

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Аладышкина Алексея Юрьевича «Эффекты размерного квантования и локализованной сверхпроводимости в гибридных металлических структурах», представленную на соискание ученой степени доктора физико- математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Аладышкина Алексея Юрьевича посвящена детальному изучению электронных свойств гибридных металлических наноструктур. Результаты, представленные в диссертации, охватывают период около 20 лет. В это время активно развивались направления, связанные с исследованием свойств мезоскопических сверхпроводников, краевой сверхпроводимости, свойств гибридных наноструктур, состоящих из сверхпроводников и ферромагнетиков (наиболее активно развивавшаяся область), в том числе изучение пиннинга вихрей в двумерных решетках магнитных частиц. Интерес к таким исследованиям связан как с постановкой новых вопросов о взаимодействии сверхпроводимости и магнетизма, так и с развитием нанотехнологий, сделавшим доступным создание многих структур, свойства которых ранее изучались лишь теоретически. Кроме того, получили большое распространение методы изучения поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии, дающих доступ к изучаемым объектам на атомном уровне. Тематика диссертационной работы тесным образом связана со всеми перечисленными областями, так что ее актуальность не вызывает никаких сомнений.

Содержание диссертационной работы изложено на 295 страницах. Диссертация включает 147 рисунков и список литературы из 509 наименований. Результаты по материалам диссертации опубликованы в 28 статьях в журналах, входящих в базы данных Web of Science Core Collection и Scopus, и представлены в 42 материалах конференций.

Во введении обоснована актуальность исследования, описаны основные направления исследований, базовые идеи и ключевые работы по тематике диссертации, указаны цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, кратко описаны методология и методы исследований, личный вклад автора, приведены положения, выносимые на защиту, и обоснования достоверности полученных результатов, а также дано краткое описание объема и структуры диссертации. Обращает на себя внимание широкая апробация результатов работы, которые были представлены на нескольких десятках российских и международных конференций. Особенностью введения является весьма подробное изложение основных базовых идей и ключевых работ по тематике диссертации, позволяющее понять место полученных результатов в соответствующих областях исследований и содержащее ссылки на 223 статьи.

Результаты исследований изложены в главах 1-6. Структура всех этих глав близка — каждая глава начинается введения, состоящего из теоретического обзора и/или краткого обзора текущего состояния исследований, затем описываются экспериментальные и теоретические результаты, полученные для различных экспериментальных конфигураций, и завершается каждая глава сжатым описанием основных полученных результатов. Исключением является глава 4, посвященная продолжению исследований, описанных в главе 3, и, как следствие, не имеющая введения.

Первая глава диссертации посвящена описанию результатов теоретических и экспериментальных исследований особенностей переноса заряда в сверхпроводящих микромостиках в магнитном поле. Представлены убедительные экспериментальные доказательства двухстадийности подавления сверхпроводимости в изучаемых структурах, связанного с различием критических параметров краевой и объемной сверхпроводимости. Эти доказательства основаны на использовании низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии, позволившей визуализировать краевую сверхпроводимость. В этой же главе представлены результаты исследования перфорированных микромостиков. Наиболее интересным является обнаружение связи между симметрией потенциала пиннинга и формой вольт-амперных характеристик, которые становятся асимметричными в микромостиках с асимметричной перфорацией.

Во второй главе представлены результаты исследования зарождения сверхпроводимости в тонкополеночных гибридных системах с магнитной связью и лабиринтной доменной структурой (в том числе и трехслойных). Специальный выбор геометрии образцов позволил диссертанту минимизировать эффекты, связанные с краевой сверхпроводимостью. Демонстрируется и объясняется большое разнообразие типов поведения подобных структур, в том числе возникновение в них доменной, локализованной и возвратной сверхпроводимости (в том числе и обнаруженной диссертантом обратимой возвратной сверхпроводимости). Правильность интерпретации полученных результатов обосновывается с помощью моделирования.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследования локализованной сверхпроводимости в мезоскопических сверхпроводниках в поле разнообразных источников магнитного поля — магнитных доменов, магнитных частиц и токонесущих проводников. По сути дела, в этой главе развиваются и используются идеи и подходы, изложенные в двух предыдущих главах, для случаев других источников и конфигураций магнитного поля. Использование сканирующей лазерной микроскопии позволило диссертанту впервые визуализировать ряд явлений, возникающих в сверхпроводящих мезоскопических структурах.

