

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Неило Алексей Александрович

**Спин-вентильные структуры для сверхпроводниковой
электроники**

Специальность 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2025

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, на физическом факультете, на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники.

Научный Бакурский Сергей Викторович

руководитель: кандидат физико-математических наук

Официальные Шукринов Юрий Маджнунович

оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент,
Объединенный институт ядерных исследований,
ведущий научный сотрудник лаборатории
теоретической физики

Грановский Александр Борисович

доктор физико-математических наук, профессор,
МГУ имени М.В. Ломоносова, физический
факультет, профессор кафедры магнетизма

Бобкова Ирина Вячеславовна

доктор физико-математических наук, доцент,
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
зав. лабораторией спиновых явлений в сверхпроводниковых
наноструктурах, Центр перспективных
методов мезофизики и нанотехнологий МФТИ

Защита состоится 18 декабря 2025 года в 15-30 по мск. времени на заседании диссертационного совета МГУ.013.7 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. Физический факультет МГУ, ауд. Н-16.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М.В.Ломоносова и на сайте <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3634>

Е-mail (диссертационного совета) : igorkartashov@mail.ru

Автореферат разослан

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.013.7

кандидат физико-математических наук.

И.Н. Карташов

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Данная работа мотивирована как желанием расширить наше понимание поведения электронных коллективов в тонких пленках проводящих материалов, так и потребностями современной спинтроники и сверхпроводниковой электроники. Актуальность исследования обусловлена тем, что целый ряд перспективных элементов вычислительных устройств (включая, например, мемристоры и спиновые вентили) содержит гетероструктуры с большим количеством ферромагнитных, металлических и диэлектрических слоев с толщиной порядка 1-10 нм [1—4]. При миниатюризации в тонкопленочных технологиях возникает необходимость учитывать особенности поведения электронных коллективов в подобных гибридных наноструктурах. Ярким примером проявления таких особенностей является необходимость учета спин-орбитального взаимодействия (СОВ) в структурах с тонкими квазидвумерными пленками. Для изучения подобных эффектов требуется согласованный совместный теоретико-экспериментальный анализ.

Часто для уменьшения влияния тепловых шумов в прецизионных материаловедческих исследованиях используют криогенную технику. Например, широкое распространение получила низкотемпературная сканирующая-туннельная (СТМ) и магнитно-силовая микроскопия [5—7]. Она позволяет из экспериментальных данных по плотности состояний (ДОС) эффективно определять степень влияния несверхпроводящего материала на спектр возбуждений в тонком слое сверхпроводника, контактирующем с данным изучаемым материалом.

Кроме того, само по себе развитие сверхпроводниковой электроники может быть полезно в развитии целого ряда применений, начиная с энергоэффективных супер-компьютерных и нейроморфных вычислений и заканчивая квантовыми процессорами [8; 9]. Одним из примеров элементов сверхпроводниковой электроники на основе гибридных тонкопленочных структур являются устройства криогенной памяти. Наиболее известные из них представляют из себя гетероструктуры со слоями магнитных и сверхпроводя-

щих материалов, свойства электронного коллектива и сверхпроводящий ток, в которых можно контролируемым образом менять при помощи относительно слабых магнитных полей. Это так называемые спиновые вентили [10; 11]: в зависимости от ориентаций намагниченности в паре слоев магнитного материала меняются особенности токового транспорта через такие системы. Однако изготовление подобных устройств представляет из себя непростую задачу с технической точки зрения. Поэтому одна из целей данного исследования - найти способ упростить реализацию подобных элементов спинтроники.

Цель работы и задачи

Целью работы является развитие методов теоретического описания электронного транспорта в гибридных многослойных структурах, содержащих сверхпроводящие (S), ферромагнитные (F), нормальные (N) металлы, диэлектрические прослойки (I) для усовершенствования способов анализа электронных корреляций и процессов переноса в составных твердотельных системах. Также задачей ставится поиск применений новых физических эффектов, возникающих в многослойных гибридных структурах для создания более эффективных спиновых вентилях и других устройств сверхпроводниковой электроники.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования в диссертационной работе являются гибридные сверхпроводящие гетероструктуры, содержащие слои сверхпроводников (S), ферромагнетиков (F), изоляторов (I) и нормальных металлов (N), а также нормальных металлов со спин-орбитальным взаимодействием (N_{SO}). В частности, детально изучаются системы типов бислои S-F/N, SIsFS структура с тонким s слоем, гетероструктуры со спин-орбитальным взаимодействием $sN_{SO}F$ и $SIsN_{SO}F$, а также спин-вентильная структура $SF_1S_1F_2s$ и ее модификации - джозефсоновский вентиль $SF_1S_1F_2sIS$ и вентиль кинетической индуктивности $SF_1S_1F_2sN$. Предметом исследования являются функции распределения электронной плотности в данных структурах, а также материальные характеристики материалов, такие, как обменная энергия, длины когерентности, прозрачность границы и т.д.

Научная новизна

В работе впервые сопоставлены экспериментальные данные по электронным спектрам в плотности состояний с расчетами микроскопической модели в CuNi/Nb-бислоях. Получено объяснение аномальных подщелевых состояний, возникающих вследствие конкуренции сверхпроводящего и ферромагнитного электронного упорядочения. Впервые продемонстрирована и объяснена сильная пространственная неоднородность электронных свойств поверхности CuNi в рамках гипотезы о существовании кластеров с различной концентрацией. Впервые рассчитана зависимость плотности состояний s-слоя в диффузных SIsFS-структурах от толщины ферромагнетика, прозрачности границ и величины обменного взаимодействия.

Впервые проведено комплексное исследование спин-вентильного эффекта в грязных $SF_1S_1F_2s$ -структурах с тонким s-слоем. Получена количественная оценка максимальной величины изменения сверхпроводящего параметра порядка в системе при изменении взаимной ориентации векторов намагниченности F_1 и F_2 слоев. Определен оптимальный набор материальных параметров и толщин пленок структуры обеспечивающих достижение этого эффекта. Предложен новый механизм триггерного управления сверхпроводимостью в s-слое за счёт изменения магнитной конфигурации ферромагнитных слоёв. Впервые обнаружено нелинейное поведение кинетической индуктивности в $SF_1S_1F_2sN$ -схеме и критического тока в $SF_1S_1F_2sIS$ -структуре в зависимости от угла разориентации намагниченности. Было показано, что наличие низкоомного нормального металла в многослойных SF системах усиливает спин-вентильный эффект и позволяет перераспределять ток в структуре.

Впервые проведены теоретические расчеты электронных корреляций в диффузных $sN_{SO}F$ -структурах (SO - spin orbit) с s сверхпроводником, F ферромагнетиком и N_{SO} слоем нормального металла со спин-орбитальным взаимодействием. Показана роль спин-орбитального взаимодействия в подавлении триплетных корреляций в подобной структуре, приводящей к усилению синглетной сверхпроводимости в s-слое. Предложена новая конструкция джозефсоновского спинового клапана на основе $SIsN_{SO}F$ -структуры, обеспечивающая как дискретное переключение меж-

ду различными его состояниями, так и плавное изменение критического тока за счёт переориентации намагниченности F-слоя относительно кристаллографических осей в N_{50} -слое. Впервые установлены оптимальные геометрические параметры (толщины слоёв) и условия (температура, параметры COB), при которых достигается максимальный эффект изменения джозефсоновского критического тока вследствие перемагничивания.

Научно-практическая ценность диссертации

1. Для фундаментальной науки:

В ходе исследования было углублено понимание механизмов эффекта близости в SF-системах. В частности, было изучено влияние парамагнитного рассеяния и доменной структуры на подавление сверхпроводимости. Кроме того, разработана теоретическая модель, описывающая поведение триплетных корреляций в условиях сосуществования ферромагнетизма и спин-орбитального взаимодействия.

2. Для прикладных технологий:

Теоретически обоснованы новые элементы сверхпроводниковой электроники, включая энергонезависимые спиновые вентили для криогенной памяти, управляемые джозефсоновские переходы, а также устройства с перестраиваемой кинетической индуктивностью, применимые в детекторах и параметрических усилителях. Продемонстрирована возможность создания компактных и энергоэффективных криогенных устройств, в том числе компонентов для квантовых компьютеров и центров обработки данных. Теоретический анализ экспериментальных данных по структурам CuNi/Nb подтвердил перспективность использования разбавленных ферромагнетиков в высокочастотной сверхпроводниковой электронике.

