

*На правах рукописи*



Карелина Любовь Николаевна

Разработка элементов джозефсоновской магнитной памяти  
на основе сплава  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$

Специальность 1.3.8. —  
Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Черноголовка — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук.

**Научный руководитель:** **Рязанов Валерий Владимирович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Научный консультант:** **Большинов Виталий Валериевич**  
кандидат физико-математических наук

**Официальные оппоненты:** **Тагиров Ленар Рафгатович**  
доктор физико-математических наук, профессор  
Казанский физико-технический институт  
им. Е.К. Завойского – обособленное структурное  
подразделение Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки «Федеральный  
исследовательский центр «Казанский научный центр  
Российской академии наук»  
ведущий научный сотрудник

**Семенов Александр Владимирович**  
кандидат физико-математических наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский педагогический государственный  
университет»  
доцент

**Ведущая организация:** Институт физики микроструктур РАН – филиал  
Федерального государственного бюджетного научного  
учреждения «Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии  
наук» (ИПФ РАН)

Защита состоится «6» декабря 2022 года в \_\_ часов \_\_ минут на заседании  
диссертационного совета 24.1.136.01 (Д002.100.02) на базе Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела им.  
Ю.А. Осипьяна Российской академии наук по адресу: 142432, Московская область, г.  
Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна  
Российской академии наук и на сайте диссертационного совета:  
<http://www.issp.ac.ru/main/index.php/ru/dis-council.html>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета  
24.1.136.01 (Д002.100.02)  
доктор технических наук



Курлов Владимир  
Николаевич

© Карелина Л. Н., 2022  
© ИФТТ РАН, 2022

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Сверхпроводящая электроника является актуальным направлением развития науки и техники. Устройства на основе двухконтактных сверхпроводящих интерферометров (сквидов) демонстрируют непревзойденную чувствительность при измерении напряжений пиковольтового диапазона и малых магнитных моментов [1, 2]. Термометры и рефрижераторы на основе NIS-структур<sup>1</sup> позволяют проводить «on-chip» эксперименты в милликельвиновом диапазоне температур [3]. Однофотонные детекторы [4] и болометры на холодных/горячих электронах [5] находят применение в радиоастрономии. На основе джозефсоновских туннельных SIS-контактов созданы сверхпроводящие высокочувствительные быстродействующие аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи [6]. Сверхпроводниковые цифровые устройства быстрой одноквантовой логики имеют тактовую частоту сотни гигагерц и крайне малые (аДж) затраты энергии на одно переключение [7]. Активно развивается сверхпроводящее направление квантовых вычислительных систем [8], которые при решении некоторых задач с большой размерностью вычислений уже превосходят классические цифровые вычислительные устройства [9].

Дальнейшее развитие вычислительных систем требует значительного повышения энергоэффективности обработки цифровых данных. Одной из перспектив в этом направлении является разработка вычислительных технологий, основанных на эффекте Джозефсона, прежде всего, устройств быстрой одноквантовой логики (БОК-логика, англ: RSFQ-logic – Rapid Single Flux Quantum logic) [10]. Последняя предполагает кодирование цифрового состояния посредством одноквантовых импульсов напряжения (SFQ-импульсов) пикосекундной длительности вместо обычного использования различных уровней напряжения. Интегрирование напряжения по времени в течение отдельного импульса дает величину, равную одному кванту магнитного потока, что также отражено в названии концепции («одноквантовая»). Согласно уравнению нестационарного эффекта Джозефсона каждый такой SFQ-импульс соответствует изменению фазы джозефсоновского

---

<sup>1</sup> Туннельных переходов нормальный металл-сверхпроводник.

