

СТОЛЯРОВ Василий Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ  
ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ КОНТАКТОВ С  
ТУННЕЛЬНЫМ И ФЕРРОМАГНИТНЫМ  
СЛОЯМИ**

Специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Черноголовка – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики твердого тела Российской академии наук.

Научный руководитель: **Рязанов Валерий Владимирович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий лабораторией  
сверхпроводимости.

Официальные оппоненты: **Овсянников Геннадий Александрович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, ведущий научный сотрудник.  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН) г. Москва

**Божко Сергей Иванович**,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник.  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт физики твердого тела  
Российской академии наук (ИФТТ РАН) г. Черноголовка

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Казанский физико-технический институт  
им.Е.К.Завойского Казанского научного центра  
Российской Академии наук  
(КФТИ КазНЦ РАН) г. Казань.

Защита состоится "2" октября 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 002.100.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твердого тела РАН по адресу: 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Ак.Осипьяна, д.2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФТТ РАН.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Зверев В.Н.

©Столяров В.С. 2012

©ИФТТ РАН, 2012

## Общая характеристика работы

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию джозефсоновских переходов с магнитным барьером, т.е. слоистых джозефсоновских структур типа сверхпроводник - ферромагнетик - сверхпроводник (SFS-контактов) и сверхпроводник - изолятор - ферромагнетик - сверхпроводник (SIFS-контактов), представляющих большой интерес как с научной, так и с практической точек зрения. Спиновый антагонизм ферромагнетизма и сверхпроводимости приводит к возникновению специфической "знакопеременной" сверхпроводимости в ферромагнетике, которая определяет уникальные свойства гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик (SF-структур). Одним из наиболее интересных фундаментальных проявлений сосуществования ферромагнетизма и сверхпроводимости является возникновение  $\pi$ -состояния джозефсоновских переходов с ферромагнитной прослойкой, обеспечивающего инверсию сверхпроводящей фазы в основном состоянии. Присутствие дополнительного туннельного (I) слоя в джозефсоновских структурах с магнитным барьером способствует улучшению критических характеристик, необходимых для их практического применения в джозефсоновской цифровой и квантовой логике в качестве инверторов фазы и магнитных джозефсоновских переключателей.

В диссертационной работе были изготовлены и исследованы джозефсоновские SIS, SFS и SIFS контакты. Получены зависимости их характеристик от магнитного поля, температуры, а также от толщины и магнитных свойств ферромагнитного слоя. Обнаружен переход SIFS-контакта в  $\pi$ -состояние, проведено сравнение с современными микроскопическими моделями процессов протекания бездиссипативного тока через слой ферромагнетика. Реализованы джозефсоновские магнитные переключатели на основе SFS и SIFS контактов.

**Актуальность темы.** Актуальность работы обусловлена как обилием новых явлений, возникающих в гибридных структурах, в которых имеет место сосуществование сверхпроводимости и ферромагнетизма, так и возможностью использования этих явлений в новых элементах перспективной электроники. Диссертация содержит обширные технологические наработки и три исследовательские части, связанные с изучением характеристик джозефсоновских SFS и SIFS контактов с сильномагнитным (никелевым) барьером и слабомагнитным барьером на основе сплава  $PdFe$ . Одной из важных задач, решенных в диссертационной работе, было соединение достоинств джозефсоновских туннельных переходов, активно используемых в сверхпроводниковой электронике, и уникальных свойств SFS контактов путем реализации SIFS контактов.

Цели данной работы состояли в реализации гибридных джозефсоновских структур с туннельным и магнитным барьером (SIFS-контактов), наблюдении перехода SIFS-контакта в  $\pi$ -состояние с инверсией сверхпроводящей фазы, демонстрации работы джозефсоновских магнитных переключателей на основе SFS и SIFS-контактов, а также в изучении возможности применения SIFS структур в качестве элементов криогенной оперативной памяти.

Для реализации поставленных целей были решены следующие задачи.

- Разработаны и оптимизированы комбинированные технологии приготовления джозефсоновских магнитных SFS и SIFS контактов. Для этого созданы лабораторные технологические установки: автоматизированная установка плазмохимического ионного травления в среде  $CF_4:O_2$  (RIE); автоматизированная высоковакуумная ( $10^{-7}$  мБар) установка термического осаждения тонких пленок с опцией теневого напыления (TES); система автоматизированного электрохимического анодирования. В среде LabView разработана универсальная программа измерения транспортных характеристик джозефсоновских структур с 3D визуализацией экспериментальных данных в реальном времени.
- Отработана хорошо воспроизводимая технология получения туннельного слоя (I) в SIS и SIFS-контактах, обеспечивающая заданную плотность критического тока.
- Исследована зависимость критического тока джозефсоновских SFS и SIFS- контактов от толщины ферромагнетика в широком интервале толщин, сопоставимым с полным периодом осцилляций сверхпроводящего параметра порядка. Обнаружен  $0$ - $\pi$  переход в джозефсоновском магнитном контакте с туннельным барьером. Определены интервалы толщин, в которых SIFS-переход является  $0$ - или  $\pi$ -контактом.
- Проведено сравнение экспериментальных результатов по SIFS контактам с данными численного моделирования на основе микроскопической теории, учитывающей влияние рассеяния электронов с переворотом спина в ферромагнитном слое (в случае чистого и грязного пределов).
- Продемонстрирована возможность создания элементов памяти, обладающих необходимыми характеристиками, на основе джозефсоновских магнитных переключателей  $Nb - Pd_{0.99}Fe_{0.01} - Nb$  и  $Nb - AlO_x - Pd_{0.99}Fe_{0.01} - Nb$  с магнитомягкой ферромагнитной прослойкой  $PdFe$ . Эффект переключения основан на

гистерезисной зависимости критического тока SFS и SIFS контактов от внешнего магнитного поля, что позволяет организовать переключение таких контактов между двумя состояниями с разными значениями критического тока, воздействуя на образец импульсами поля.

- Показано, что введение туннельного слоя в магнитный джозефсоновский контакт позволяет существенно увеличить характеристическое джозефсоновское напряжение и уменьшить джозефсоновское время переключения контактов с магнитным слоем.

**Новизна** полученных результатов. Впервые подробно исследованы SIFS джозефсоновские контакты с сильным ферромагнетиком ( $Ni$ ) в широком диапазоне толщин ферромагнитного слоя, позволяющем обнаружить полный период осцилляций параметра порядка и провести анализ результатов на основе современных микроскопических теорий. Впервые обнаружен температурный  $0-\pi$  переход на джозефсоновских структурах с магнитным и туннельным барьером. Показано, что характеристическое джозефсоновское напряжение магнитных контактов в присутствии туннельного барьера значительно увеличивается, что дает возможность их интегрирования в существующую сверхпроводящую электронику в качестве активных джозефсоновских элементов. Впервые изготовлены и изучены джозефсоновские структуры со слоем слабомагнитного ферромагнетика ( $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$ ), в том числе, с дополнительным туннельным слоем. Впервые продемонстрирована возможность использования SFS и SIFS структур со слоем  $PdFe$  в качестве устойчивых во времени переключающих элементов (джозефсоновских магнитных переключателей). Показано, что туннельный слой на несколько порядков уменьшает время считывания состояния магнитного переключателя за счет увеличения характеристического джозефсоновского напряжения от единиц нВ до сотен мкВ. Разработанная технология изготовления джозефсоновских магнитных переключателей полностью интегрируется в ниобиевую технологию изготовления цифровых сверхпроводящих (RSFQ) устройств, в которых джозефсоновские магнитные переключатели могут выполнять функции оперативной памяти, работающей на частотах до десятков ГГц.

**Практическая ценность работы.** Полученные экспериментальные результаты демонстрируют возможность использования SIFS структур в криоэлектронике в качестве элементов логических устройств и элементов памяти. Простейшее их применение основано на возможности переключения джозефсоновских магнитных контактов между состояниями с различным критическим током импульсами слабых магнитных

полей. Более сложные структуры -  $\pi$ -контакты с магнитным и дополнительным туннельным слоем, могут использоваться как самостоятельные активные элементы в цифровой и квантовой сверхпроводящей электронике.