3. Для экспериментальных исследований:

Разработанные теоретические подходы к анализу данных ДОС-спектроскопии могут быть использованы для технологического контроля при производстве джозефсоновских переходов и других сверхпроводниковых устройств. Определены оптимальные параметры гетероструктур на основе ниобия и других сверхпроводников, что может служить руководством для их экспериментального изготовления. Также обоснованы перспектив-

ные направления дальнейших исследований, в том числе применение материалов со спин-орбитальным взаимодействием.

Методология диссертационного исследования

Методологической основой диссертации является численное решение нелинейных уравнений Узаделя в рамках микроскопической теории сверхпроводимости для многослойных диффузных структур. Для анализа электронных свойств используется самосогласованный расчет пространственных распределений параметра порядка и функций Грина с последующим определением плотности состояний и вольт-амперных характеристик. Верификация модели проводится через сопоставление расчетных данных туннельной спектроскопии с экспериментальными результатами для сверхпроводящих бислоев.

Положения, выносимые на защиту

1) Разработанные теоретические модели и численные алгоритмы для расчета эффекта близости в многослойных структурах, содержащих ферромагнитные (F) и сверхпроводящие (S) материалы, позволяют из данных туннельной спектроскопии не только выявить качественные изменения в плотности состояния (открытие/закрытие щели в спектре электронных состояний, зеемановское расщепление особенностей спектра, изменение величины мини-щели и появление подщелевых состояний в окрестности уровня Ферми), но и установить соответствие этих особенностей с материальными и геометрическими параметрами исследуемых наноструктур.

2) Спин-триггерный эффект в многослойных гибридных структурах $SF_1S_1F_2S$ -типа позволяет изменять сверхпроводящий параметр порядка управляемого s-слоя на 100% путем изменения угла разориентации векторов намагниченности F слоев. Это открывает возможность для создания высокоэффективного спинового джозефсоновского вентиля, который способен переключаться между 0- и π -состояниями, обладающими высокими значениями характеристического напряжения.

3) Спиновый вентиль по управлению кинетической индуктивностью может работать как в линейном, так и в нелинейном режимах путем управления током смещения или изменением угла разориентации векторов на-

магнитности F слоев.

4) Спин-орбитальное взаимодействие смешанного типа, включающее механизмы спинового рассеяния Рашбы и Дрессельхауса в слое нормального металла N_{SO} спинового вентилля $sN_{SO}F$ -типа позволяет создать структуру с управляемым эффектом близости с использованием единственного ферромагнитного слоя.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием в теоретических расчетах микроскопической теории сверхпроводимости, оптимальным выбором физических моделей, отражающих основные свойства исследуемых систем, а также и согласованием рассчитанных зависимостей с экспериментальными данными. Полученные результаты были представлены на 8 конференциях:

- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, Россия, 2019-2024);
- SPINTECH Summer school “S/F Hybrid Structures for Spintronics”, Кишинев, Молдова, Республика, 2019;
- 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, Россия, 2020;
- Superconducting Spintronics Alternative, Stockholm, Sweden, Швеция, 2022;
- International Annual School “Superconducting Quantum Hardware” (SQH-2022), Казань, Россия, 2022;
- International Workshop "Superconducting and Magnetic Hybrid Structures Дубна, Россия, 2023, 2025;
- XXIX Международный симпозиум “Нанопизика и наноэлектроника”, г. Нижний Новгород, Россия, 2025;

Результаты работы отражены в 10 статьях в научных журналах $|A1|$ - $|A10|$, 9 из них ($A1|$ - $|A9|$) - в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Личный вклад автора

В диссертации приведены результаты, полученные непосредственно автором или при его активном участии. Автором лично были разработаны программы для решения поставленных задач, проведены как численные, так и аналитические расчеты для получения представленных результатов. Совместно с соавторами диссертант непосредственно участвовал в постановке задачи, написании научных статей, подготовке и представлении докладов на научных конференциях.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 4 глав, включая обзор литературы, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 144 страницы, включая 57 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 263 наименования.

Основное содержание работы

Диссертационная работа начинается с **Главы 1: Обзор состояния исследований свойств электронных коллективов в тонкопленочных структурах**. В разделе 1.1 излагается формализм описания микроскопической теории сверхпроводимости. Начиная с подхода Боголюбова-де Жена и описания с помощью функций Грина, формализм приходит к квазиклассическому представлению и уравнениям Узаделя, которые используются как основной инструмент исследований в данной работе. Далее в части 1.2 следует объяснение эффекта Джозефсона, выступающего важным механизмом для реализации и последующего интегрирования разрабатываемых криогенных устройств в сверхпроводящие схемы.

В разделе 1.3 рассматривается задача о контакте сверхпроводящих и несверхпроводящих материалов и их взаимном влиянии на электронные коллективы друг друга. Основываясь на Андреевском отражении, рассказывается об эффекте близости сверхпроводника и нормального металла. В части 1.4 представлено объяснение физики ферромагнитно-сверхпроводящих структур: осцилляционного поведения сверхпроводящих функций, проникающий в F-слой; 0- π -контактах; триплетной сверхпроводимости. Также приводятся основные моменты описания спин-

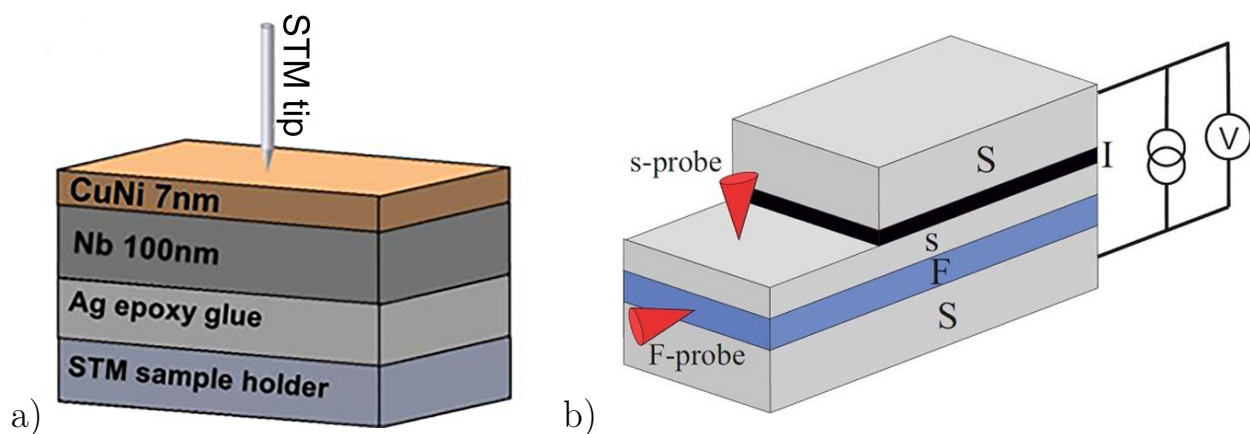


Рис. 1: Схема эксперимента по сканирующей туннельной спектроскопии в бислое Nb/CuNi. Туннельные спектры измерялись на поверхности слоя CuNi. b - Схема SI/FS джозефсоновской структуры с возможным подходом к измерению плотности состояний в F и s-пленках и вольт-амперных зависимостей перехода.

орбитального взаимодействия в формализме уравнений Узаделя.

Раздел 1.5 посвящен обзору о сверхпроводящих спиновых клапанах (ССК). Здесь показаны основные теоретические работы и экспериментальные достижения в наиболее распространенных схемах ССК по управлению критической температурой. Потом следует описание основных схем джозефсоновских спиновых клапанах по управлению критическим током.

Глава 2: Определение параметров сверхпроводниковых многослойных структур с эффектом близости на основе спектроскопии посвящена изучению сверхпроводящих корреляций в составных гетероструктурах со сверхпроводящими, ферромагнитными и нормально-металлическими слоями при наличии слабой связи между ними (по материалам работы [A2]).