Четвертая глава посвящена изучению зарядового транспорта в сверхпроводящих микромостиках, помещенных в неоднородное магнитное поле. Рассмотрены микромостики, находящиеся на подложке с доменной структурой, а также криотроны — сверхпроводящие микромостики, помещенные в неоднородное магнитное поле, созданное однородным внешним магнитным полем и магнитным полем пересекающего криотрон проводника. Демонстрируется большое разнообразие форм вольт-амперных характеристик изучаемых структур. В сверхпроводящих структурах, сформированных на поверхности ферромагнитного кристалла $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ с доменной структурой, обнаружена гигантская анизотропия электрического сопротивления (более 10^3) и критического тока, а также диодный эффект. В мезоскопических криотронах обнаружено возникновение осциллирующих зависимостей критического тока от тока, протекающего через управляющий провод. Показано, что эти осцилляции связаны с возникновением пар вихрь-антивихрь.

Две последние главы диссертации посвящены изучению сверхтонких плёнок свинца. При этом основными использованными методами исследований в этих последних главах являются методы сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии. В пятой главе рассмотрены квантово-размерные электронные состояния в плёнках свинца. Основным методом исследований является модуляционная туннельная спектроскопия, которая позволила диссертанту получить изображения с очень наглядным разделением островков свинца на поверхности $\text{Si}(111)$ по их толщине. Представлены убедительные аргументы в пользу связи наблюдаемых структур с размерным квантованием в плёнках свинца. Предложен метод индексации пиков туннельной проводимости, который позволяет получить закон дисперсии и по нему оценить скорость и импульс Ферми, а также эффективную массу электронов в направлении $[111]$ в плёнке $\text{Pb}(111)$ на поверхности кремния. Полученные результаты совпадают с результатами, полученными другими методами, что свидетельствует о правильности интерпретации результатов и возможности практического применения описанного подхода к определению параметров тонких слоёв.

В шестой главе описаны результаты изучения туннельных спектров, возникающих при высоких смещениях туннельного промежутка (порядка 10 В). Возникающие при этом осцилляции дифференциальной проводимости туннельного промежутка связываются с вкладом состояний в потенциальной яме, формирующейся в вакууме вблизи изучаемой поверхности. Представлены результаты подробного изучения данного эффекта. Диссертантом изучена зависимость спектра наблюдающихся резонансов от начальной высоты иглы над поверхностью образца. Показано, что положение резонансов зависит от формы иглы и высоты сканирования. Получена формула для оценки положения резонансов, которая позволила диссертанту вычислить работу выхода. Обнаружена пространственная

зависимость спектра резонансных состояний от точки наблюдения вблизи дислокационных линий. Следует также отметить, что основные результаты последней главы, включающей в себя как теоретические, так и экспериментальные исследования, опубликованы диссертантом в статье без соавторов, что подтверждает высокую квалификацию диссертанта. Фактически, в последних двух главах диссертантом продемонстрировано, что модуляционная методика является прекрасным инструментом для количественного изучения поверхностных наноструктур.

В Заключении подводятся итоги диссертационной работы. В нём формулируются основные результаты диссертационной работы и выражаются благодарности. В Приложениях приводятся некоторые подробности теоретических и экспериментальных исследований.

Таким образом, в диссертации представлены обширные результаты многолетних исследований диссертанта в области физики наноструктур. Хотелось бы отметить высокую культуру изложения обширного материала, логичность и структурированность диссертации, сочетание экспериментальных и теоретических методов исследования, делающих выводы диссертанта гораздо более убедительными, а также стремление диссертанта к наглядности представления результатов. Полученные результаты представляют собой заметный вклад в физику наноструктур и послужили стимулом для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований в этой области, что подтверждается большим количеством ссылок на ключевые работы диссертанта. Несмотря на большой объем диссертации, опечаток и ошибок практически нет. В целом диссертационная работа отличается оригинальностью подходов, взглядом на проблему с необычной стороны, всесторонним экспериментальным и теоретическим изучением поставленных вопросов (в том числе с использованием новых методов исследования).