На защиту выносятся следующие положения:

- Изготовлены и изучены джозефсоновские SIFS-контакты  $Nb - AlO_x - Ni - Nb$  с сильным ферромагнитным ( $Ni$ ) и туннельным  $AlO_x$  слоями. Наличие туннельного слоя привело к существенному увеличению характеристического джозефсоновского напряжения по сравнению с SFS-контактами (без туннельного слоя), что позволило проводить измерения джозефсоновских характеристик стандартными методами (без применения пиковольтметра).
- Проведены исследования зависимости критического тока SIFS-контактов от толщины никелевого F-слоя в широком интервале толщин. Обнаружены пространственные осцилляции наведенного сверхпроводящего параметра порядка в поликристаллическом никеле, определен их период.
- Обнаружен переход джозефсоновского SIFS-контакта в  $\pi$ -состояние с инверсным джозефсоновским ток-фазовым соотношением как при изменении толщины ферромагнитного слоя, так и при изменении температуры (для SIFS-контакта с толщиной F-слоя близкой к критической толщине  $0 - \pi$  перехода).
- В результате сравнения полученных экспериментальных результатов с существующими теоретическими моделями для случаев чистого и грязного ферромагнетика с учетом рассеяния электронов с переворотом спина получено удовлетворительное соответствие при использовании характеристик ферромагнитного никеля в качестве подгоночных параметров. Показано, что сдвиги зависимостей критического тока контактов от магнитного поля, обнаруженные для больших исследованных толщин, связаны с изменениями магнитной анизотропии никелевого слоя.
- Проведена характеристика пленок слабоферромагнитного магнитомягкого сплава  $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$ , использованных в качестве джозефсоновских барьеров в магнитных переключателях. Получена экспериментальная зависимость температуры Кюри ферромагнитных пленок от толщины, которая для наименьших исследованных толщин (менее 30 нм) опускается ниже 10 К.
- Изготовлены и исследованы джозефсоновские SFS-контакты  $Nb - PdFe - Nb$  с магнитомягкой ферромагнитной прослойкой. Показано, что прослойка  $PdFe$

проявляет однородную намагниченность вдоль слоя при планарных размерах менее 10 мкм, в то время как при больших размерах наблюдаются заметные искажения стандартной зависимости критического тока от внешнего магнитного поля.

- Продемонстрировано, что гистерезисная зависимость намагниченности прослойки  $PdFe$  (F-слоя) от внешнего магнитного поля  $H$  приводит к неоднозначной зависимости  $I_c(H)$  критического тока SFS контактов от магнитного поля. Разработан метод "джозефсоновской магнитометрии" т.е. восстановления петли перемагничивания тонкого ферромагнитного слоя из экспериментальных зависимостей  $I_c(H)$  в случае магнито-однородных F-слоев.
- Изготовлены и изучены джозефсоновские SIFS-контакты  $Nb - AlO_x - (Nb) - PdFe - Nb$  с магнитомягким ферромагнитным ( $PdFe$ ) и туннельным ( $AlO_x$ ) слоями. Введение туннельного слоя существенно увеличило характеристическое напряжение и позволило уменьшить джозефсоновское время переключения контактов почти на 5 порядков.
- Продемонстрирована возможность практического использования SFS и SIFS джозефсоновских контактов в качестве магнитных джозефсоновских переключателей.

**Личный вклад** соискателя в диссертационную работу является основополагающим и состоит в участии в постановке задач исследований, разработке токоплечных технологий, изготовлении образцов, создании нескольких автоматизированных технологических установок, написании специализированных программ для автоматизации экспериментов, выполнении измерений и обработке результатов исследований.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах и научных семинарах: симпозиум "Нанofизика и наноэлектроника" (Нижний Новгород, 2009, 2010); международная конференция RUSNANOTECH 2009, 2010, 2011 (Москва); международная школа ESSION-10 (Grenoble, France 2010); международная конференция "Нанofизика и наноэлектроника. Мезоскопические структуры в фундаментальных и прикладных исследованиях (МСФП'2010)" (Новосибирск, 2010); Российско-немецкий симпозиум "Future Trends in Nanoelectronics" (Германия, Юлих, 2011); Российско-украинский семинар "Физика сверхпроводниковых гетероструктур" (Черноголовка, 2011); семинары по сверхпроводимости ИФТТ РАН (2008-2012).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 3 работах [A1, A2, A3] в реферируемых журналах: Physical Review B, Письма в ЖЭТФ и Applied Physics Letters.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет \_\_\_\_\_ страницы, включает \_\_\_\_\_ рисунков и список литературы из \_\_\_\_\_ наименований.

## Краткое содержание диссертационной работы

**Во введении** обоснованы выбор темы диссертации и актуальность проводимых исследований, перечислены поставленные цели работы и решенные в диссертации задачи, указана научная новизна, представлены выносимые на защиту положения, описаны личный вклад соискателя и апробации результатов работы, представлена структура диссертации.

**Глава 1** (*Обзор литературы*) посвящена обсуждению предшествующих теоретических и экспериментальных результатов, связанных с задачами, которые решались в кандидатской диссертации. Кратко описаны такие характеристики сверхпроводника как энергетическая щель, длина когерентности, макроскопическая волновая функция, параметр порядка, критическая температура, суммарные импульс и спин куперовской пары; подчеркивается антагонизм сверхпроводимости и ферромагнетизма, связанный с различным спиновым упорядочением. Подробно обсуждается эффект близости, возникающий при непосредственном контакте сверхпроводника и нормального металла (S/N) и сверхпроводника и ферромагнетика (S/F). Представлены ключевые моменты, необходимые для понимания причин возникновения пространственных осцилляций параметра порядка в ферромагнетике вблизи S/F-границы. Обсуждаются основополагающие теоретические работы по неоднородному сверхпроводящему LOFF-состоянию [1, 2], которое должно возникать в сверхпроводнике в присутствии большого магнитного или обменного поля. Показано, что более реализуемым вариантом является наведенная "знакопеременная" сверхпроводимость вблизи S/F-границы раздела, предсказанная в работах Буздина, Куприянова и др. [3, 4] (см. также обзор [5]). В обоих случаях расщепление спиновых подзон приводит к возникновению ненулевого импульса (волнового вектора  $2q$ ) куперовской пары. Это состояние отлично от обычного сверхпроводящего основного состояния с нулевым суммарным импульсом пары. Куперовские пары, проникающие из сверхпроводника в чистый ферромагнетик с обменной энергией  $E_{ex}$ , приобретают импульс



$2\hbar q = 2E_{ex}/v_F$ , где  $v_F$ - скорость Ферми в ферромагнетике. При удалении от S/F-границы вглубь ферромагнетика происходит набег фазы параметра порядка  $2qx$ , и, таким образом, сверхпроводящий параметр порядка в ферромагнетике периодически меняет знак, переходя из областей "0-состояния" с положительным знаком в области " $\pi$ - состояния" с отрицательным знаком. Подобное явление возникновения знакопеременных пространственных осцилляций сверхпроводящей волновой функции в F-слое вблизи SF-границы имеет место и в грязном (диффузном) ферромагнетике. Волновая функция синглетного состояния куперовской пары имеет вид [5]:  $\Psi(d_F) \sim \Psi(0) \cos(d_F/\xi_{F2})e^{-d_F/\xi_{F1}}$ , где  $\xi_{F1}$  и  $\xi_{F2}$ - характерные длины, определяющие затухание и период осцилляций волновой функции,  $d_F$  - расстояние от SF-границы вглубь ферромагнетика. В диффузном пределе (без учета рассеяния с переворотом спина и спин-орбитального рассеяния):  $\xi_F = \xi_{F1} = \xi_{F2} = \hbar D_F/E_{ex}$ , где  $D_F = lv_F/3$  - коэффициент электронной диффузии, а  $l$  - длина свободного пробега электронов в ферромагнетике.