Теоретической основой исследования является численное решение самосогласованных уравнений Узаделя [12] в Φ -параметризации с граничными условиями Купрянова-Лукичёва [13]. Для расчета использовался устойчивый алгоритм, сочетающий метод трехдиагональной прогонки [14] и релаксационный метод. На первом этапе рассчитывалось пространственное распределение самосогласованного параметра порядка $\Delta(x)$, а на втором — проводилось аналитическое продолжение на вещественную ось энергий

($\omega = -\epsilon E$) для вычисления ДОС как $N(E, x) = \text{Re } G(E, x)$. Для сопоставления с экспериментальными данными сканирующей туннельной спектроскопии (СТС) квазичастичный ток через туннельный барьер рассчитывался по формуле $I = \frac{1}{eR_N} \int_{-\infty}^{\infty} N_1(E - eV)N_2(E)[f(E - eV) - f(E)]dE$, где N_1 и N_2 — плотности состояний по разные стороны барьера, $f(E)$ - функция распределения квазичастиц, R_N - нормальное сопротивление границы.

В разделе 2.1 был проведен детальный теоретический анализ гибридного бислоя сверхпроводник-ферромагнетик/нормальный металл (S-F/N) на примере системы Nb/CuNi (рис. 1a). Путем сопоставления экспериментальных данных локальных туннельных спектров на поверхности слоя CuNi, полученных методом СТМ/СТС, с результатами численного моделирования изучено влияние ключевых параметров (толщины слоя d_N , прозрачности границы γ_B , парамагнитного рассеяния α_T , длины когерентности ξ_N и обменной энергии E_{ex}) на форму ДОС и дифференциальной проводимости dI/dV . Установлено, что наблюдаемое разнообразие экспериментальных спектров обусловлено сильной пространственной неоднородностью слоя CuNi, который представляет собой сеть из ферромагнитных (F) и немагнитных (N) кластеров с различными материальными и геометрическими параметрами. Теоретические данные, с помощью которых аппроксимировались экспериментальные зависимости, (рис. 2) подтверждают это обстоятельство и показывают, что обменная энергия такого неоднородного сплава является важным параметром, сильно влияющим на ДОС. Для наилучшего описания данных был определен набор материальных параметров, характерных для подобных диффузионных структур. Показано, что такая неоднородность может служить физической основой для реализации φ -контактов [15] в джозефсоновских переходах.

В разделе 2.2 исследовались электронные свойства гибридной SIsFS-структуры (Сверхпроводник / Изолятор / тонкий сверхпроводник / Ферромагнетик / Сверхпроводник), представляющей значительный интерес для сверхпроводниковой электроники (рис. 1b), по материалам работы [A3]. Данная система является перспективной в качестве элемента логических схем с высоким характеристическим напряжением [16]. Основное внимание

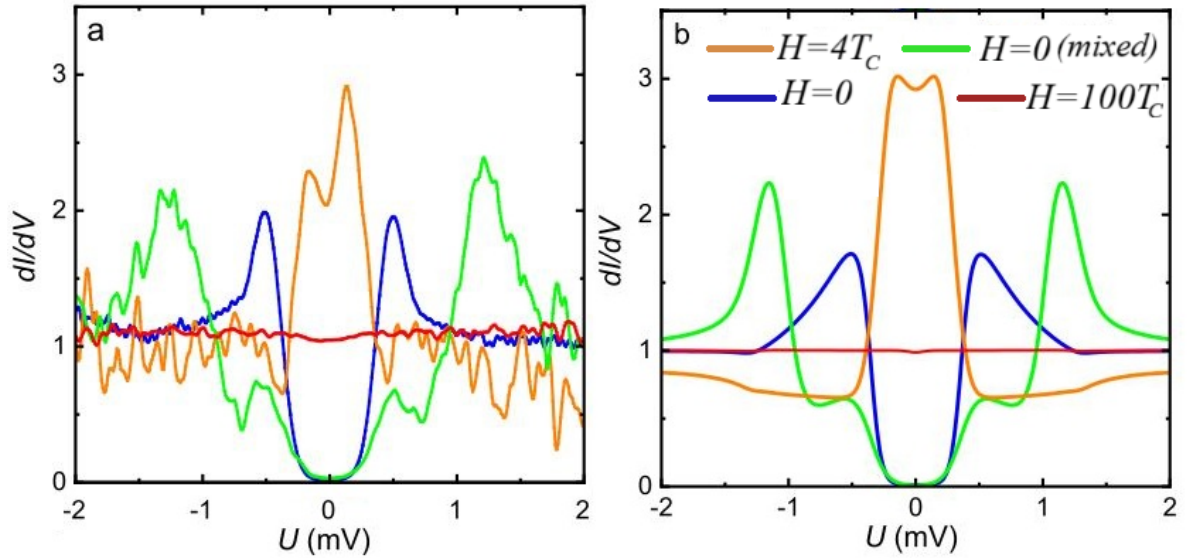


Рис. 2: (а) Зависимости туннельной проводимости dI/dV от напряжения на бислое Nb-CuNi, снимаемые с поверхности сплава CuNi. (б) Теоретический расчет, сопоставляющийся с экспериментальными данными панели (а), для разных значений обменной энергии H .

уделено анализу взаимного влияния электронных коллективов в ферромагнитном (F) и тонком сверхпроводящем (s) слоях, которое проявляется в модификации их плотностей состояний. Методом численного моделирования систематически изучена зависимость ДОС в s- и F-слоях от толщины d_s , обменной энергии E_{ex} , толщины F-слоя d_F и прозрачности границы раздела γ_B .

В результате было показано, что конкуренция между различными механизмами эффекта близости (влияние объемного S-электрода, взаимодействие между s- и F-слоями) приводит к формированию сложных особенностей в ДОС, таких как подщелевые состояния, пики при нулевой энергии и расщепленные когерентные пики. Эти особенности, в свою очередь, непосредственно влияют на форму ВАХ всей SIsFS-структуры, обуславливая появление дополнительных пиков и изменение наклона резистивной ветви. Проанализировано поведение системы в окрестности 0- π перехода; продемонстрировано, что переход может быть определен вследствие определенных изменений в ДОС на поверхности s-слоя, что открывает путь к косвенному экспериментальному определению его фазового состояния - то есть в 0- или π -состояниях находится система.

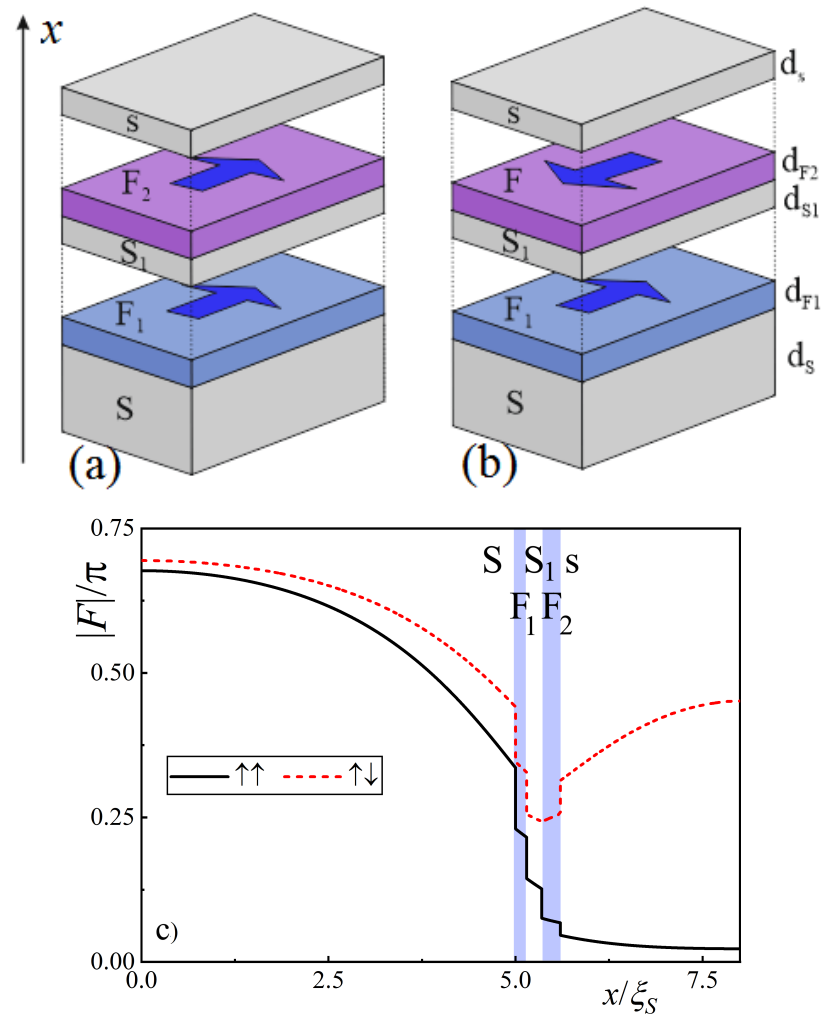


Рис. 3: Эскиз $SF_1S_1F_2s$ -структуры в П (a) и АП (b) ориентациях намагниченности. (c) Пространственные распределения модуля амплитуды спаривания F на первой мацубаровской частоте рассчитанные для $\xi_F/\xi_S = 2.5$, $d_s = 2.5\xi_S$ и П- и АП-ориентаций (черные сплошные и красные пунктирные линии соответственно).

