

## О Т З Ы В

официального оппонента

на диссертацию **Камашева Андрея Андреевича**

“Экспериментальное исследование роли триплетного спаривания в эффекте сверхпроводящего спинового клапана”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Изучение магнето-транспортных явлений в многослойных гибридных структурах – актуальная тема фундаментальных и прикладных исследований. В последнее время большое количество работ связано со сверхпроводящими гибридными структурами и, особенно, с различными фундаментальными аспектами сосуществования ферромагнетизма и сверхпроводимости: неоднородной наведенной сверхпроводимостью и спин-триплетной сверхпроводящей компонентой, которые возникают в присутствии границ сверхпроводника (S) и ферромагнетика (F) в искусственных тонкопленочных SF-структурах. Диссертация А.А. Камашева посвящена влиянию спин-триплетной сверхпроводящей компоненты на функционирование сверхпроводящего спинового клапана – перспективного устройства сверхпроводниковой электроники и спинтроники. Таким образом, тема диссертации, несомненно, актуальна, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Проведенное в диссертации научное исследование выполнено в рамках научного направления «Актуальные проблемы физики конденсированных сред, в том числе квантовой макрофизики, мезоскопии, физики наноструктур, спинтроники, сверхпроводимости» Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 - 2020 годы.

Диссертация состоит из Введения, четырех оригинальных глав и Заключения, основные результаты диссертации представлены в 8 научных работах, опубликованных в ведущих российских и международных научных журналах в соответствии с пп.11-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней». Во Введении обсуждаются предшествующие теоретические и экспериментальные результаты, связанные с сосуществованием и взаимовлиянием сверхпроводимости и ферромагнетизма в тонкопленочных SF-структурах. Особенно подробно представлены работы, посвященные реализации сверхпроводящих спиновых (SF-) клапанов и выяснению роли спин-триплетной сверхпроводящей компоненты в наблюдаемых в этих устройствах эффектах. Во Введении определены цели и задачи диссертационной работы, а также достоверность, научная и практическая значимость полученных результатов; перечислены положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе диссертации обсуждаются развитые и использованные в исследованиях технологии и методики экспериментов. Подробно описано приготовление многослойных тонкопленочных структур спиновых клапанов с применением молекулярно-лучевой эпитаксии и радиочастного распыления. Для фиксирования (пиннинга) направления намагниченности в нижнем пермаллоевом или железном (F1) слое использовался подслоя антиферромагнитного  $\text{CoOx}$ , два ферромагнитных слоя (F1 и F2) структуры F1/F2/S-спинового клапана были разделены слоем меди, в качестве сверхпроводящего (S-) слоя использовался свинец. Для защиты верхнего свинцового слоя использовался дополнительный диэлектрический слой нитрида кремния. Для напыления нескольких различных образцов за один вакуумный цикл использовался специально изготовленный держатель. Измерения магнитных характеристик производились коммерческим сквид-магнетометром, транспортные характеристики слоев и сверхпроводящие переходы структур измерялись в криостате с



жидким гелием-4 по 4-х-точечной схеме с использованием прижимных или изготовленных с помощью серебрянной пасты контактов.

В Главе 2 представлены исследования F1/F2/S спиновых клапанов со структурой  $\text{CoOx/Fe1/Cu/Fe2/Pb}$ . Глава посвящена, главным образом, влиянию дополнительного медного слоя между вторым железным слоем Fe2 и сверхпроводником (Pb) на процессы деградации сверхпроводящего слоя во времени и увеличение прозрачности F2/S – границы раздела. Сравняются магнитные и транспортные свойства структур с дополнительным медным слоем и без него. На основании измерений подавления критической температуры  $T_c$  с уменьшением толщины свинца определена оптимальная толщина сверхпроводящего Pb-слоя. Полученные результаты показали, что введение тонкого слоя меди между железом и свинцом препятствует «старению» F/S границы со временем и увеличивает ее прозрачность. На разработанных образцах с дополнительным медным слоем и свинцом в качестве сверхпроводника продемонстрирован “полный эффект” спинового клапана, т.е. переключение из сверхпроводящего в резистивное состояние при изменении направлений взаимной намагниченности ферромагнитных слоев. Подробно изучена зависимость эффекта спинового клапана от толщин ферромагнитных слоев. В последнем разделе Главы 2 проведено сравнение полученных результатов с теорией Фоминова и др.