контакта на 2л. В рамках общей концепции RSFQ-логики, предложенной еще в 1985 году [11], было разработано несколько различных подходов к реализации логических элементов [12–16], с целью дальнейшего повышения энергоэффективности при сохранении достоинств высокого быстродействия. Однако развитие сверхпроводниковой памяти с произвольным доступом (RAM – random access memory), необходимой для крупномасштабных вычислительных приложений, идет значительно медленнее. На данный момент разработка масштабируемой энергоэффективной памяти, совместимой с SFQ схемами, – одна из важнейших задач в развитии цифровой сверхпроводниковой электроники [17]. За прошедшее время было предложено несколько концепций, основанных на использовании в качестве запоминающих элементов двухконтактных или одноконтактных сквидов [18, 19], SISFS-контактов<sup>2</sup> [20–22], гибридных структур с несколькими ферромагнитными слоями [23–25], джозефсоновских 0-π- [26] или φ-контактов [27] и др. Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию концепций сверхпроводниковой магнитной памяти на основе сверхпроводящего ниобия (S) и слабоферромагнитного сплава Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub> (F), обладающей преимуществами технологической и частотной совместимости с уже разработанными элементами быстрой одноквантовой логики.

**Целью исследования** является разработка масштабируемых элементов джозефсоновской магнитной памяти, пригодных для использования в сверхпроводниковых вычислительных устройствах.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие основные **задачи**:

1. Изучение возможности стимулирования записи цифрового состояния SISFS-элемента джозефсоновской магнитной памяти при помощи электромагнитного излучения в гигагерцовом диапазоне частот.
2. Изучение перспектив масштабирования джозефсоновских элементов магнитной памяти на основе слабоферромагнитного сплава Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub> путем перехода от квадратных контактов к прямоугольным.
3. Изучение эффекта сверхпроводящего псевдо спинового вентиля в мостиковых FSF-структурах на основе Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub> с целью реализации элементов магнитной памяти.
4. Совершенствование технологии изготовления гибридных структур

---

<sup>2</sup> Джозефсоновский контакт с композитным барьером изолятор-тонкий сверхпроводник-ферромагнетик.

сверхпроводник-ферромагнетик, необходимых для проведения экспериментов, с целью повышения их точности и воспроизводимости.

**Методы исследования.** В работе использованы основные методы технологии изготовления тонкопленочных структур (включая осаждение и контроль толщины тонкопленочных металлических слоев; фотолитографию; различные методы селективного травления), а также методы низкотемпературного эксперимента в криостате  $^4\text{He}$ . При анализе экспериментальных данных использовалось программное обеспечение, разработанное при подготовке предыдущих работ в данном направлении.

**Научная новизна** диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Впервые проведены эксперименты по переключению джозефсоновского элемента памяти между цифровыми состояниями при воздействии микроволнового излучения гигагерцового диапазона.
2. Впервые реализованы и исследованы элементы джозефсоновской магнитной памяти прямоугольной формы, а также проанализированы перспективы их миниатюризации до субмикронных размеров.
3. Впервые изучена зависимость критической температуры двуслойных FS-структур  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{-Nb}$  в широком диапазоне толщин F-слоя (до 75 нм), практически важном для реализации элементов джозефсоновской магнитной памяти.
4. Впервые измерены кривые магнитосопротивления в трехслойных FSF-мостиках на основе столь слабого ферромагнетика, как  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ .

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Обнаружен эффект микроволнового стимулирования записи цифрового состояния SIsFS-элемента сверхпроводниковой магнитной памяти.
2. Впервые реализованы и исследованы элементы магнитной памяти прямоугольной формы на основе многослойных джозефсоновских SIsFS-контактов.
3. Показано, что при использовании SIsFS-контактов прямоугольной формы с большим отношением сторон могут быть реализованы троичные элементы памяти.
4. Показано, что площадь прямоугольных SIsFS-элементов джозефсоновской магнитной памяти потенциально может быть уменьшена до  $2 \text{ мкм}^2$  при длине 10 мкм и отношении сторон около 50.
5. Обнаружено, что критическая температура двухслойных FS-структур

$\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$  монотонно уменьшается вплоть до неожиданно больших толщин (не менее 75 нм), что коррелирует с увеличением температуры Кюри используемого слабоферромагнитного сплава.