Большая часть литературного обзора посвящена описанию джозефсоновских контактов различного типа (SIS, SFS, SIFS), их вольт-амперных характеристик и зависимостей критического тока от температуры и магнитного поля. Рассмотрены особенности джозефсоновских характеристик туннельных (SIS) контактов с диэлектрическим (I) барьером. Обсуждается "резистивно-шунтированная" (RCSJ-) модель джозефсоновского контакта с учетом емкостного канала (SIS-контакт) и без него (SNS-контакт). Представлены экспериментальные результаты по наблюдению протекания сверхпроводящего тока через ферромагнитный слой в джозефсоновском SFS контакте [6] и обнаружению  $\pi$ - состояния с инверсным джозефсоновским ток-фазовым соотношением  $I_s = -I_c \sin \varphi$  [7, 8, 9]. (Здесь  $I_s$  - сверхпроводящий бездиссипативный ток,  $I_c$  - критический ток SFS контакта,  $\varphi$  - разность фаз сверхпроводящей волновой функции на контакте.) Переход в  $\pi$ - состояние имеет место, когда толщина F-слоя  $d_F$  в SFS контакте превышает половину длины волны пространственных осцилляций  $\lambda_{ex}/2 = \pi\xi_{F2}$ . При этом знаки параметра порядка на сверхпроводящих берегах будут разными, т.е. разность фаз на переходе будет равна  $\pi$  в отсутствие внешнего поля и тока. Величина критического тока для SFS контакта с чистым ферромагнитным барьером была впервые вычислена в работе [3]. Там же предсказана возможность перехода в  $\pi$ -состояние путем изменения температуры. В чистом случае зависимость критического тока от толщины F-слоя  $d_F$  выражается простой формулой:  $I_c(d_F) \sim \frac{\sin(yd_F)}{yd_F}$ , где  $y = 2E_{ex}/(\hbar v_F)$ . В работе [4] на основе решений квазиклассических уравнений Узаделя было получено следующее выражение для критического тока грязного SFS контакта:  $I_c = I_{c0} x \frac{|\operatorname{sh} x \cos x + \operatorname{ch} x \sin x|}{\operatorname{sh}^2 x \cos^2 x + \operatorname{ch}^2 x \sin^2 x}$ , где  $x = d_F/\xi_F$ . Обе эти фор-

мулы описывают немонотонную осциллирующую зависимость  $I_c$  от  $d_F$ . До начала работы над диссертацией переход в  $\pi$ -состояние был обнаружен при исследовании зависимостей  $I_c(d_F)$  в SFS контактах с грязным [8, 10, 11] и чистым [12, 13, 14, 15] ферромагнитным слоем, которые описывались указанными выше теоретическими соотношениями для чистого и грязного предела. В работах [16, 17] были начаты исследования SIFS контактов с туннельным слоем и слоем слабого ферромагнетика из сплавов  $CuNi$  и  $PdNi$ . Подробная микроскопическая теория протекания сверхпроводящего тока через SIFS контакты с учетом различных длин свободного пробега электронов, спин-флип и спин-орбитального рассеяния в ферромагнетике представлена в работе [18].

Включение  $\pi$ -контакта (джозефсоновского контакта в  $\pi$ -состоянии) в замкнутые сверхпроводящие контура приводит к возникновению спонтанных сверхпроводящих токов и магнитных полей [19, 20], что позволяет использовать SFS  $\pi$ -контакты в качестве внутренних источников смещения в сверхпроводящих схемах. Включение  $\pi$ -контакта (инвертора фазы) в сверхпроводящий интерферометр (SQUID) приводит к точному полупериодическому сдвигу его рабочих характеристик. Возможное использование SFS и SIFS контактов в цифровой и квантовой сверхпроводящей электронике обсуждается в работах [21, 22, 23, 24]. Первые экспериментальные результаты, подтверждающие возможность применения сверхпроводящих фазовых инверторов на основе SFS  $\pi$ -контактов в цифровых и квантовых устройствах, были опубликованы в работе [25]. Была продемонстрирована корректная и устойчивая работа сверхпроводящего триггера с  $\pi$ -контактом, в котором не требуется дополнительного источника смещения. Возможность использования новых принципов функционирования такого  $\pi$ -триггера снимает ограничения на уменьшение размеров базисных ячеек, что связано с заменой необходимой в стандартных схемах геометрической индуктивности внутренним смещением, задаваемым  $\pi$ -контактом. В этой работе также было показано, что декогерентность, вносимая SFS контактом в процессы, происходящие в структурах квантовой логики, не превышает влияния внутренних и внешних шумов от других источников. Таким образом, фазовые инверторы могут эффективно использоваться в качестве источников внутреннего смещения в сверхпроводящих квантовых логических структурах (кубитах), в частности в "потокном кубите" для выравнивания двухямного энергетического потенциала вместо приложения внешнего магнитного поля.

В последних разделах Литературного обзора описаны основные принципы сверхпроводниковой одноквантовой (RSFQ-Rapid Single Flux Quantum) логики [26]. Отмечается, что на пути развития RSFQ-электроники стоят две основные проблемы:

ограничения на возможность уменьшения базовых ячеек (которые могут быть сняты путем использования SFS  $\pi$ -контактов, как указывалось выше) и отсутствие компактной магнитной памяти, совместимой с RSFQ-схемами. Описана одна из первых попыток совместить магнитный и джозефсоновский элемент, сделанная в работе [27]. В этом элементе памяти ферромагнитная частица связана с обычным джозефсоновским контактом своим рассеянным магнитным полем; ее перемагничивание приводит к изменению критического тока контакта. Джозефсоновское устройство памяти, исследованное в диссертационной работе, значительно компактнее, поскольку перемагничивающийся ферромагнитный слой является просто джозефсоновским барьером SFS контакта.

**Глава 2** (*Технологические и экспериментальные методы*) посвящена обсуждению использованных технологических и измерительных установок с подробным описанием новых устройств, разработанных и запущенных в рамках выполненной диссертационной работы. Детально описаны также разработанные технологии изготовления тонкопленочных структур и методы их исследования с применением криогенной техники и прецизионных измерительных приборов.

Первые разделы посвящены описанию метода магнетронного осаждения тонкопленочных слоев с помощью нескольких использованных установок. Приведены рабочие параметры (давление аргона, мощность, скорость осаждения) для различных материалов слоев ( $Nb$ ,  $Al$ ,  $Ni$ ,  $Cu$ ,  $PdFe$ ). Представлены схемы установок. Джозефсоновские SIFS переходы  $Nb - AlO_x - Ni - Nb$  изготавливались в Юлихе (Германия) с использованием установки Leybold Univex 450B. Приготовление исходных многослойных структур для джозефсоновских магнитных переключателей осуществлялось при помощи комбинированной технологии с применением установок фирмы HYPRES Inc. и разработанной в лаборатории сверхпроводимости ИФТТ РАН установки LS 255. Все остальные структуры изготавливались в ИФТТ РАН. Получение туннельных барьеров производилось прецизионным окислением тонкого ( $\sim 10$  нм) слоя алюминия в атмосфере кислорода. Такого рода окисление позволяет достигать плотностей критических токов  $j_c = 4.5$  кА/см<sup>2</sup> с однородностью по площади контакта 15% (стандарт, используемым фирмой HYPRES Inc. в RSFQ-схемах). Приведена технологическая кривая зависимости  $j_c(P)$  ( $P$ - давление кислорода в камере, время окисления 30 мин), полученная в ходе отработки технологии в ИФТТ, а также типичные вольт-амперные характеристики изготовленных туннельных контактов.

Приведено также описание высоковакуумной установки термического напыления тонких слоев (TES), используемой, в частности, при напылении тонких изоляционных слоев  $SiO$ . Установка была разработана, собрана и автоматизирована в ходе

работы над диссертацией.

Формирование геометрии слоев структур осуществлялось с помощью установки фотолитографии MJB-4 и фоторезиста AZ5214E. Для "сухого" травления ниобиевых слоев использовалась установка реактивного плазмо-химического травления (RIE) во фреоне  $CF_4 : O_2$ , спроектированная и изготовленная в ходе работы над диссертацией. Для повышения воспроизводимости результатов травления установка была автоматизирована в среде LabView. Скорости травления используемых материалов ( $Nb$ ,  $SiO_2$ ,  $Al$ ,  $Ni$ ,  $PdFe$ ) в режимах RIE и ионного ( $Ar$ ) травления и другие параметры приведены в диссертации. Подробно описан разработанный электрохимический процесс анодирования, применявшийся для создания изоляции между верхними и нижними электродами джозефсоновских структур. Автоматизация процесса анодирования, позволила выращивать слои окислов  $Nb_2O_5$  и  $Al_2O_3$  с большой точностью.

После описания установок следуют разделы с подробным описанием технологий изготовления SIFS контактов с никелевым барьером и барьером из  $PdFe$ . Для получения джозефсоновских структур с разной толщиной ферромагнитного ( $Ni$ ) барьера никелевый слой на подложке осаждался в форме клина. Для тестирования однородности слоев также использовался метод мультиплицирования, когда на одной подложке в едином технологическом цикле изготавливалось более сотни идентичных джозефсоновских контактов.