Глава 3: Спиновый вентиль на базе многослойных SF структур посвящена теоретическому анализу сверхпроводящих ферромагнитных гетероструктур типа $SF_1S_1F_2s$ и их применению в качестве ключевых элементов сверхпроводниковой электроники: спиновых вентилях, управляемых джозефсоновских переходов и перестраиваемых кинетических индукторов. В рамках данной главы решалась комплексная задача по моделированию эффекта близости в случае неколлинеарной намагниченности, расчету критических токов и кинетической индуктивности в многослойных системах с двумя ферромагнетиками.

В разделе 3.1 детально исследован спин-триггерный эффект в базовой структуре $SF_1S_1F_2s$ (рис. 3а,б), по материалам работы [А6]. Методом самосогласованного численного решения уравнений Узаделя установлено, что переключение взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев F_1 и F_2 из параллельной (П) в антипараллельную (АП) конфигурацию приводит к кардинальному изменению параметра порядка Δ_s в тонком внешнем s-слое. Показано, что управление обусловлено триггерным эффектом, суть которого заключается в переводе тонкого сверхпроводникового s-слоя, подавленного обратным эффектом близости со стороны ферромагнетика и нормального металла, в собственное сверхпроводящее состояние за счет проникновения парных корреляций со стороны объемного сверхпроводника S , являющегося дополнительным источником куперовских пар в s-пленке. Это выражается тем обстоятельством, что амплитуда сверхпроводящих корреляций в П-конфигурации заметно меньше чем в АП не только в s-слое, но и в S -электроде на границе с F_1 -ферромагнетиком (рис. 3с).

Из зависимости параметра порядка Δ_s на свободной поверхности s-слоя от его толщины d_s (рис. 4а) следует, что максимальный эффект спинового вентилия достигается при толщине s-слоя $d_s \approx d_{cr}$, где d_{cr} — критическая толщина для возникновения собственной сверхпроводимости. Проведено параметрическое исследование, результатом которого стали карты оптимальных параметров (соотношений ξ_F/ξ_S , ρ_F/ρ_S , толщин слоев d_{F1} , d_{S1} и энергии обмена H), обеспечивающих максимальную величину эффекта $\delta^{max} = |\Delta_s^{AP}| - |\Delta_s^P| \approx T_C$ (рис. 4б).

В разделе 3.2 исследование расширено на джозефсоновский переход $SF_1S_1F_2sIS$ (рис. 5а), по материалам работы [А8]. Показано, что предсказанный триггерный эффект позволяет эффективно управлять критическим током J_c такого перехода. В зависимости от геометрических и материальных параметров структура демонстрирует три режима работы: 1) плавное изменение амплитуды J_c без смены знака; 2) переход между 0- и π -состояниями с скачкообразным или плавным изменением $J_c(\theta)$; 3) переключение только знака J_c при практически неизменной амплитуде, близкой к величине для перехода SIS. Наибольший практический интерес представ-

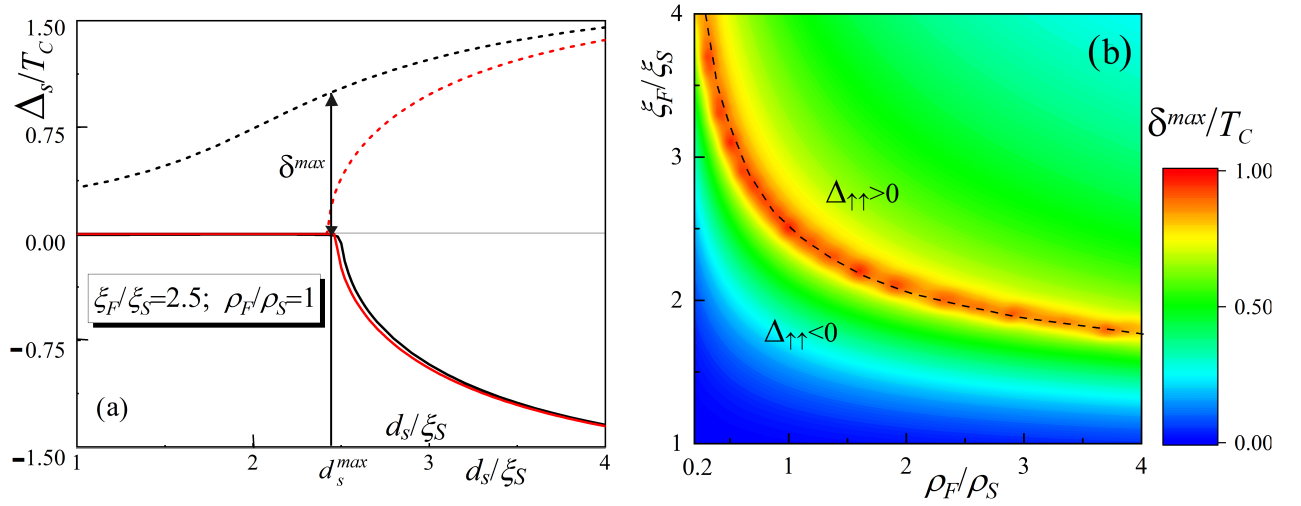


Рис. 4: (a) Зависимость параметра порядка на свободной поверхности s-слоя Δ_s от его толщины d_s в случае П- и АП-ориентаций векторов взаимной намагниченности (сплошные и пунктирные линии соответственно) для структур $SF_1S_1F_2s$ и $F_1S_1F_2s$ (черный и красный цвета соответственно). (b) Карта материальных параметров ферромагнетиков ρ_F , ξ_F для максимальной разницы при перемагничивании δ^{max} (a) и достигаемой при толщинах d_s^{max} (b). Ниже пунктирной линии в П-ориентации Δ в s-слое отрицателен, выше — положителен.

ляет режим плавного перехода с полным подавлением J_c в точке переключения, что позволяет реализовать клапан со 100%-ной величиной модуляции сверхпроводящих свойств в системе (рис. 5b). Установлено, что данный эффект устойчив в температурном диапазоне порядка $0.1T_C$.

В разделе 3.3 предложена и проанализирована концепция перестраиваемого элемента на основе кинетической индуктивности — структуры $SF_1S_1F_2sN$ (рис. 6), по материалам работы [A10]. Продемонстрировано, что добавление низкоомного нормального металла (N) с $\rho_N \ll \rho_S$ усиливает спин-клапанный эффект для индуктивности $\delta L_K = L_K^P - L_K^{AP}$ более чем в 1.5 раза за счет перераспределения продольного транспортного тока в структуре: в АР-состоянии ток эффективно протекает через низкоомный N-слой, снижая общую индуктивность, а в Р-состоянии этот канал закрыт. Поэтому, подобрав толщину s-слоя, можно добиться плавного управления кинетической индуктивностью данной $SF_1S_1F_2sN$ структуры за счет изменения угла разориентации намагниченностей F-слоев (рис. 7a).