6. Обнаружен заметный магниторезистивный эффект в трехслойных планарных FSF-микромостиках  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{-Nb-Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ , который представляет собой резкое уменьшение его сопротивления в магнитных полях, противоположных по направлению к изначальной намагниченности. Показано, что микроstructuring не разрушает эффект: наиболее выраженные кривые наблюдались при наименьших размерах мостиков 5–20 мкм.
7. Обнаружено, что низкорезистивное состояние FSF-микромостика обладает эффектом магнитной памяти. Продемонстрировано переключение такого образца между цифровыми состояниями под действием импульсов магнитного поля.
8. Обнаружено усиление магниторезистивного эффекта при понижении температуры, связанное с зависимостью критического тока и дифференциального сопротивления микромостика от его магнитного состояния.

**Практическая значимость работы** связана с проверкой применимости ранее предлагавшихся подходов к разработке масштабируемых элементов джозефсоновской магнитной памяти на основе слабоферромагнитного сплава  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$  для сверхпроводящих вычислительных устройств.

**Степень достоверности и апробация результатов исследования.** Результаты, полученные в рамках работы над диссертацией, представлялись и обсуждались на следующих научно-методических конференциях:

1. Л. Карелина, А. Бен Хамида, И. Головчанский, В. Чичков, В. Больгинов «О путях миниатюризации элементов джозефсоновской магнитной памяти.» XXI Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», т. 1, с. 64. 13–16 марта 2017 г., Нижний Новгород.
2. Л. Н. Карелина, В. В. Больгинов, В. В. Рязанов, «Джозефсоновская магнитная память для сверхпроводниковой электроники», 20-я Международная выставка электронных компонентов, модулей и комплектующих, «ЭкспоЭлектроника», 25–27 апреля 2017 г., Москва.
3. Л. Карелина, А. Бен Хамида, В. Чичков, В. Больгинов «Возможности масштабирования джозефсоновской магнитной памяти на основе слабоферромагнитного сплава  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ ». XXII международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» 12–15 марта 2018 г.,

Нижний Новгород.

4. Л. Н. Карелина, В. В. Больгинов, «Масштабируемая магнитная память для сверхпроводящей электроники на основе слабоферромагнитного сплава PdFe», 21-я Международная выставка электронных компонентов, модулей и комплектующих, «ЭкспоЭлектроника», 17–19 апреля 2018 г., Москва.
5. Л.Н. Карелина, Ш.А. Эркенов, Р.А. Оганнисян, В.И. Чичков, И.А. Головчанский, В.В. Больгинов, «Магнитные логические элементы для сверхпроводящей электроники», 2-я Международная конференция «Физика конденсированных состояний», с. 39. 31 мая – 4 июля 2021 г, Черноголовка.
6. Л.Н. Карелина, Ш.А. Эркенов, В.В. Больгинов, «Магниторезистивный эффект в гетероструктурах ферромагнетик-сверхпроводник-ферромагнетик на основе сильно разбавленного сплава  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ », международная конференция «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах», 12–17 сентября 2021 г., Махачкала.

**Личный вклад автора** является значительным и связан с совершенствованием методики изготовления гибридных структур  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{-Nb}$ , изготовлением образцов, проведением экспериментов, а также с анализом, систематизацией и представлением экспериментальных данных.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано пять печатных работ в международных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science.