В последних разделах Главы 2 представлены измерительные установки: пиковольтметр на основе dc-SQUID'а и автоматизированная установка для магнито-транспортных измерений джозефсоновских структур при температурах жидкого  $He^4$  и  $He^3$ .

**Глава 3** (*Джозефсоновские SIFS контакты с сильным ферромагнетиком*) посвящена изучению джозефсоновских структур типа SIFS с туннельным барьером и F-барьером нанометровых толщин из сильного ферромагнетика (никеля).

В первом разделе этой главы обсуждается геометрия образцов и возможность получения подробной зависимости характеристик SIFS структур от толщины F-слоя за счет приготовления в исходной заготовке никелевого слоя клинообразного сечения. Приведены измеренные электрофизические характеристики никелевых слоев. В частности удельное сопротивление  $\rho_{Ni}$  пленки никеля (для пленки толщиной 3.2 нм), измеренное вдоль слоя, составило 7.4 мкОм·см. Микроскопическое исследование пленки позволило предположить, что большой вклад в сопротивление вносит рассеяние электронов на границах зерен, и для транспорта поперек слоев в SIFS контакте, по-видимому, имеет место существенно меньшее удельное сопротивление. Соотношение Пишарда [28] дает связь длины пробега в металлах с удельным сопротивлением.

Однако, сложность поверхности Ферми никеля, различие удельного сопротивления для продольного и поперечного электронного транспорта, а также для электронов со спинами вдоль и против направления обменного поля - все эти факторы делают невозможными достаточно точные оценки длины свободного пробега в никелевом слое. Это не позволяет сделать выбор между чистым и грязным пределами в моделях, использованных ниже при обсуждении результатов.

На Рис.1 представлены вольт-

амперные характеристики для SIFS контактов  $Nb - AlO_x - Ni - Nb$  при толщинах F-слоя в области  $0$ -состояния и  $0-\pi$  перехода. На производной  $dI/dV$  хорошо заметна "щелевая особенность", при этом ее положение ( $\sim 2$  мэВ) свидетельствует о том, что энергетическая щель одного из берегов существенно подавлена за счет контакта с сильным ферромагнетиком. На Рис.2 показаны зависимости плотности критического тока от толщины никелевого слоя для двух

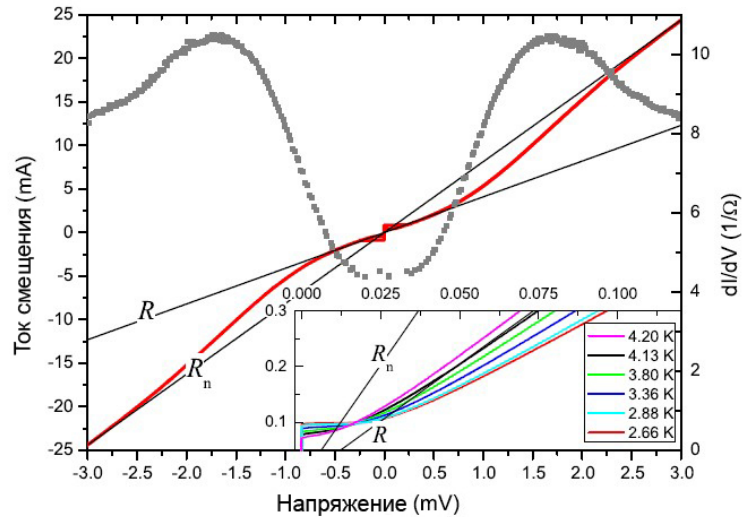


Рис. 1: В основной части рисунка сплошной линией представлена вольт-амперная характеристика и ее производная (квадратные точки)  $dI/dV$  для образца с толщиной  $d_F = 1.4$  нм при температуре  $T=4.2$ К. На вставке - ВАХ для контакта с толщиной  $d_F = 2.6$  нм в диапазоне температур от 2.66К до 4.20К. Прямыми линиями обозначены аппроксимации для нормального  $R_n$  и подщелевого сопротивления  $R$ .

серий контактов  $Nb - AlO_x - Ni - Nb$  с несколько различающимися прозрачностями туннельного барьера (т.е. толщинами окисного слоя). В целом весь исследованный интервал толщин F-слоя может быть разбит на 3 участка. До толщин  $\sim 2.3$  нм слой никеля является, фактически, немагнитным, о чем свидетельствует более слабая зависимость  $j_c(d_F)$  (см. Рис.2b). В средней части обе кривые имеют резкий минимум в области толщины  $0-\pi$  перехода (2.9 нм). Звездочками представлены результаты для контактов с наибольшими толщинами барьера (более 4 нм), в которых никелевые слои имеют измененную магнитную анизотропию. На это указывают зависимости критического тока от магнитного поля  $I_c(H)$ . Если для контактов  $Nb - AlO_x - Ni - Nb$  с толщиной никеля менее 4 нм центральные пики "фраунгоферовских" кривых  $I_c(H)$  имеют максимумы при  $H=0$ , то для контактов с толщинами более 4 нм они сдвинуты в область отрицательных  $H$ , что указывает на возникновение неусредненной намагниченности в F-слое. Как это более подробно исследовано в работе [29] при увеличении

толщины никелевого слоя происходит переход от поперечной (out-of-plane) к продольной (in-plane) магнитной анизотропии. В последнем случае возникает доменная структура с ненулевой суммарной намагниченностью вдоль джозефсоновского контакта.

Раздел 3.2 посвящен температурным зависимостям  $I_c(T)$  критического тока SIFS контактов. Нижняя кривая на Рис. 3 представляет результаты для контактов с толщиной F-слоя в области 0- $\pi$  перехода (т.е. в области минимумов на зависимостях, показанных на Рис.2). Эта кривая демонстрирует anomalous возвратное поведение, наблюдаемое ранее только для SFS контактов [8, 10, 11] и не наблюдаемое для SIFS контактов [16]. Низкотемпературная (возвратная) ветвь этой зависимости соответствует инверсному ток-фазовому соотношению ( $I_s = -I_c \sin \varphi$ ) и, если ее отразить в нижнюю полуплоскость графика, она без каких-либо изломов продолжит высокотемпературную часть кривой (0-состояние) с обычным джозефсоновским ток-фазовым соотношением ( $I_s = I_c \sin \varphi$ ). Для образцов с толщинами F-слоя всего на 0.2 нм больше (или меньше) толщины 0- $\pi$  перехода наблюдается типичное для джозефсоновских контактов с металлическим барьером монотонное возрастание критического тока с понижением температуры.

Первоначально в работе [8] было предположено, что температурный 0- $\pi$  переход в SFS контакте связан с температурной зависимостью периода пространственных осцилляций  $\lambda_{ex}(T) = 2\pi\xi_{F2}(T) = 2\pi\sqrt{\frac{\hbar D}{E_{ex}}}\left(1 + \frac{\pi k_B T}{2E_{ex}}\right)$ . Однако, для SFS контактов с F-барьером из сильного ферромагнетика температурная зависимость  $\lambda_{ex}$ , фактически, исчезает. Так для SFS контактов  $Nb-Cu_{0.43}Ni_{0.57}-Nb$ , у которых в работе [30] наблю-

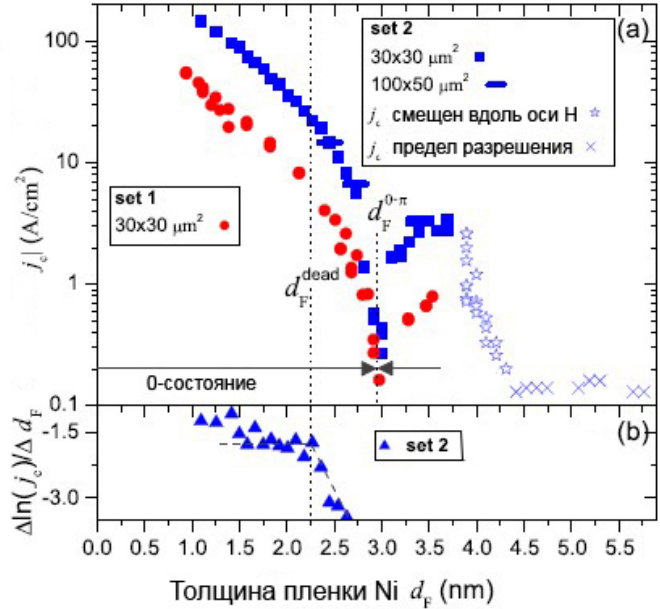


Рис. 2: (а) круглыми и квадратными точками показаны результаты для двух серий SIFS контактов: круглые точки - для контактов с большей толщиной слоя  $AlO_x$  (set 1), квадраты и прямоугольники - для контактов с меньшей толщиной окисного слоя (set 2). Для SIFS контактов с толщиной F-слоя менее 4 нм наблюдался симметричный вид зависимостей  $j_c(H)$ . Звездочками  $\star$  обозначены точки для образцов с сильно смещенными "фраунгоферовскими" зависимостями  $j_c(H)$  [29]. Крестами  $\times$  обозначены результаты, полученные на пределе чувствительности измерительных приборов. Область немагнитного "dead" слоя определялась по резкому изменению наклона на зависимости  $\ln(j_c(d_F))$ , как показано на нижнем рисунке (b).