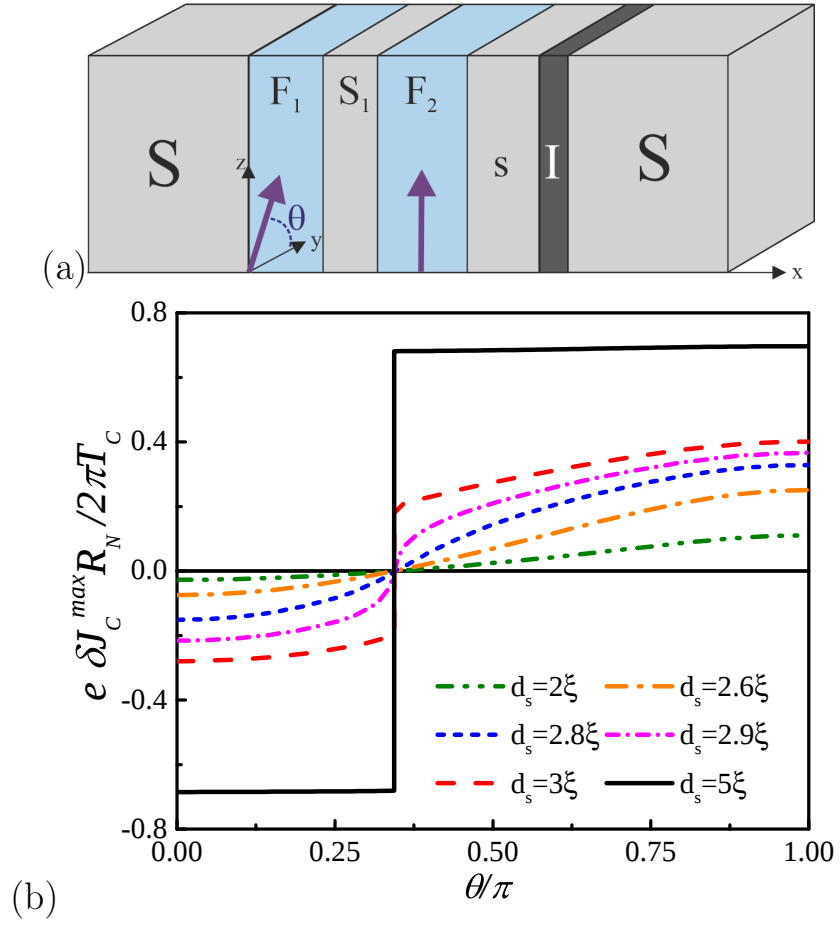


Рис. 5: (а) Схема джозефсоновской структуры $SF_1S_1F_2sIS$ с непрерывным углом θ , описывающим вращение намагниченности в плоскости F_1 -слоя. Намагниченность F_2 -слоя постоянна. (б) Зависимость критического тока J_c от угла вращения θ намагниченности F_1 -слоя для различных толщин d_s s -слоя.

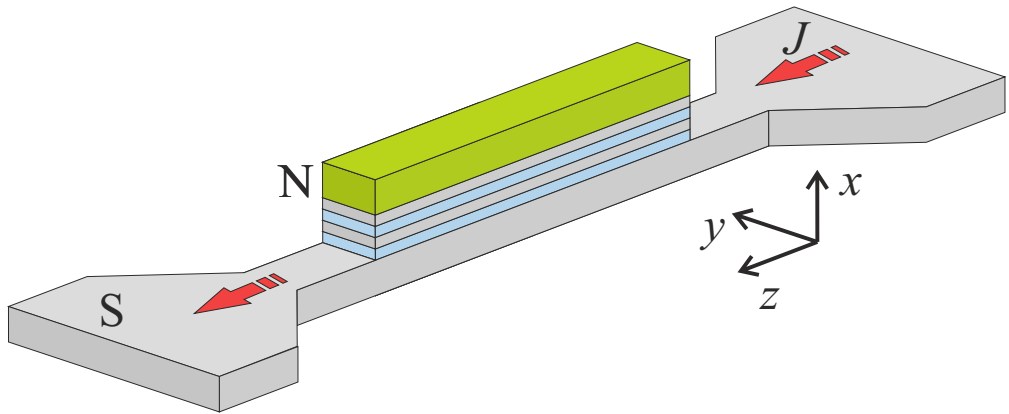


Рис. 6: Схематическое изображение расположения элемента с управляемой кинетической индуктивностью $SF_1S_1F_2sN$ структуры на чипе между двумя широкими сверхпроводниковыми линиями.

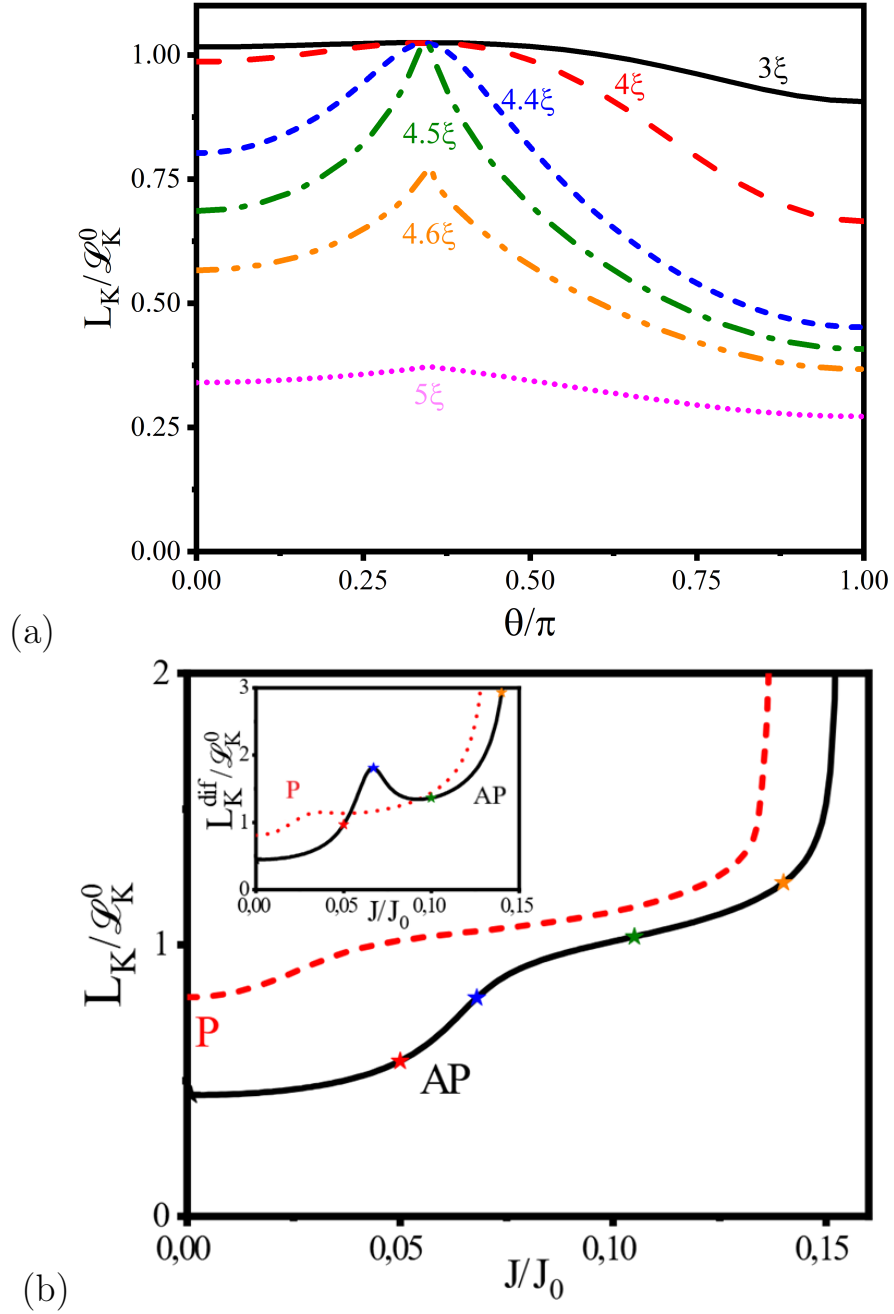


Рис. 7: (а) Зависимость кинетической индуктивности L_K от θ угла разориентации взаимной намагниченности F-слоев для разных толщин s-слоя. (б) Зависимость кинетической индуктивности L_K от тока смещения J для П- и АП-конфигураций намагниченности $\text{SF}_1\text{S}_1\text{F}_2\text{sN}$ структуры (красная штриховая и черная сплошная кривые соответственно).