#### **Объем и структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций и библиографии. Общий объем диссертации составляет 158 страниц, включая 84 рисунка. Библиография включает 157 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, формулируются положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** представляет собой обзор научной литературы по теме диссертационной работы и состоит из четырех разделов. В первом из них рассматриваются свойства слабоферромагнитных сплавов  $Pd_{1-x}Fe_x$ , включая поликристаллические тонкие пленки  $Pd_{0,99}Fe_{0,01}$ , использованные в настоящей диссертации. Рассматриваются ключевые особенности магнитных свойств таких пленок: зависимость температуры Кюри и коэрцитивного поля от толщины пленки, а также планарная магнитная анизотропия. Второй раздел посвящен рассмотрению эффектов близости в гибридных структурах сверхпроводник-ферромагнетик. Изложена качественная модель [28] возникновения пространственно неоднородных состояний Ларкина-Овчинникова-Фулде-Феррела в гибридных FS-структурах и методы оценки длины когерентности с использованием понятия о «распаривающих факторах». Обоснована актуальность использования слабоферромагнитных сплавов (в частности  $Pd_{0,99}Fe_{0,01}$ ) при изучении гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик. Дан обзор экспериментов по изучению зависимости критической температуры  $T_c$  слоистых FS-структур от толщины F-слоя. В третьем разделе представлена концепция элемента джозефсоновской магнитной памяти на основе слабоферромагнитного сплава  $Pd_{0,99}Fe_{0,01}$ . Благодаря планарной магнитной анизотропии слоев  $Pd_{0,99}Fe_{0,01}$  в составе барьера джозефсоновского контакта  $Nb-Pd_{0,99}Fe_{0,01}-Nb$  гистерезисная кривая перемагничивания F-слоя приводит к гистерезисной полевой зависимости критического тока  $I_c$ . Зависимость  $I_c$  от магнитной предыстории позволяет использовать такие контакты в качестве элемента памяти, переключающегося между сверхпроводящим и резистивным состояниями под действием импульсов приложенного магнитного поля. Рассматривается проблема масштабирования таких элементов и представлены пути ее решения: переход к прямоугольным джозефсоновским контактам [29] и планарным микромостикам ферромагнетик-сверхпроводник-ферромагнетик, демонстрирующим эффект сверхпроводящего спинового клапана [30]. В четвертом разделе рассматриваются вопросы, связанные с быстродействием разрабатываемых элементов джозефсоновской магнитной памяти по отношению к операциям считывания и записи. Показана связь времени



считывания с напряжением на элементе памяти в резистивном состоянии и приведены оценки характерных величин, необходимых для частотной совместимости с устройствами RSFQ-логики. Обосновано добавление туннельного слоя  $\text{AlO}_x$  в состав джозефсоновского барьера [21] (SIsFS-контакт). Рассматриваются результаты экспериментов по наблюдению ферромагнитного резонанса (ФМР) в сплавах  $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$ . Приводится оценка характерного времени спиновой динамики в используемых пленках  $\text{Pd}_{0,99}\text{Fe}_{0,01}$ , которая определяет время записи. Рассмотрены эксперименты по микроволновому стимулированию процесса перемагничивания, которое может облегчить запись цифрового состояния элемента магнитной памяти.

Во второй главе рассматриваются вопросы изготовления образцов и проведения экспериментов, связанные с личным вкладом автора в подготовку диссертации. Приведено описание установки магнетронного осаждения, созданной силами сотрудников лаборатории сверхпроводимости ИФТТ РАН, которая использовалась для осаждения тонкопленочных слоев ниобия и  $\text{Pd}_{0,99}\text{Fe}_{0,01}$ . Рассмотрены внедренные автором методы контроля толщины и пространственного профиля осаждаемых металлических пленок, а также освоенные методы «протяжки» и «клина». Изложены методики приготовления основных типов образцов: двухслойных FS-пленок  $\text{Nb-Pd}_{0,99}\text{Fe}_{0,01}$ , трехслойных FSF-мостиков и многослойных джозефсоновских SIsFS-контактов. Описана использованная автором экспериментальная установка на основе криостата  $^4\text{He}$ , включая методические особенности измерения полевой зависимости критического тока, температурных зависимостей сопротивления и т.д.

Третья глава посвящена экспериментам по микроволновому стимулированию процесса записи цифрового состояния в SIsFS-элементах джозефсоновской магнитной памяти. В разделе 3.1 приведено описание использованной экспериментальной установки, а также методов измерения вольт-амперных характеристик и определения критического тока образца. Дано определение цифровых состояний, обладающих разными уровнями критического тока, приведены характерные кривые перемагничивания, восстановленные методом джозефсоновской магнитометрии. Показано, что при подаче микроволнового сигнала на антенну, находящуюся в окрестности образца, на вольт-амперных характеристиках возникают ступени Шапиро, свидетельствующие о наличии эффективной связи образца и антенны. Обоснован выбор рабочей частоты 3.88 ГГц.