дался температурный 0- $\pi$  переход, температурная поправка  $\frac{\pi k_B T}{2E_{ex}}$  не превышала  $10^{-2}$ . В исследованном в настоящей диссертационной работе случае никелевого F-барьера с  $E_{ex} \sim 300$  мэВ эта величина составляет всего  $\sim 10^{-3}$ . Обсуждение температурного 0- $\pi$  перехода на основе современной микроскопической модели сделано в работе [11], в которой показано, что в случае наличия достаточно прозрачных SF-границ и неоднородностей магнитного барьера возникает температурно-зависящее рассеяние с переворотом спина. Именно оно и ответственно за возникновение перехода в  $\pi$  состояние при понижении температуры в SFS и SIFS контактах с F-барьерами, близкими по толщине к толщине 0- $\pi$  перехода. Осаждение никелевого и ниобиевого слоев в едином технологическом цикле без разрыва вакуума обеспечило необходимую прозрачность SF-границ в исследуемых в диссертационной работе SIFS контактах  $Nb - AlO_x - Ni - Nb$ .

Подробному анализу полученных зависимостей  $j_c(d_F)$  посвящен раздел 3.3 диссертации. Обсуждается справедливость использования чистого и грязного предела при аппроксимации экспериментальных результатов теоретическими подгоночными кривыми (Рис.4). Верхняя панель показывает аппроксимацию результатов в области  $d_F > d_F^{dead}$  выражением  $I_c(d_F) \sim \frac{\sin\left(\frac{2E_{ex}}{\hbar v_F}(d_F - d_F^{dead})\right)}{\frac{2E_{ex}}{\hbar v_F}(d_F - d_F^{dead})}$  для чистого случая. В качестве подгоночных параметров были использованы следующие значения:  $E_{ex}=380, 300$  и  $80$  мэВ,  $v_F = 2.2 \cdot 10^5$  м/с [31]. Можно видеть, что согласия с экспериментом в этом пределе достичь не удалось.

На нижней панели Рис.4 представлена аппроксимация формулой грязного предела [18]:  $I_c(d_F) \sim e^{-\frac{d_F}{\xi_{F1}}} \cos \frac{d_F - d_F^{dead}}{\xi_{F2}}$  с учетом рассеяния с переворотом спина, характеризуемого временем  $\tau_m$ . Здесь,  $\xi_{F1, F2} = \sqrt{\frac{\hbar D}{E_{ex}}} \times \left( \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\hbar}{E_{ex}\tau_m}\right)^2} \pm \frac{\hbar}{E_{ex}\tau_m}} \right)^{-1} \approx \sqrt{\frac{\hbar D}{E_{ex}}} \left( 1 \pm \frac{\hbar}{E_{ex}\tau_m} \right)^{-1}$ . Учет немагнитного слоя  $d_F^{dead}$  и использование характерных длин  $\xi_{F1} = 0,66$  нм,  $\xi_{F2} = 0,53$  нм дало наилучшее согласие с экспериментом во всем интервале толщин. Соответствующие значения обменной энергии и энергии спин-флип рассеяния оценены как  $E_{ex} = 279$  мэВ и  $\hbar/\tau_m = 61$  мэВ. Несмотря на хорошую корреляцию с экспериментальными данными, получен-

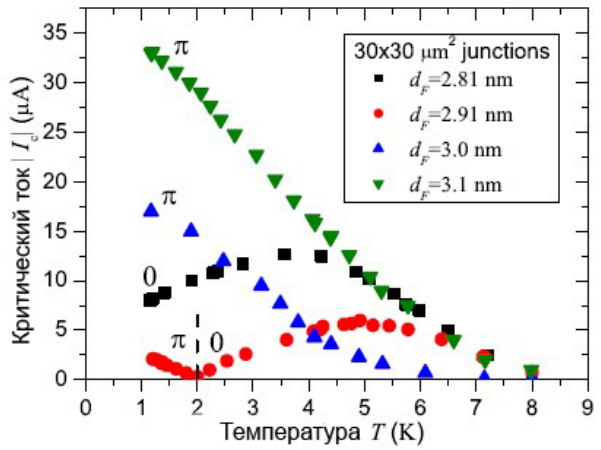


Рис. 3: Экспериментальное наблюдение температурных зависимостей критического тока SIFS контактов с размерами  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  и толщинами близкими к 0- $\pi$  переходу. При толщине  $d_F = 2.91$  нм обнаружен 0- $\pi$  переход в точке 2К.



ное соотношение  $\xi_{F1} > \xi_{F2}$ , строго говоря, противоречит теории грязного предела, что заставляет предполагать, что реальная экспериментальная ситуация лежит где-то между чистым и грязным пределом. В конце главы проведено сравнение полученных результатов с результатами других экспериментальных работ.

**Глава 4** (*Магнитные переключатели на основе джозефсоновских SFS переходов с магнитомягкой прослойкой*) посвящена изучению свойств SFS контактов со слабым ферромагнетиком  $PdFe$ , а также получению магнитных переключателей на их основе.

В первом разделе Главы 4 сформулирована необходимость исследования джозефсоновских SFS контактов с прослойкой из магнитомягкого слабоферромагнитного сплава для получения джозефсоновских магнитных переключателей, использующих гистерезисную зависимость критического тока от магнитного поля. Представлены эксперименты, проведенные для характеристики предложенного в диссертационной работе сплава  $PdFe$  с содержанием железа около 1 ат. %. Для определения температуры Кюри использовался метод аномального эффекта Холла [32]. Для этого осаждались пленки

разной толщины, из которых изготавливались холловские мостики. На верхней вставке к Рис.5 показана типичная зависимость от магнитного поля  $H$  холловского напряжения, экстраполяция которого к  $H=0$  позволяет определить величину  $V_M$ , пропорциональную намагниченности пленки  $M$ . На нижней вставке представлен метод определения температуры Кюри пленок. Основная панель Рис.5 показывает зависимость температуры Кюри пленок  $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$  от их толщины. В исследованных

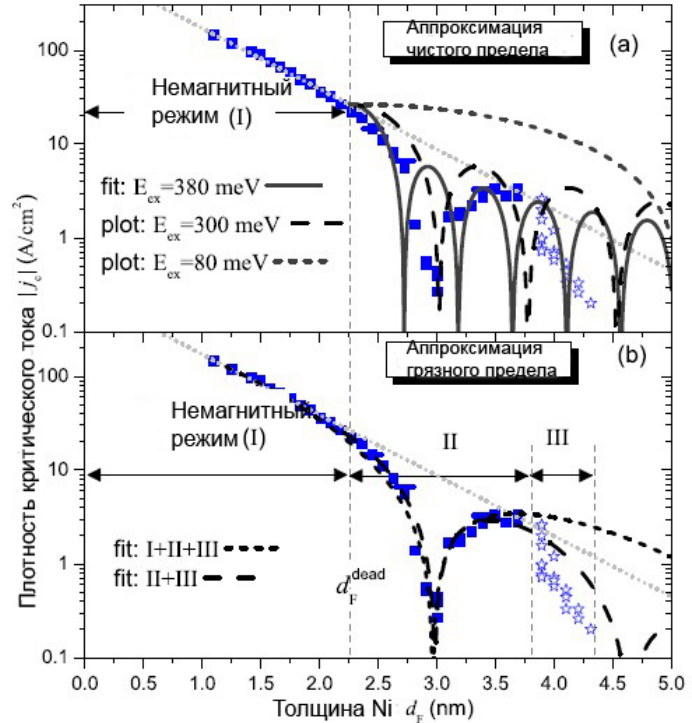


Рис. 4: Квадратными символами на панелях (a) и (b) показана экспериментальная зависимость  $I_c(d_F)$  для SIFS контактов с более тонким туннельным барьером (Рис.2). Зависимость разбита на три участка: (I)- немагнитный участок, аппроксимация для него показана серыми точками; (II)- участок с out-of-plane магнитной анизотропией; (III)- участок с in-plane магнитной анизотропией. (a) Аппроксимация в приближении чистого предела для значений обменной энергии  $E_{ex} = 380\text{meV}$  (сплошная линия),  $300\text{meV}$  и  $80\text{meV}$  (пунктирные линии); (b)-аппроксимация в приближении грязного предела. На панели (b) представлены две кривые: первая построена в приближении грязного предела для ферромагнитной прослойки во всем интервале толщин (короткий пунктир), вторая - с учетом наличия немагнитного слоя, которая и показала хорошее согласие с экспериментом