Также было проведено исследование влияния транспортного тока смещения J на величину L_K путем модернизации исходных уравнений по аналогии с работой [17]. Обнаружено, что зависимость $L_K(J)$ имеет двухступенчатый характер, связанный с последовательным разрушением сверх-

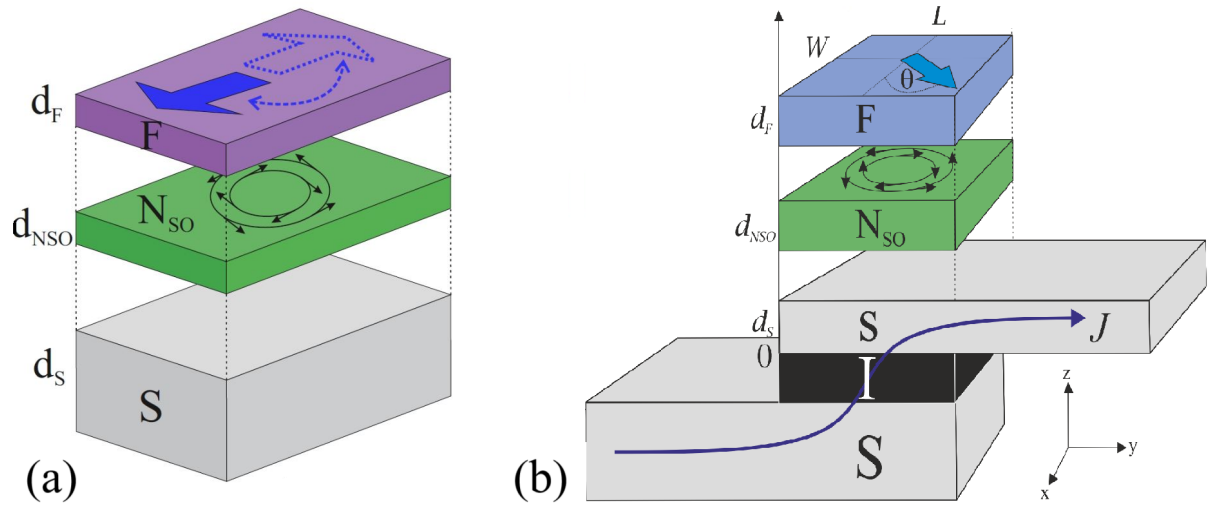


Рис. 8: Схематическое изображение $SN_{SO}F$ (a) и $SIsN_{SO}F$ (b) спиновых вентилях. Направление вектора разориентации между углом намагниченности и кристаллографическими осями N_{SO} -материала верхнего F-слоя может вращаться в плоскости $0xy$.

проводимости сначала в sN-бислое, а затем в объемном S-электроре (рис. 7a). Это открывает перспективы создания нелинейных элементов управления в сверхпроводящей электронике.

Таким образом, в рамках главы 3 теоретически обоснована возможность создания нового класса энергонезависимых и перестраиваемых элементов для сверхпроводниковой электроники на основе управляемых магнитным полем гетероструктур. Определены оптимальные параметры материалов и геометрии слоев для реализации устройств с максимальной эффективностью и предложены конкретные конфигурации для экспериментальной реализации.

Исследование в **главе 4: Спиновые вентили в гибридной SNF структуре со спин-орбитальным взаимодействием в N-слое** посвящено решению ключевой проблемы сверхпроводниковой спинтроники – созданию эффективного и практичного спинового клапана, не требующего постоянного поддержания внешнего магнитного поля для переключения между состояниями. [18].

В разделе 4.1 была поставлена и решена задача теоретического моделирования сверхпроводящей гетероструктуры типа $SN_{SO}F$ (рис. 8a), где S —

сверхпроводник, N_{SO} — нормальный металл со спин-орбитальным взаимодействием, а F — ферромагнетик с управляемой ориентацией намагниченности, по материалам работы [A4]. Для описания системы был применен формализм уравнений Узаделя для запаздывающих функций Грина, модифицированный для учета как обменного поля ферромагнетика $\vec{h}$, так и спин-орбитального взаимодействия типа Рашбы (α) и Дрессельхауса (β) в N -слое. Была численно решена полученная система уравнений с соответствующими граничными условиями, что позволило проанализировать пространственное распределение синглетных (f_0) и триплетных ($f_{1,2,3}$) корреляций и их влияние на сверхпроводящий параметр порядка Δ_S в S -слое.

Ключевым результатом данной части работы стала демонстрация того, что СОВ эффективно подавляет триплетные корреляции, возникающие в ферромагнетике, при определенных ориентациях его намагниченности ($\theta = \pi/4$), что приводит к значительному увеличению параметра порядка по сравнению со случаем без СОВ ($\theta = 3\pi/4$). При этом, с увеличением коэффициентов СОВ увеличивается Δ_S в данных точках (рис. 9a), что указывает на большую защищенность сверхпроводящих свойств спин-орбитальным взаимодействием. Данное явление, обусловленное анизотропным рассеянием электронов, легло в основу принципа работы предложенного спинового вентиля.

В разделе 4.2, опираясь на полученные фундаментальные результаты, был предложен и проанализирован конкретный дизайн джозефсоновского спинового клапана на основе $SI s N_{SO} F$ -структуры (где I — изолятор, s — тонкий сверхпроводящий электрод), рис. 8b, по материалам работы [A5]. Было проведено детальное моделирование эффекта близости в $s N_{SO} F$ -части структуры и рассчитан критический ток J_C джозефсоновского перехода по формуле Амбегаокара-Баратова (рис. 9b).

Исследование выявило два режима работы устройства: при больших толщинах $d_F \gtrsim \xi$ управление током осуществляется за счет модуляции параметра порядка у границы туннельного барьера, а при оптимально подобранных малых толщинах s - и F -слоев ($d_s \approx 2.75\xi_S$, $d_F \approx 0.38\xi_S$) достигается максимальный эффект, при котором одно состояние ($\theta = 3\pi/4$) соответствует практически полному подавлению сверхпроводимости, а дру-

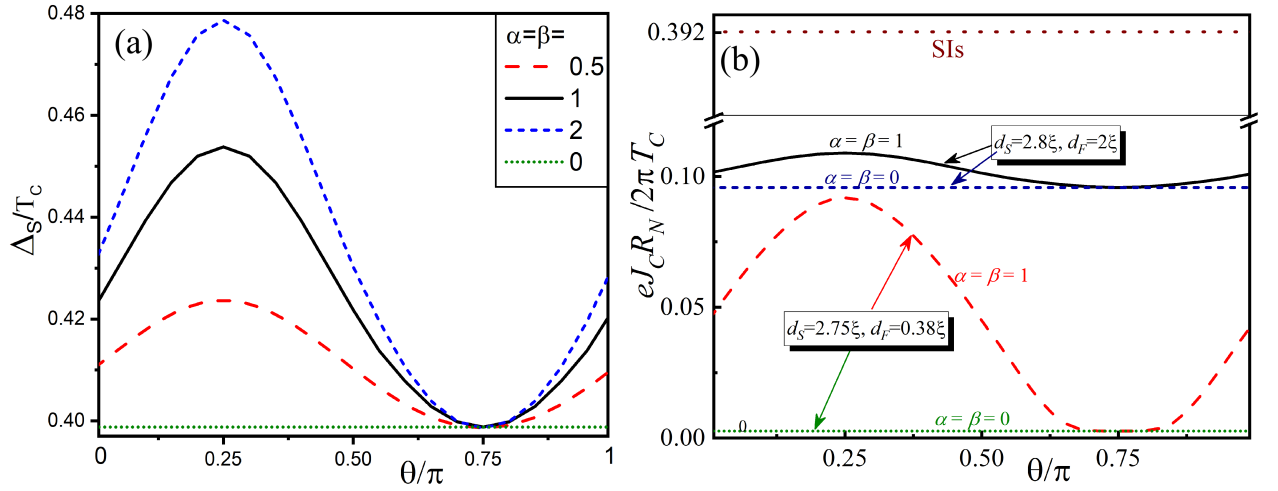


Рис. 9: Зависимости от угла разориентации между углом намагниченности F-слоя и кристаллографическими осями N_{SO} -материала (a) Δ_S параметра порядка на свободной поверхности S-слоя при разных значениях параметров α и β Рашбы и Дроссельхауса спин-орбитальной связи соответственно, а также (b) зависимости критического тока для спинового вентиля $SI/NSO/F$ для разных толщин и параметров COB. Величина туннельного критического тока между двумя объёмными сверхпроводниками обозначена маркером "SI/NS".