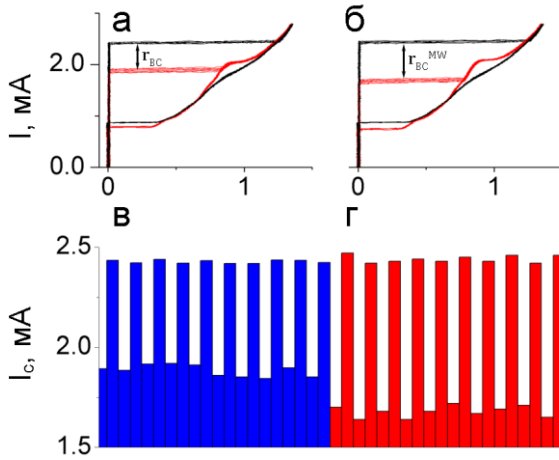


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики (а), (б) и определенные из них уровни критического тока (в), (г) в отсутствии (а), (в) и в присутствии (б), (г) микроволнового излучения. Черные кривые сняты в цифровом состоянии «0», красные – в цифровом состоянии «1».

В разделе 3.2 рассматривается переключение SIsFS-контакта между двумя цифровыми состояниями, в присутствии и при отсутствии микроволнового сигнала. Исследовался образец квадратной формы с толщиной слоя  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$  14 нм. Показано, что уровень критического тока в состоянии «0» ( $I_c^{(0)}$ , большой критический ток) практически не зависит от приложения СВЧ-сигнала, а в состоянии «1» ( $I_c^{(1)}$ , малый критический ток) несколько уменьшается. Другими словами, использование СВЧ-сигнала при магнитном переключении увеличивает допустимый нормированный диапазон токов смещения  $r_{BC} = (I_c^{(0)} - I_c^{(1)})/I_c^{(0)}$ . Была измерена зависимость  $r_{BC}$  и  $r_{BC}^{(MW)}$  от величины перемагничивающего импульса (см. Рис. 2(a)). Величина эффекта микроволнового стимулирования характеризовалась разностью величин  $r_{BC}$ , полученных при приложении и при отсутствии СВЧ сигнала:  $\Delta r_{BC} = r_{BC}^{(MW)} - r_{BC}$ . Было показано, что при амплитуде перемагничивающего импульса 2.4–5.7 Э (в 2–4 раза ниже поля насыщения) наблюдается эффект микроволнового стимулирования ( $\Delta r_{BC} > 0$ ). Обнаружено, что максимальный эффект достигается при амплитуде импульса 3.9 Э (см. Рис. 2(б)). Такое поведение было объяснено исходя из формы петли гистерезиса слоя  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ .

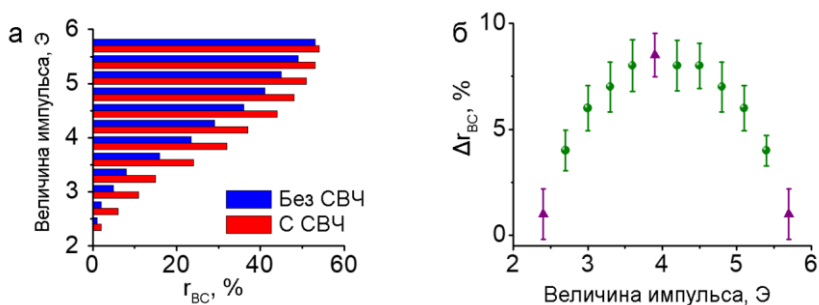


Рис. 2. (а) Нормированный диапазон допустимых токов смещения  $r_{BC}$  для различных значений величины прикладываемых импульсов магнитного поля в отсутствие ( $r_{BC}$ , синий) и в присутствии ( $r_{BC}^{(MW)}$ , красный) импульсов микроволнового излучения. (б) Величина  $\Delta r_{BC}$  для различных значений прикладываемого магнитного поля.

Величина  $\Delta r_{BC}$  увеличивается с ростом длительности или мощности СВЧ импульса. Это, по-видимому, связано с увеличением полной энергии, переданной образцу от антенны. Действительно, данные, соответствующие разной мощности и длительности, но одинаковой энергии, демонстрируют одинаковое значение величины  $\Delta r_{BC}$ . С повышением температуры  $\Delta r_{BC}$  увеличивается, что объясняется повышением чувствительности формы петли гистерезиса к изменению эффективной температуры. Было показано, что микроволновое стимулирование может увеличить допустимый диапазон токов смещения почти в два раза.