джозефсоновских SFS контактах использовались слои с толщиной 30-40 нм и температурой Кюри  $\sim 15$  К.

В экспериментах, представленных в разделе 4.2, продемонстрировано влияние магнитной структуры и магнитной предыстории ферромагнитного барьера на критический ток SFS контактов  $Nb - Pd_{0.99}Fe_{0.01} - Nb$ . Показано, что зависимости  $I_c(H)$  критического тока от магнитного поля имеют неоднозначный гистерезисный характер, что связано с тем, что джозефсоновский барьер изготовлен из магнитомягкого сплава, намагниченность которого изменяется при приложении слабых магнитных по-

лей в ходе эксперимента по измерению  $I_c(H)$ . Форма кривой  $I_c(H)$  для SFS контактов с большими планарными размерами сильно отличается от стандартной фраунгоферовой при малых полях, но приближается по виду к ней (т.е. становится квазипериодической и безгистерезисной) при полях больших полей насыщения  $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$  ( $\sim 6$  Э). Для SFS контактов с размерами  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup> гистерезисная, но квазипериодическая структура наблюдается уже при малых полях порядка нескольких эрстед, что свидетельствует об однородной намагниченности F-слоев таких контактов. Максимумы и минимумы кривых  $I_c(H)$  таких SFS контактов описываются соотношениями:  $\Phi^{min} = \Phi_0 m$ ,  $tg(\frac{\pi \Phi^{max}}{\Phi_0}) = \frac{\pi \Phi^{max}}{\Phi_0}$ ,  $\Phi^{max} \approx \Phi_0(n + 1/2)$ , где  $n$  и  $m$  - целые числа. При однородной намагниченности F-слоя магнитный поток через переход складывается из потока внешнего магнитного поля  $\Phi_H = H a d_m$  и потока вектора намагниченности ферромагнитной прослойки  $\Phi_M = 4\pi M a d_F$ , где  $a$  - размер SFS контакта в направлении, перпендикулярном магнитному полю,  $d_m = d_F + 2\lambda$  - магнитная толщина перехода,  $\lambda$  - глубина проникновения магнитного поля в ниобиевые берега SFS контакта. Эти соотношения позволяют восстановить из экспериментальной кривой  $I_c(H)$  гистерезисную зависимость  $\Phi(H)$  магнитного потока через переход и петлю намагничивания  $4\pi M(H)$  F-слоя, показанные на вставках к Рис.6(а). Полученная интерполяцией полная петля намагниченности была использована для аппроксимации экспериментальной зависимости  $I_c(H)$  расчетной кривой, показанной на основной панели Рис.6(а)

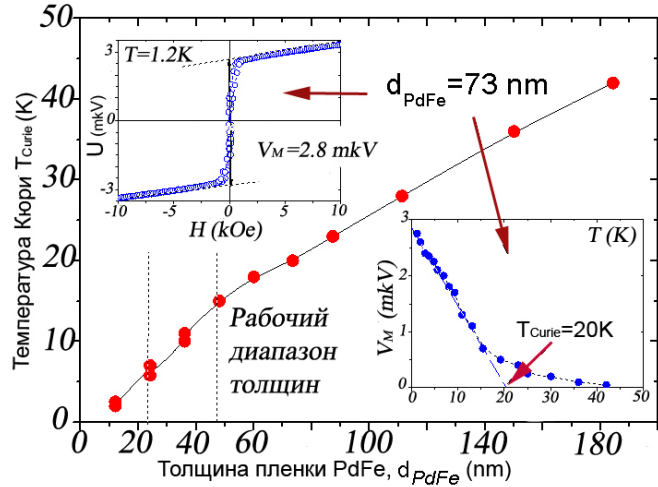


Рис. 5: Зависимость температуры Кюри от толщины пленки  $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$ . Верхняя вставка - типичная холловская петля гистерезиса, нижняя вставка - зависимость холловского напряжения  $V_M$  от температуры для пленки с толщиной 73 нм.

сплошной линией. Разработанная методика восстановления петли намагничивания из джозефсоновской характеристики  $I_c(H)$  SFS контактов, фактически, является оригинальным методом "джозефсоновской магнитометрии", позволяющим исследовать магнитные свойства слабых магнетиков малых объемов (менее  $10^{-10}$  см<sup>3</sup>).

Раздел 4.3 посвящен исследованию магнитных переключений между двумя состояниями джозефсоновского SFS перехода, связанными с магнитными состояниями прослойки  $PdFe$ , т.е. реализации джозефсоновских магнитных переключателей. Поскольку зависимость  $I_c(H)$  имеет гистерезис, т.е. каждому значению магнитного поля соответствуют два значения критического тока, можно выбрать рабочий ток через SFS контакт между этими двумя значениями и переключать SFS контакт из сверхпроводящего в резистивное состояние и обратно разнополярными импульсами внешнего магнитного поля. Пример таких переключений показан на Рис.6(b). Переключающие импульсы имели амплитуду  $\pm 1.5$  Э, при этом напряжение, возникающее в резистивном состоянии, составляло всего около 3 нВ, что связано с низкими характеристическими напряжениями  $V_c = I_c R_n$  джозефсоновских SFS контактов. (Здесь  $R_n \sim 10^{-4} - 10^{-5}$  Ом - нормальное сопротивление SFS контакта.)

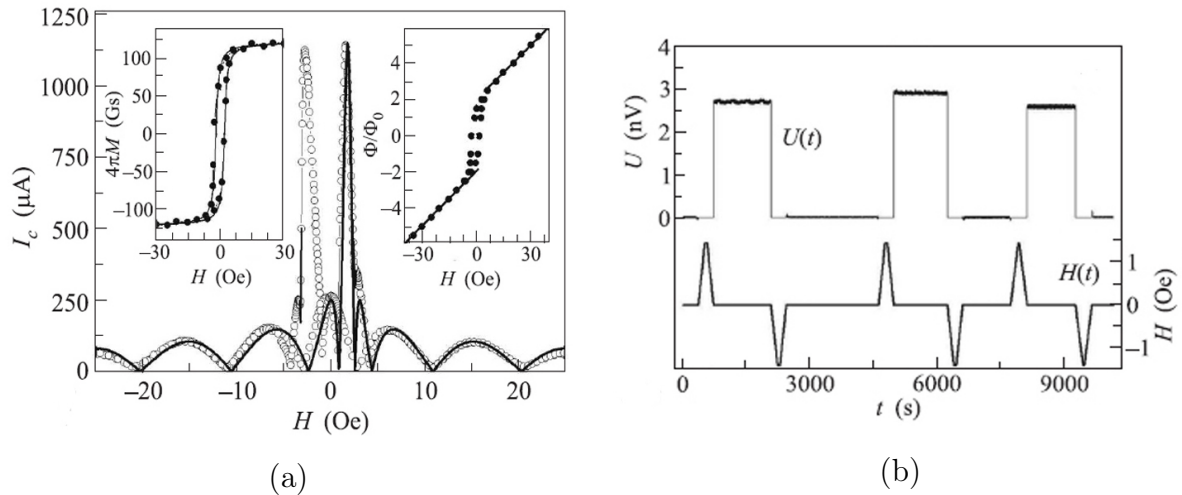


Рис. 6: (а)- зависимость  $I_c(H)$  критического тока джозефсоновского SFS контакта от внешнего магнитного поля (точки - эксперимент, сплошная кривая - расчет). На правой вставке - гистерезисная зависимость полного магнитного потока через переход, полученная из положений максимумов и минимумов экспериментальной кривой  $I_c(H)$ ; на левой вставке - кривая намагничивания F-слоя, полученная методом джозефсоновской магнитометрии. (б)-демонстрация переключений между сверхпроводящим и резистивным состояниями джозефсоновского SFS перехода (верхняя кривая) и временная диаграмма переключающих импульсов магнитного поля (нижняя кривая).