Третья глава диссертации посвящена исследованиям влияния спин-триплетной сверхпроводящей компоненты на эффект спинового клапана в структурах с дополнительным медным слоем между сверхпроводником (Pb) и ближайшим к нему ферромагнетиком (Fe2). Была исследована зависимость критической температуры  $T_c$  структуры  $\text{CoOx/Fe1/Cu/Fe2/Cu/Pb}$  от угла между намагниченностями слоев Fe1 и Fe2. Были обнаружены отчетливые осцилляции  $T_c$  с минимумами при неколлинерных направлениях намагниченностей ферромагнитных слоев, причем эффект триплетной компоненты (глубина минимумов) был заметно больше для структур с дополнительным слоем меди между Fe2 и Pb. Это связывается с увеличением прозрачности границы Fe2/Pb. Была также исследована зависимость эффекта от толщины слоя Fe2. Обсуждение экспериментальных результатов и сравнение с теорией Фоминова и др. свидетельствует о хорошем качественном согласии эксперимента и теории.

В Главе 4 были проведены исследования новой структуры спинового клапана, в которой ферромагнитные слои железа были заменены пермаллоем. Такая замена связана с тем, что оптимальными являются слои ферромагнетиков с толщиной близкой к половине длины когерентности куперовских пар в ферромагнетике. Для железа эта величина была слишком маленькой, и требовался ферромагнетик с меньшим обменным полем и, соответственно, большей длиной когерентности. Было обнаружено, что для лучшего наблюдения эффекта спинового клапана требуется уменьшить шероховатости сверхпроводящего слоя, что достигалось напылением структур на холодную (150 K) подложку. В работе это объясняется тем, что неоднородности толщины слоев, связанные с шероховатостями, усредняют интерференционные явления, приводящие к пространственным осцилляциям сверхпроводящей волновой функции в ферромагнетике, и завулывают исследуемые эффекты. Еще одно важное достижение исследований этой главы было связано с возможностью выделения вклада триплетной компоненты. Ранее было показано, что «стандартный эффект» спинового клапана, связанный с различными коллинеарными взаимными направлениями намагниченностей ферромагнитных слоев, завуляется при определенной толщине ближайшего к сверхпроводнику ферромагнитного слоя. В работе была изготовлена соответствующая структура на основе ферромагнитных пермалловых слоев. При углах разориентировки намагниченностей ферромагнитных слоев 0 и 180 градусов критические температуры  $T_c$  совпадали и наблюдался, фактически, симметричный провал с минимумом  $T_c$  при 90 градусов, связанный исключительно с влиянием триплетной



сверхпроводящей компоненты. Численные расчеты показали, что теория Фоминова и др. качественно воспроизводит наблюдаемые экспериментальные зависимости.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые свидетельствуют о том, что выполнено подробное законченное научное исследование различных вкладов в эффект сверхпроводящего спинового клапана, связанный с сосуществованием магнетизма и сверхпроводимости в тонкопленочных гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик. Успешное выполнение задач диссертационной работы было бы невозможно без использования последних достижений технологии тонкопленочных структур, а также прецизионного проведения магнитных и транспортных экспериментов при низких температурах.

В качестве замечаний отметим следующие моменты:

