроводящих каналов, параллельных ферромагнитным доменам. Также в некотором интервале магнитных полей был обнаружен «диодный эффект», связанный с возникновением асимметрии критических токов микромостиков. С помощью разработанной теоретической модели было показано, что при определенной взаимной полярности внешнего магнитного поля H и тока I через мостик возможно возникновение бездиссипативного (безвихревого) канала, который исчезает при инверсии знака H или I . Другой диодный эффект, наблюдаемый в состоянии доменной сверхпроводимости, был объяснен на основе численной модели, описывающей взаимодействие транспортного и экранирующих токов и появление выделенного направления, вдоль которого критический ток больше, чем для противоположного направления. Еще один важный с точки зрения практических применений результат был получен на криотронных структурах: наблюдаемые в эксперименте квази-осцилляции критического тока были объяснены на основе модели формирования вихревых молекул (пар вихрь-антивихрь) при увеличении управляющего тока.

Две последние главы диссертации посвящены изучению структурных и электронных свойств ультратонких монокристаллических островков свинца, выращенных на поверхности

Si(111)7x7. В Главе 5 представлены результаты исследования квантово-размерных электронных состояний с помощью низкотемпературной туннельной спектроскопии (LSTS) в режиме заданного туннельного тока. В спектрах дифференциальной туннельной проводимости проявляется зависимость от локальной толщины пленки, близости ступеней изменения числа слоев и дефектов. Построена диаграмма квантово-размерных электронных состояний, предложен метод индексации пиков на спектре туннельной проводимости. Получена информация о микроскопических параметрах (скорости и импульсе Ферми, эффективной массе, энергетическом спектре) монокристаллических металлических тонких слоев свинца. Восстановленные из экспериментальных данных электронные спектры находятся в хорошем согласии с модельными расчетами. Использование модуляционного STS метода, использующего синхронизацию измерения топографии поверхности и дифференциальной проводимости на заданных энергиях, позволило визуализировать террасы с различной четностью числа монослоев и обнаруживать скрытые дефекты структуры пленки и подложки: атомные ступени, инородные включения, скрытые части дислокационных петель и т.д. Показано, что крупномасштабные неоднородности туннельной проводимости могут быть связаны с внутренними напряжениями в тонких монокристаллических пленках с протяженными дефектами, а мелкомасштабная модуляция туннельной проводимости – с влиянием периодического потенциала подложки.

Глава 6 посвящена исследованиям наноостровков свинца в режиме эмиссии электронов при напряжениях сравнимых с работой выхода. Получен спектр эмиссионных резонансов, который не зависит от локальных вариаций толщины пленки и формы иглы, что позволило определить работу выхода. Теоретически и экспериментально исследованы энергии состояний электронов, локализованных в потенциале изображения в неоднородном электрическом поле вблизи проводящей поверхности (IPS-состояний), и влияние на IPS-состояния квантово-размерных резонансов пленок свинца (QWS-состояний), интерференция этих двух резонансных явлений. Исследованы изменения резонансных состояний вдоль поверхности наноостровка, а также зависимость IPS- и QWS-состояний от полярности потенциала образца.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации, которые свидетельствуют о том, что в работе выполнен целый ряд разнообразных экспериментальных исследований, проведен многосторонний теоретический анализ локализованных состояний в тонкопленочных сверхпроводящих гибридных и металлических структурах. Продемонстрировано эффективное и прецизионное использование уникальных методов низкотемпературной лазерной и низкотемпературной туннельной спектроскопии. Полученные результаты продемонстрировали возможности визуализации и манипулирования локализованными состояниями, перспективы практического использования развитых методов и наблюдаемых явлений. Успешное выполнение задач диссертационной работы основано как на хорошем владении диссертантом экспериментальных, и расчетных методов, так и на активном сотрудничестве с экспериментальными и теоретическими группами, работающими в области исследования сверхпроводящих гибридных структур и тонких монокристаллических слоев.

В качестве замечаний можно отметить следующие моменты.

1. В диссертации плохо представлен структурный анализ использованных многослойных и монокристаллических структур, хотя ряд наблюдений связывается с качеством структур, дефектами, внутренними напряжениями в структурах и т.п. Не описаны детально используемые сложные современные методы, например, методика низкотемпературной лазерной спектроскопии и низкотемпературной туннельной спектроскопии.

2. Некоторые сделанные выводы требуют дополнительной проверки с помощью прямых экспериментов. Например, влияние механических напряжений на туннельную проводимость тонких слоев свинца можно проверить, например неоднородным нагружением, изгибом подложки и т.п.
3. Остались неясными технологические или физические причины «неквантованного изменения высоты» террас, обсуждаемого в разделе 5.3.
4. В экспериментах по сканирующей лазерной спектроскопии сверхпроводящих микромостиков для параллельной ориентации магнитных доменов в Главе 3 представлен только случай, когда доменная стенка расположена в центре (по оси) микромостика. Для более надежной проверки связи наблюдаемого контраста с доменной сверхпроводимостью, было бы важно провести также эксперименты с доменной стенкой несколько смещенной от оси микромостика, поскольку середина сверхпроводящей полоски выделена по сверхпроводящим свойствам, по крайней мере, из «симметричных» соображений.
5. Хотя в целом диссертация написана ясно и подробно, в ней встречаются неточности и «жаргонизмы». Например, в разделе 5.2.1 написано, что острия вольфрамовых игл «очищались от оксидов и прочей гадости».

Сделанные замечания, в основном, относятся к форме представления материала и не снижают общей высокой оценки работы.

В целом диссертация выполнена и изложена на высоком уровне, она является цельным и законченным исследованием. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений. Диссертация вносит существенный вклад в изучение локализованных состояний и квантово-размерных эффектов в тонкопленочных сверхпроводящих гибридных и металлических структурах. Практическая значимость работы связана с перспективами использования развитых методов и наблюдаемых явлений для реализации новых устройств и элементов сверхпроводниковой наноэлектроники. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН и ИПТМ РАН г. Черноголовка, МФТИ г. Долгопрудный, МГУ, ИРЭ РАН г. Москва. Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации. Представленные результаты докладывались на престижных российских и международных семинарах и конференциях. В целом, диссертационная работа «Эффекты размерного квантования и локализованной сверхпроводимости в гибридных металлических наноструктурах» является завершенной научно-квалификационной работой, соответствует критериям пп. 9-14, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 со всеми последующими дополнениями и изменениями, а ее автор – Аладышкин Алексей Юрьевич, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07- физика конденсированного состояния.

Доклад по диссертационной работе заслушан на Семинаре по сверхпроводимости ИФТТ РАН, диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на заседании Ученого совета ИФТТ РАН (протокол № 1 от 25 января 2021 года).

Отзыв составил
главный научный сотрудник,
заведующий Лабораторией сверхпроводимости
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики твердого тела Российской академии наук
(ИФТТ РАН), д. ф.-м. н., проф.



В.В. Рязанов

Телефон рабочий +7 496 522 25 74
Е-мейл gyazanov@issp.ac.ru
Адрес организации 142432, г. Черноголовка Московской области, ул. Академика
Осипьяна 2.