**Глава 5** (*Джозефсоновские SIFS контакты с высокими характеристическими напряжениями и переключатели на их основе*) посвящена реализации джозефсоновских контактов с туннельным и магнитомягким ферромагнитным барьерами.

Раздел 5.1 представляет собой введение, где сформулирована необходимость реализации SIFS контактов с магнитомягким ферромагнитным барьером для использо-

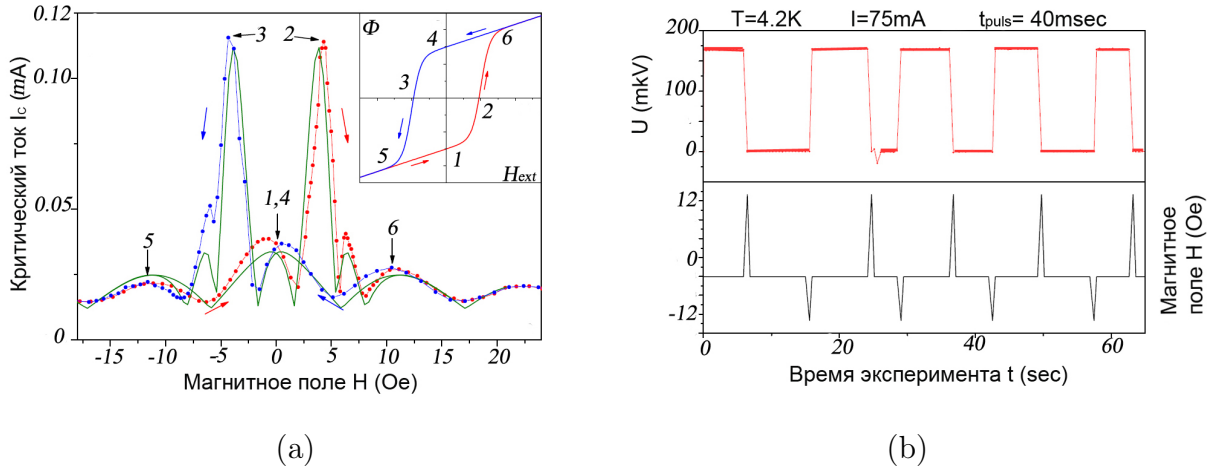


Рис. 7: (а)- типичная зависимость критического тока джозефсоновского SIFS контакта ( $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ ) с  $PdFe$  барьером от внешнего магнитного поля: сплошная линия - аппроксимация; на вставке - восстановленная петля намагниченности F-слоя, характерные точки пронумерованы. Стрелками показано направление изменения поля. (б)- демонстрация переключений между двумя состояниями джозефсоновского SIFS контакта с  $PdFe$  барьером импульсами магнитного поля.

вания джозефсоновских переключателей в сверхпроводниковой цифровой электронике в качестве совместимых и низко-диссипативных элементов памяти. Отмечено, что использование SFS контактов без туннельного барьера, описанных в Главе 4, невозможно в связи с низкими джозефсоновскими частотами переключения ( $f_J \sim$  нескольких МГц), которые определяются низкими характеристическими напряжениями низкоомных SFS контактов:  $f_J = V_c/\Phi_0$ , где  $\Phi_0$ -квант магнитного потока. Применение SIFS контактов  $Nb - AlO_x - Ni - Nb$ , обсуждавшихся в Главе 3, также затруднено из-за высоких полей перемagnetивания никелевых слоев. Опыт приготовления и исследования SIFS контактов, представленных в главе 3, показал, что осаждение магнитного слоя непосредственно на окисный слой  $AlO_x$  приводит к его заметной деградации. Поэтому наряду с изготовлением джозефсоновских контактов  $Nb - AlO_x - Pd_{0.99}Fe_{0.01} - Nb$  решено было приготовить и исследовать контакты  $Nb - AlO_x - Nb - Pd_{0.99}Fe_{0.01} - Nb$  с тонким промежуточным ниобиевым слоем, т.е. взять за основу хорошо отработанную технологию джозефсоновских туннельных контактов  $Nb - AlO_x - Nb$ .

В разделе 5.2 представлены результаты транспортных измерений SIFS контактов с ферромагнитным слоем из  $PdFe$  и туннельным барьером. Рис.7(а)) демонстрирует, что зависимость  $I_c(H)$  проявляет заметный гистерезис, как и в случае джозефсоновских SFS контактов  $Nb - PdFe - Nb$ . Также было показано, что собственное магнитное поле транспортного тока может быть использовано для получения асимметричного сдвига центральных "фраунгоферовских" пиков относительно нулевого

поля и реализации двух различных значений  $I_c$  при  $H=0$ . Были проведены исследования временной устойчивости магнитных состояний F-слоя, которые показали, что критический ток, а следовательно и намагниченность  $PdFe$ -слоя остается неизменной, по крайней мере, в течение 7 часов.

В разделе 5.3 обсуждаются эксперименты по переключению джозефсоновских SIFS контактов импульсами внешнего магнитного поля (Рис.7(b)), которые показали, что характерное джозефсоновское напряжение  $V_c$  SIFS контактов почти на 5 порядков превышает  $V_c$  SFS контактов, что обеспечивает джозефсоновские частоты переключений в гигагерцовом диапазоне, характерном для цифровой сверхпроводящей (RSFQ) электроники.

**В Заключение** приведены основные результаты работы:

1. Проведены исследования зависимости критического тока SIFS-контактов  $Nb - AlO_x - Ni - Nb$  с сильным ферромагнитным и туннельным слоями от толщины никелевого F-слоя в широком интервале толщин. Обнаружен переход в  $\pi$ -состояние с инверсным джозефсоновским ток-фазовым соотношением как при изменении толщины ферромагнитного слоя, так и при изменении температуры.

2. Реализованы и исследованы джозефсоновские SFS-контакты  $Nb - Pd_{0.99}Fe_{0.01} - Nb$  с магнитомягкой ферромагнитной прослойкой, проявляющие неоднозначную гистерезисную зависимость критического тока от магнитного поля. Разработан метод "джозефсоновской магнитометрии" основанный на извлечении данных о перемагничивании тонкого ферромагнитного слоя из джозефсоновских характеристик.

3. Реализованы джозефсоновские SIFS-контакты  $Nb - AlO_x - (Nb) - PdFe - Nb$  с магнитомягким ферромагнитным ( $PdFe$ ) и туннельным ( $AlO_x$ ) слоями. Введение туннельного слоя существенно увеличило характеристическое напряжение и позволило уменьшить джозефсоновское время переключения контактов почти на 5 порядков.

4. Продемонстрированы переключения SFS и SIFS контактов импульсами магнитного поля между двумя состояниями с разными значениями критического тока. Показана возможность практического использования магнитных джозефсоновских переключателей в качестве быстродействующих элементов памяти в сверхпроводниковой цифровой электронике.

**В Приложении** находится CD-диск с универсальной программой автоматизации экспериментов в среде LabView и чертежами установок выполненными в 3D-формате (SolidWorks).