ное ($\theta = \pi/4$) — ее сохранению. Важнейшим преимуществом предложенной конструкции является возможность плавного, а не скачкообразного, изменения критического тока в широком диапазоне простым поворотом вектора намагниченности $\vec{M}$, что выгодно отличает ее от классических схем с двумя ферромагнетиками.

Таким образом, в рамках главы 4 была разработана последовательная теоретическая модель, доказавшая принципиальную возможность создания сверхпроводникового спинового клапана на основе одного ферромагнитного слоя за счет управляющего воздействия спин-орбитального взаимодействия.

Заключение

1. Метод джозефсоновской спектроскопии, основанный на анализе плотности состояний, показал высокую эффективность для определения ключевых параметров системы, таких как длины когерентности материа-

лов, удельное сопротивление, параметр прозрачности границ и др. Для Nb/CuNi-бислоев путем теоретического фита СТМ экспериментальных данных было установлено, что в ферромагнитных кластерах CuNi эффективная обменная энергия H может сильно отличаться от значения для чистого никеля. Так, при высоких значениях H (около 1000K) щель в спектре F-слоя полностью закрыта; при величинах H порядка нескольких десятков K формируется высокий нулевой пик на энергии Ферми; при значениях H несколько K и меньше на спектре наблюдается минищель (в данном случае шириной $\delta \sim 0.4$ мэВ), которая может быть существенно меньше щели в объемном Nb ($\Delta_{Nb} = 1.4$ мэВ). Разработанный подход открывает перспективы для дальнейших улучшения настройки технологического процесса в области сверхпроводниковых гибридных систем.

2. ВAX SIsFS-структур позволяют получить информацию о состоянии электронных корреляций (о плотности состояний) в sF области слабой связи. Так в случае толстого ферромагнетика ($d_F = 2\xi_S$) s-слой испытывает влияние только F-слоя и в спектре s-пленки могут наблюдаться подщелевые состояния и уменьшенные когерентные пики. В случае тонкого ферромагнетика ($d_F = 0.5\xi_S$) картина оказывается более сложной из-за влияния объемного S-электрода. Так при малых H происходит наложение когерентных пиков собственно s-слоя и S-сверхпроводника. Обнаружено, что в SIsFS-структуре переход в π -состояние и обратно наблюдается при изменении обменного поля до значения $H \approx 11T_C$ для толщины ферромагнитного слоя $d_F = 2\xi_S$.

3. Обнаружен и исследован триггерный эффект в $SF_1S_1F_2s$ структуре, заключающийся том, что s-слой, собственная сверхпроводимость которого полностью подавляется $F_1S_1F_2$ спиновым вентилем, переходит в сверхпроводящее состояние только при подпитке со стороны сверхпроводящего источника S. Данный триггерный эффект обеспечивает в данной структуре сверхпроводящий спин-вентильный эффект - изменения сверхпроводящего параметра порядка Δ_s в s-слое за счет изменения угла разориентации векторов намагниченности ферромагнитных слоев спинового вентиля $F_1S_1F_2$. Найдены оптимальные наборы материальных и геометрических параметров, при которых величина изменения Δ_s вследствие перемагничивания

составляет порядка T_C .

4. Предложена структура $SF_1S_1F_2sIS$ для создания джозефсоновского спинового вентиля. Причем, он будет иметь высокое характеристическое напряжение $I_C R_N$, сопоставимое с $I_C R_N$ SIS-контактов, не только в 0, но и в π -состоянии с возможностью как плавного изменения критического тока, так и скачкообразных переходов между 0- и π -состояниями. Установлены основные режимы работы перехода в зависимости от толщин ферромагнитных слоёв и s-слоя:

5. На основе $SF_1S_1F_2sN$ структуры разработан спиновый вентиль по управлению кинетической индуктивностью. Показано, что добавление низкоомного N нормального металла (с удельным сопротивлением $\rho_N = 0.1\rho_S$) усиливает спин-вентильный эффект и позволяет достичь изменения кинетической индуктивности L_K на 300-400% при изменении угла разориентации векторов намагниченности F слоев. Найдена двухступенчатая зависимость кинетической индуктивности от протекающего тока смещения J, причем разрушение сверхпроводимости в sN-части происходит при токах, примерно в 2 раза ниже критического тока объемного S-электрода. Таким образом, продемонстрировано, что $SF_1S_1F_2sN$ структуру можно использовать как нелинейный элемент в схемах сверхпроводниковой электроники.

6. Теоретически обоснована возможность создания эффективных спиновых вентилях на основе сверхпроводниковых гетероструктур с одним ферромагнитным слоем F и слоем нормального металла N_{SO} , обладающим спин-орбитальным взаимодействием. Показана ключевая роль спин-орбитального взаимодействия в управлении сверхпроводящими свойствами в подобной $sN_{SO}F$ -структуре. Установлено, что оптимальная комбинация $\alpha = \beta$ параметров спин-орбитального рассеяния Рашбы (α) и Дрессельхауса (β) при углах $\theta = 0.25\pi$ разориентации между направлением намагниченности ферромагнетика и кристаллографическими осями нормального металла позволяет существенно усиливать синглетную сверхпроводимость, изменяя сверхпроводящий параметр порядка на свободной поверхности s-пленки более чем на 30%. Также обнаружено подавление триплетных корреляций в N_{SO} -слое на 40-45% за счет спин-орбитального взаимодействия.

7. Разработана новая компактная конструкция джозефсоновского перехода $\text{SIsN}_{\text{SO}}\text{F}$ -типа с возможностью плавного управления величиной критического тока путем изменения угла θ разориентации между направлением намагниченностью ферромагнетика и кристаллографическими осями нормального металла. Определены оптимальные толщины слоев: $d_F \approx 0.2\xi$ и $d_s \approx 2.75\xi$, обеспечивающие максимальный эффект джозефсоновского спинового вентиля, величина изменения криттока в котором составляет $\sim 25\%$ от криттока SIS контакта.

Список публикаций автора

Результаты диссертации отражены в следующих публикациях в научных журналах, рекомендованных для защиты в диссертационных советах МГУ по специальности и отрасли наук:

- [A1] Bakurskiy S.V., Neilo A.A., Klenov N.V., Soloviev I.I., Kupriyanov M.Yu. Dynamic properties of asymmetric double Josephson junction stack with quasiparticle imbalance // Nanotechnology. - 2019. - vol. 30. - p. 324004. Импакт-фактор 2.8 (JIF). DOI: 10.1088/1361-6528/ab1a8e. EDN: UIFLND. Объем 0.46 п.л. из них 0.16 п.л. вклад Неило А.А.
- [A2] Bakurskiy S.V., Neilo A.A., Klenov N.V., Soloviev I.I., Golubov A.A., Kupriyanov M.Yu. Density of states and current-voltage characteristics in SIsFS junctions // Superconductor Science and Technology. - 2021. - vol. 34. - p. 085007. Импакт-фактор 3.7 (JIF). DOI: 10.1088/1361-6668/ac0870. EDN: QAXZFF. Объем 0.63 п.л. из них 0.3 п.л. вклад Неило А.А.
- [A3] Stolyarov Vasily, Oboznov Vladimir, Kasatonov Daniil, Neilo Alexey, Bakurskiy Sergey, Klenov Nikolay, Soloviev Igor, Kupriyanov Mikhail, Golubov Alexander, Cren Tristan, Roditchev Dimitri. Effective Exchange Energy in a Thin, Spatially Inhomogeneous CuNi Layer Proximized by Nb // Journal of Physical Chemistry Letters. - 2022. - vol. 13. - p. 6400-6406. Импакт-фактор 4.6 (JIF). DOI: 10.1021/acs.jpcllett.2c00978. EDN: FOLIRH. Объем 0.75 п.л. из них 0.17 п.л. вклад Неило А.А.
- [A4] Neilo Alexey, Bakurskiy Sergey, Klenov Nikolay, Soloviev Igor, Kupriyanov Mikhail. Superconducting Valve Exploiting Interplay between