В **четвертой** главе представлена реализация SIsFS-элементов джозефсоновской магнитной памяти прямоугольной формы и обсуждаются перспективы их миниатюризации до субмикронных размеров. В них цифровые состояния кодируются ориентацией остаточной намагниченности относительно длинной стороны контакта. Первый из изготовленных образцов (раздел 4.1) имел размер  $10 \times 30 \text{ мкм}^2$ . Были измерены полевые зависимости критического тока при изменении внешнего магнитного поля  $H$  от больших отрицательных значений к большим положительным при двух ортогональных направлениях магнитного поля: вдоль и поперек длинной стороны (см. Рис. 3(а)). Периоды измеренных кривых отличались в три раза, что соответствует соотношению сторон  $r_D$  прямоугольника. Центральные максимумы кривых были сдвинуты на величину около 1.6  $\text{\AA}$ , определяемую коэрцитивным полем слоя  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ . Указанные свойства приводят к двум разным значениям критического тока при ориентации остаточной намагниченности вдоль или поперек длинной стороны.

Продemonстрировано, что выбрав ток питания между полученными значениями можно переключать образец между сверхпроводящим и резистивным состояниями (см. Рис. 3(б)) при помощи импульсов магнитного поля (см. Рис. 3(в)–(г)). Приведены оценки времени считывания и энергопотребления реализованного элемента джозефсоновской магнитной памяти. Показано, что он удовлетворяет критериям быстродействия и энергоэффективности элементов RSFQ-логики. Также показано, что амплитуды импульсов управляющего тока, необходимые для записи цифровых состояний, не являются фактором, ограничивающим масштабируемость элемента джозефсоновской магнитной памяти.

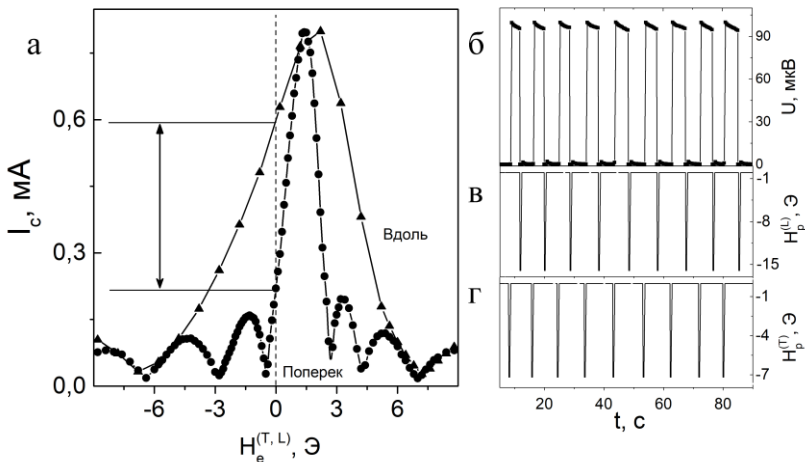


Рис. 3. (а) Зависимость критического тока прямоугольного SISFS-контакта от внешнего магнитного поля  $H_e^{(T,L)}$ , направленного вдоль или поперек в плоскости F-слоя. Размер контакта  $10 \times 30 \text{ мкм}^2$ . Магнитное поле меняется от отрицательных значений к положительным. Вертикальная стрелка показывает допустимый диапазон тока смещения при работе элемента джозефсоновской магнитной памяти. (б) Временная зависимость напряжения на элементе памяти под воздействием периодических ортогональных импульсов магнитного поля  $H_p^{(U)}$  и  $H_p^{(I)}$ , (в) и (г) соответственно.

Второй из представленных образцов (раздел 4.2) был размером  $10 \times 50 \text{ мкм}^2$  и имел большой критический ток. В результате, магнитное поле тока смещения стало оказывать существенное влияние на форму зависимостей  $I_c(H)$  (см. Рис. 4(а)). Было показано, что такой элемент джозефсоновской магнитной памяти позволяет хранить более двух логических состояний (см. Рис. 4(в)). Причина состоит в расщеплении поперечного магнитного состояния на два, при которых остаточная

намагниченность сонаправлена или противоположна собственному полю тока смещения (см. Рис. 5). Представлены результаты демонстрационного эксперимента по переключению образца импульсами магнитного поля между уровнями напряжения 0, 260 мкВ и 320 мкВ.