**Материалы диссертации опубликованы в работах:**

- [A1]. A.A. Bannikh, J. Pfeiffer, V.S. Stolyarov, I.E. Batov. V.V. Ryazanov, M. Weides, "Josephson tunnel junctions with a strong ferromagnetic interlayer" , Phys. Rev. B. **79**, 054501 (2009).
- [A2]. В.В. Большинов, В.С. Столяров, Д.С. Собанин, А.Л. Карпович, В.В. Рязанов, "Магнитные переключатели на основе джозефсоновских переходов Nb-PdFe-Nb с магнитомягкой ферромагнитной прослойкой" , Письма в ЖЭТФ, том **95**, вып. 7, с.408-413., (2012)
- [A3]. T. I. Larkin, V.V. Bol'ginov, V.S. Stolyarov, V.V. Ryazanov, I.V. Vernik, S.K. Tolpygo and O. A. Mukhanov, "Ferromagnetic Josephson switching device with high characteristic voltage" , Appl. Phys. Lett. **100**, 222601, (2012)

## Список литературы

- [1] А.И. Ларкин, Ю.Н. Овчинников, "Неоднородное состояние сверхпроводников" , ЖЭТФ, **47**, 1136 (1964).
- [2] P.Fulde and R.A. Ferrell, "Superconductivity in a Strong Spin-Exchange Field" , Phys. Rev. **135**, A550 (1964)
- [3] А. И. Буздин, Л. Н. Булаевский, С. В. Панюков, "Осцилляции критического тока в зависимости от обменного поля и толщины ферромагнитного металла (F) в джозефсоновском контакте S-F-S" , Письма в ЖЭТФ, **35**, 147 (1982).
- [4] А.И. Буздин, Б. Вуйчич, М.Ю. Куприянов, "Структуры сверхпроводник-ферромагнетик" , ЖЭТФ, **101**. 231 (1992).
- [5] А.И. Буздин, Л.Н. Булаевский, М.Л. Кулич, С.В. Панюков "Магнитные сверхпроводники" , **144**, УФН, с.597–641 (1984)
- [6] В.В. Рязанов "Джозефсоновский  $\pi$ -контакт сверхпроводник - ферромагнетик - сверхпроводник как элемент квантового бита (эксперимент)" , УФН, **169** 920 (1999).
- [7] A.V. Veretennikov, V.V. Ryazanov, V.A. Oboznov, A.Yu. Rusanov, V.A. Larkin and J. Aarts, "Supercurrents through the superconductor–ferromagnet–superconductor (SFS) junctions" , Physica B **248**, 495-496 (2000).
- [8] V. V. Ryazanov, V. A. Oboznov, A. Y. Rusanov, A. V. Veretennikov, A. A. Golubov, and J. Aarts, "Coupling of two superconductors through a ferromagnet: evidence of a pi-junction" , Phys. Rev. Lett. **86**, 2427 (2001).

- [9] S. M. Frolov, D. J. Van Harlingen, V. A. Oboznov, V. V. Bolginov, and V. V. Ryazanov, "Measurement of the current-phase relation of superconductor/ferromagnet/superconductor  $\pi$  Josephson junctions" , Phys. Rev B **70**, 144505 (2004).
- [10] H. Sellier, C. Baraduc, F. Lefloch and R. Calemczuk, "Temperature-induced crossover between 0 and  $\pi$  states in S/F/S junctions" , Phys. Rev. B **68**, 054531 (2003).
- [11] V. A. Oboznov, V. V. Bol'ginov, A. K. Feofanov, V. V. Ryazanov and A. I. Buzdin, "Thickness Dependence of the Josephson Ground States of Superconductor-Ferromagnet-Superconductor Junctions" , Phys. Rev. Lett. **96**, 197003 (2006).
- [12] Y. Blum, A. Tsukernik, M. Karpovski and A. Palevski, "Oscillations of the Superconducting Critical Current in Nb-Cu-Ni-Cu-Nb Junctions" , Phys. Rev. Lett. **89**, 187004 (2002).
- [13] C. Bell, R. Loloee, G. Burnell and M. G. Blamire, "Characteristics of strong ferromagnetic Josephson junctions with epitaxial barriers" , Phys. Rev. B **71**, 180501 (2005).
- [14] V. Shelukhin, A. Tsukernik, M. Karpovski, Y. Blum, K. B. Efetov, A. F. Volkov, T. Champel, M. Eschrig, T. Lofwander, G. Schon and A. Palevski, "Observation of periodic  $\pi$ -phase shifts in ferromagnet-superconductor multilayers" , Phys. Rev. B **73**, 174506 (2006).
- [15] J.W.A. Robinson, S. Piano, G. Burnell, C. Bell and M. G. Blamire, "Critical Current Oscillations in Strong Ferromagnetic  $\pi$  Junctions" , Phys. Rev. Lett. **97**, 177003 (2006).
- [16] T. Kontos, M. Aprili, J. Lesueur and X. Grison, "Josephson Junction through a Thin Ferromagnetic Layer: Negative Coupling" , Phys. Rev. Lett. **89**, 137007 (2002).
- [17] M. Weides, M. Kemmler, H. Kohlstedt, R. Waser, D. Koelle, R. Kleiner, and E. Goldobin, "0- $\pi$  Josephson Tunnel Junctions with Ferromagnetic Barrier" , Phys. Rev. Lett. **97**, 247001 (2006)
- [18] A. S. Vasenko, A. A. Golubov, M. Y. Kupriyanov, and M. Weides, "Properties of tunnel Josephson junctions with a ferromagnetic interlayer" , Phys. Rev. B **77**, 134507 (2008).

- [19] Л.Н. Булаевский, В.В. Кузий, А.А. Собянин, "Сверхпроводящая система со слабой связью с током в основном состоянии" , Письма в ЖЭТФ **25**, 314 (1977).
- [20] S. M. Frolov, M. J. A. Stoutimore, T. A. Crane, D. J. Van Harlingen, V. A. Oboznov, V. V. Ryazanov, A. Ruosi, C. Granata, and M. Russo, "Imaging spontaneous currents in superconducting arrays of Josephson  $\pi$ -junctions" , Nature Physics **4**, 32 (2008).
- [21] E. Terzioglu and M. R. Beasley, "Complementary Josephson junction devices and circuits: a possible new approach to superconducting electronics" , IEEE Trans. Appl. Supercond. **8**, 48 (1998).
- [22] A. V. Ustinov and V. K. Kaplunenko, "Rapid single-flux quantum logic using  $\pi$ -shifters" , J. Appl. Phys. **94**, 5405 (2003).
- [23] L. B. Ioffe, V. B. Geshkenbein, M. V. Feigel'man, A. L. Fauch'ere and G. Blatter, "Environmentally decoupled SDS-wave Josephson junctions for quantum computing" , Nature, **398**, 679 (1999).
- [24] G. Blatter, V. B. Geshkenbein and L. B. Ioffe, "Design aspects of superconducting-phase quantum bits" , Phys. Rev. B **63**, 174511 (2001)
- [25] A. K. Feofanov, V. A. Oboznov, V. V. Bol'ginov, J. Lisenfeld, S. Poletto, V. V. Ryazanov, A. N. Rossolenko, M. Khabipov, D. Balashov, A. B. Zorin, P. N. Dmitriev, V. P. Koshelets and A. V. Ustinov, "Implementation of superconductor/ferromagnet/superconductor  $\pi$ -shifters in superconducting digital and quantum circuits" , Nature Physics **6** 593 (2010)
- [26] K.K. Likharev and V.K. Semenov, "RSFQ logic/memory family: A new Josephson junction technology for sub-terahertz-clock frequency digital systems" , IEEE Trans Appl. Supercond. **1**, 3 (1991).
- [27] R. Held, J. Xu, A. Schmehl, C.W. Schneider, J. Mannhart, and M.R. Beasley, "Superconducting memory based on ferromagnetism " , Appl. Phys. Lett. **89**, 163509 (2006).
- [28] A. B. Pippard, "Experimental analysis of the electronic structure of metals" , Rep. Prog. Phys. **23**, 176 (1960).
- [29] M. Weides, "Magnetic anisotropy in ferromagnetic Josephson junctions" , Appl. Phys. Lett. **93**, 052502 (2008).

- [30] V.V. Ryazanov, V.A. Oboznov, A.S. Prokofiev, V.V. Bolginov, and A.K. Feofanov, "Superconductor-ferromagnet-superconductor pi-junctions' , J. Low Temp. Phys. **136**, 385 (2004).
- [31] D. Y. Petrovykh, K. N. Altmann, H. Höchst, M. Laubscher, S. Maat, G. J. Mankey, and F. J. Himpsel, "Spin-dependent band structure, Fermi surface, and carrier lifetime of permalloy" , Appl. Phys. Lett. **73**, 3459 (1998).
- [32] Robert Karplus, J. M. Luttinger, "Hall Effect in Ferromagnetics" , Phys. Rev. **95**, 1154–1160 (1954) .