Замечания:

На рис. 118 представлены результаты исследований картины дифференциальной проводимости туннельного промежутка, на которых видно систематическое смещение пятен в сторону бóльших значений относительно ожидаемых положений, отмеченных кружками. Что такое ожидаемые положения, проводилась ли калибровка чувствительности СТМ по осям x и y , и почему эти области круглые, не поясняется.

На рис. 121 видны структурные дефекты, которые диссертант описывает как не полностью сформированные дислокационные линии. Оппонент хотел бы отметить, что возможность существования «не полностью сформированных дислокационных линий» требует пояснений, так как вектор Бюргерса не может принимать дробные значения (в постоянных решетке). Наблюдаемые объекты больше похожи на выход на поверхность

вполне сформированных дислокаций вдоль границы двойникования с малым углом рассогласования (см., например, [Liu, Y., Li, Y., Rajput, S. *et al.*, Tuning Dirac states by strain in the topological insulator Bi_2Se_3 . *Nature Phys.* **10**, 294 (2014)]). Для проверки такого объяснения достаточно рассчитать вектор Бюргерса для этих дефектов на изображениях с атомным разрешением.

В диссертации предполагается, что экспериментально наблюдаемые эмиссионные резонансы возникают в результате туннелирования в двумерные состояния, локализованные вблизи поверхности. Туннельная плотность двумерных состояний должна иметь форму ступеней, в то время как наблюдаемые резонансы имеют вид пиков. В диссертации имеется упоминание об этой нерешенной проблеме (один абзац на стр. 197-200) и в качестве возможного объяснения приводится феноменологическое соотношение, позволяющие учесть зависимость вероятности туннелирования от компонент волнового вектора (формула 5.2). По мнению оппонента, имело бы смысл попробовать применить это соотношение к описанию экспериментальных результатов для того, чтобы понять, позволяет ли оно хотя бы качественно объяснить наблюдающееся различие между ожидаемой и наблюдаемой формой спектров.

На стр 226 имеется утверждение, что положение каждого эмиссионного резонанса зависит как от работы выхода, так и от положения иглы и различить эти эффекты невозможно. Это утверждение противоречит другому результату диссертации, позволившему диссертанту с помощью анализа данных получить работу выхода из свинца, откуда следует, что различить эффекты положения иглы и работы выхода всё же возможно.

В главе 6 получена оценка работы выхода свинца ($3,8 \pm 0,1$ эВ). Полученная величина сравнивается лишь с результатами расчетов 1971 года (имеется согласие) и рекомендованным табличным значением 4,0 эВ (справочник 1991 года), относящимся к объемным материалам. В случае тонких плёнок работа выхода зависит от толщины плёнки $\text{Pb}(111)$ осцилляционным образом [C. M. Wei and M. Y. Chou, Theory of quantum size effects in thin $\text{Pb}(111)$ films, *Phys. Rev. B* **66**, 233408 (2002)]. При этом экспериментальные данные, полученные на структурах, аналогичных исследованным диссертантом, подтверждают наличие таких осцилляций и дают меньшие значения, лежащие в пределах 3,2 — 3,7 эВ [Yun Qi, *et al.*, Atomic-layer-resolved local work functions of Pb thin films and their dependence on quantum well states, *App. Phys. Lett.* **90**, 013109 (2007)]. В диссертации отсутствует сопоставление с этими работами, а также не обсуждается вопрос об осцилляциях работы выхода в тонких плёнках.

Указанные замечания носят принципиальный характер и не влияют на положительную оценку основных результатов и диссертации в целом. Считаю, что

содержание работы Аладышкина Алексея Юрьевича и форма ее представления полностью соответствуют требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России в редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. за №842, предъявляемым к докторским диссертациям. Автор обладает высокой квалификацией и достоин присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Автореферат и опубликованные работы полностью и точно отражают содержание диссертации.

Официальный оппонент,
зам. директора ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
доктор физ.-мат. наук

С.В. Зайцев-Зотов

ФГБУН Институт радиотехники и радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7, e-mail: serzz@cplire.ru, тел.: (495) 629 34 47.

Подпись С.В. Зайцева-Зотова заверяю
Ученый секретарь Института

19 января 2021 г.



И.И. Чусов