- Spin-Orbit and Exchange Interactions // Nanomaterials. - 2022. - vol. 12. - p. 4426. Импакт-фактор 4.7 (JIF). DOI: 10.3390/nano12244426. EDN: NKHCCW. Объем 0.86 п.л. из них 0.5 п.л. вклад Неило А.А.
- [A5] Neilo A., Bakurskiy S., Klenov N., Soloviev I., Kupriyanov M. Tunnel Josephson Junction with Spin-Orbit/Ferromagnetic Valve // Nanomaterials. - 2023. - vol. 13. - p. 1970. Импакт-фактор 4.7 (JIF). DOI: 10.3390/nano13131970. EDN: HVIHGL. Объем 0.75 п.л. из них 0.5 п.л. вклад Неило А.А.
- [A6] Neilo A., Bakurskiy S., Klenov N., Soloviev I., Kupriyanov M. Spin-Valve-Controlled Triggering of Superconductivity // Nanomaterials. - 2022. - vol. 14. - p. 245. Импакт-фактор 4.7 (JIF). DOI: 10.3390/nano14030245. EDN: YLHNSJ. Объем 0.63 п.л. 0.4 из них п.л. вклад Неило А.А.
- [A7] Neilo Alexey, Bakurskiy Sergey, Klenov Nikolay, Soloviev Igor, Stolyarov Vasily, Kupriyanov Mikhail. Josephson spin valve controlled by a superconducting trigger effect // Applied Physics Letters. - 2024. - vol. 125. - p. 162601. Импакт-фактор 3.6 (JIF). DOI: 10.1063/5.0220387. EDN: ULXCCZ. Объем 0.4 п.л. из них 0.25 п.л. вклад Неило А.А.
- [A8] Nazhestkin Ivan A., Bakurskiy Sergey V., Neilo Alex A., Tarasova Irina E., Ismailov Nidzhat, Gurtovoi Vladimir L., Egorov Sergey V., Lisitsyn Sergey A., Stolyarov Vasily S., Antonov Vladimir N., Ryazanov Valery V., Kupriyanov Mikhail Y., Soloviev Igor I., Klenov Nikolay V., Yakovlev Dmitry S. High Kinetic Inductance in Platinum-Coated Aluminum Nanobridge Interferometers // Advanced Engineering Materials. - 2025. - vol. 27. - p. 2402385. Импакт-фактор 2.968 (JIF). DOI: 10.1002/adem.202402385. EDN: INFDLL. Объем 0.52 п.л. из них 0.1 п.л. вклад Неило А.А.
- [A9] Неило А.А., Бакурский С.В., Кленов Н.В., Соловьев И.И., Куприянов М.Ю. Магнитное управление кинетической индуктивностью в элементах сверхпроводниковой электроники // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2025. - том 121, с. 63-71. Импакт фактор 1.4 (JIF).

<https://dx.doi.org/10.31857/S0370274X25010101>. EDN: MCMJJU.
Объем 0.46 п.л. из них 0.25 п.л. вклад Неило А.А.

А также в других научных журналах:

[A10] Bakurskiy Sergey, Ruzhickiy Vsevolod, Neilo Alexey, Klenov Nikolay, Soloviev Igor, Kupriyanov Mikhail, Elistratova Anna, Shishkin Andrey, Stolyarov Vasily. Thouless energy in Josephson SN-N-NS bridges // Mesoscience & Nanotechnology. - 2024. - vol. 1. - p. 01003. <https://jmsn.press/publications/01-01003>. Объем 0.58 п.л. из них 0.1 п.л. вклад Неило А.А.

Список литературы

1. *Strukov D. B., Likharev K. K.* CMOS FPGA: a reconfigurable architecture for hybrid digital circuits with two-terminal nanodevices // Nanotechnology. — 2005. — Т. 16. — С. 137—144. — DOI: 10.1088/0957-4484/16/6/045. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/16/6/045>.
2. *Xu W., Wang J., Yan X.* Neuromorphic computing with memristive devices // Front. Nanotechnol. — 2021. — Т. 3. — С. 645995. — DOI: 10.3389/fnano.2021.645995. — URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnano.2021.645995/full>.
3. *Linder J., Robinson J. W. A.* Superconducting spintronics // Nat. Phys. — 2015. — Т. 11. — С. 307—315. — DOI: 10.1038/nphys3242. — URL: <https://www.nature.com/articles/nphys3242>.
4. *Likharev K. K.* Dynamics of Josephson junctions and circuits // IEEE Trans. Magn. — 1976. — Т. 13. — С. 242—244. — DOI: 10.1109/TMAG.1976.1058887. — URL: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781351454193_A42757240/preview-9781351454193_A42757240.pdf.
5. Phase-controlled ground-state supercurrent in topological Josephson junctions / S. V. Bakurskiy [и др.] // Supercond. Sci. Technol. — 2021. — Т. 34. — С. 085001. — DOI: 10.1088/1361-6668/abf1a3. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/abf1a3>.
6. Atomic-scale visualization of interfacial superconductivity in a two-dimensional superconductor / R. Yano [и др.] // J. Phys. Chem. Lett. — 2021. — Т. 12, № 17. — С. 4180—4186. — DOI: 10.1021/acs.jpcclett.1c00858. — URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcclett.1c00858>.

7. Proximity effect at superconducting Sn-Bi₂Se₃ interface / C. Carbillet [и др.] // Phys. Rev. B. — 2020. — T. 102. — C. 024504. — DOI: 10.1103/PhysRevB.102.024504. — URL: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.102.024504>.
8. Josephson effect in SIsFS junctions with a floating node / I. I. Soloviev [и др.] // Phys. Rev. Applied. — 2021. — T. 16. — C. 044060. — DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.044060. — URL: <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.16.044060>.
9. Quantum Artificial Life in an IBM Quantum Computer / U. Alvarez-Rodriguez [и др.] // Scientific Reports. — 2018. — T. 8. — C. 14793. — DOI: 10.1038/s41598-018-33125-3. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-33125-3>.
10. Superconducting triplet spin valve / Y. V. Fominov [и др.] // JETP Letters. — 2010. — T. 91, № 6. — C. 308—313. — DOI: 10.1134/S0021364010060069. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0021364010060069>.
11. Controllable $0-\pi$ Josephson junctions containing a ferromagnetic spin valve / E. C. Gingrich [и др.] // Nat. Phys. — 2016. — T. 12. — C. 564—567. — DOI: 10.1038/nphys3681. — URL: <https://www.nature.com/articles/nphys3681>.
12. *Usadel K. D.* Generalized Diffusion Equation for Superconducting Alloys // Phys. Rev. Lett. — 1970. — T. 25. — C. 507—509. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.25.507. — URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.25.507>.
13. *Kuprianov M. Y., Lukichev V. F.* Influence of boundary transparency on the critical current of Josephson junctions // Zh. Eksp. Teor. Fiz. — 1988. — T. 94. — C. 139—149. — URL: http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_067_05_1163.pdf.
14. *Samarskii A. A.* Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem (Introduction to the Theory of Difference Schemes). — Nauka, Editor-in-chief of physical- mathematical literature, Moscow, 1971. — C. 552.
15. Josephson φ -Junctions Based on Structures with Complex Normal/Ferromagnet Bilayer / S. Bakurskiy [и др.] // Supercond. Sci. Technol. — 2012. — T. 26, № 1. — C. 015005.
16. Current-phase relations in SIsFS junctions in the vicinity of $0-\pi$ transition / S. V. Bakurskiy [и др.] // Physical Review B. — United States, 2017. — T. 95, № 9. — 094522–1–094522–11. — ISSN 0163-1829; 2469-9950; 2469-9969; 1098-0121. — DOI: 10.1103/PhysRevB.95.094522.
17. *Vodolazov D. Y.* Nonlinear kinetic inductance sensor // JETP Letters. — 2023. — T. 118, № 10. — C. 773—778.
18. Colloquium: Spin-orbit effects in superconducting hybrid structures / M. Amundsen [и др.]. — 2022. — arXiv: 2210.03549 [cond-mat.supr-con].