1. Не вполне понятно отнесение «обзорных» работ диссертанта А1-А3 к Введению. Из текста диссертации следует, что в этих статьях содержится «анализ результатов, полученных исследовательской группой на первых этапах», однако, анализ предшествующих результатов, представленный во Введении, имеет только ссылки на работы [94,95] и др., и нет никаких ссылок или какого-то нового обсуждения, связанного с работами А1-А3.
2. В главе 2 не обсуждаются данные по взаимной растворимости и возникновению фаз в парах металлов, граничащих в исследуемых структурах (Fe/Cu, Cu/Pb), которые важны для понимания результатов главы. В тексте диссертации утверждается, что отсутствие смешивания железа и свинца – причина деградации Fe/Pb-границы раздела. Однако, как известно, медь и свинец также, практически, не растворяются друг в друге при низких температурах, что, согласно полученным результатам, не помешало улучшить требуемые свойства границ. Обсуждения процессов роста свинца на железе и свинца на меди не подтверждены экспериментальными данными или ссылками на литературу, что делает их неубедительными.
3. При обсуждении экспериментальных результатов на основе теории Фоминова и др. в разделе 2.3.2 слоем меди, фактически, пренебрегается (ср. два столбца параметров в Таблице 2.1). В точном расчете для обсуждения экспериментальных данных необходимо переосмысление параметров  $\gamma$  и  $\gamma_b$  для «трехслойной» границы, а не простая подгонка на основе теории Фоминова и др, разработанной для «двуслойных» F/S границ. Очевидно, что граничное условие в форме (3) или (2.5) не может быть прямо использовано на трехслойной границе, поскольку нет непосредственного контакта ферромагнетика и сверхпроводника, а нормальный слой может сильно менять пространственные производные сверхпроводящего параметра порядка и сам эффект близости, который в этом случае очень условно можно характеризовать единственным подгоночным параметром  $\gamma_b$ . Для понимания результатов, приведенных на рис. 2.4 полезно было бы также привести оценку длины спиновой диффузии в медном слое. Последняя величина, очевидно, существенно определяет подавление сверхпроводника ферромагнетиком и является не менее важной, чем, например, прозрачность медного слоя для куперовских пар.
4. Результаты, представленные на рис.2.5, заслуживают более подробного обсуждения, чем просто констатации факта, что сверхпроводник «чувствует» оба ферромагнитных слоя. Максимальная достигнутая разность критических температур для различных ориентаций намагниченностей ферромагнитных слоев в «полной сборке» составила менее 0.1 К. Замена же нижнего (дальнего от сверхпроводника) ферромагнитного слоя слоем меди увеличила  $T_c$  структуры на 0.5 К, что говорит о том, что подавление



сверхпроводимости за счет обратного эффекта близости со стороны сравнительно тонкой меди (1 нм) меньше, чем из-за наличия второго ферромагнитного слоя с противоположной ориентацией намагниченности, что качественно не вполне понятно.

5. В диссертации встречаются отдельные опечатки.

Сделанные замечания относятся, в основном, к форме представления материала или имеют характер пожеланий и, таким образом, не снижают общей высокой оценки работы. В целом диссертация выполнена и изложена на самом высоком экспериментальном и теоретическом уровне. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений. Исследования, выполненные в диссертации, содержат несколько новых интересных решений проблемы сосуществования ферромагнетизма и сверхпроводимости в искусственных гибридных тонкопленочных структурах, экспериментально изучены различные вклады в эффект сверхпроводящего спинового клапана, впервые выделен непосредственно вклад дальнедействующей сверхпроводящей триплетной компоненты. Практическая значимость работы связана с возможностью учета и применения обнаруженных явлений в спинтронных устройствах на основе гибридных структур сверхпроводник/ферромагнетик. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН г.Черноголовка, МГУ г. Москва, ФИАН г.Москва, ФТИ РАН г. Санкт-Петербург, ИФМ РАН, Нижний Новгород.

Автореферат и опубликованные работы подробно и правильно отражают содержание диссертации. Представленные результаты докладывались на престижных российских и международных конференциях.

Диссертационная работа А.А. Камашева удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент:  
д. ф.-м. н., проф.

\_\_\_\_\_ Рязанов Валерий Владимирович

07 октября 2016 г.

Заведующий лабораторией сверхпроводимости Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН)

142432, Российская Федерация, Московская область,

г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна д.2, ИФТТ РАН

Рабочий телефон: +7(496) 2-25-74

E-mail: [ryazanov@issp.ac.ru](mailto:ryazanov@issp.ac.ru)

Web-страница: <http://www.issp.ac.ru/ryazanov.html>

Подпись Рязанова удостоверяю  
Ученый секретарь ИФТТ



Г.Е. Абросимова