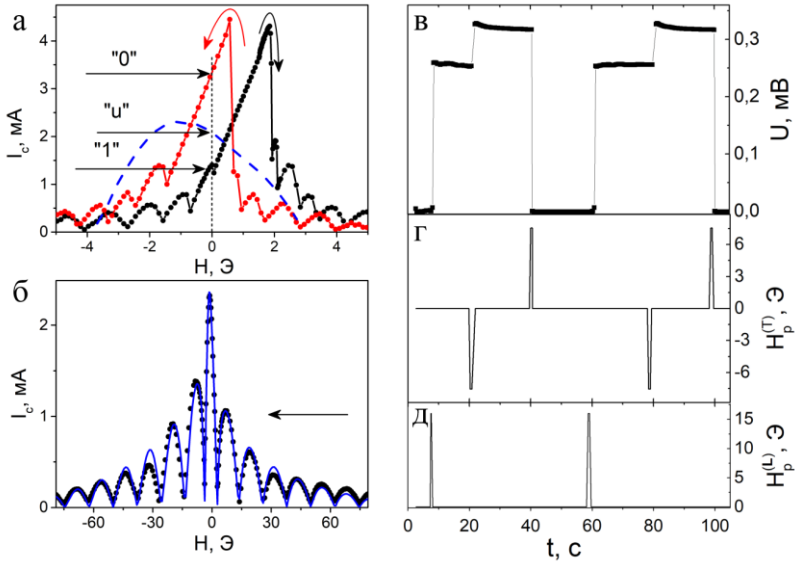


Рис. 4. (а) Красная и черная кривые – зависимости критического тока прямоугольного элемента джозефсоновской магнитной памяти от внешнего магнитного поля  $H_e^{(T)}$ . Размер контакта  $10 \times 50$  мкм<sup>2</sup>. Изогнутые стрелки показывают направление развертки магнитного поля. Пунктирной линией показан участок зависимости  $I_c(H_e^{(L)})$  для ориентации магнитного поля вдоль перехода, согласно панели (б). (в) Временная зависимость напряжения на элементе памяти под воздействием периодических ортогональных импульсов магнитного поля  $H_p^{(T)}$  и  $H_p^{(L)}$ , (г) и (д) соответственно.

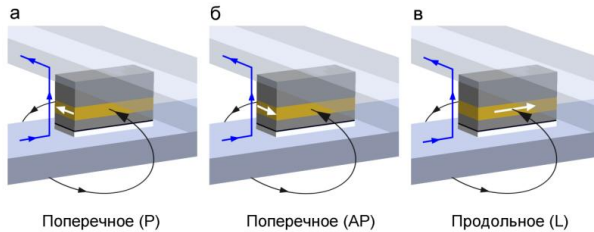


Рис. 5. Схематичное изображение цифровых состояний для тройного элемента памяти. Синяя стрелка показывает направление тока смещения, черная стрелка – магнитное поле, создаваемое протекающим током смещения, белая стрелка показывает остаточную намагниченность ферромагнетика.

В разделе 4.3 анализируются перспективы миниатюризации прямоугольных SIsFS-элементов джозефсоновской магнитной памяти на основе сплава  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ . Для этого было проведено численное моделирование процесса перемагничивания  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ -барьера прямоугольных SIsFS-контактов на основе модели кластерного ферромагнетика со случайно распределенной магнитной анизотропией кластеров [29]. Было обнаружено, что ограничивающим фактором миниатюризации прямоугольных элементов джозефсоновской магнитной памяти является трансформация петли гистерезиса при увеличении отношения сторон (см. Рис. 6(а),(б)), которая приводит к уменьшению допустимого диапазона токов смещения (см. Рис. 6(в)). Было показано, что площадь SIsFS-элемента памяти потенциально может быть уменьшена до  $2 \text{ мкм}^2$ .

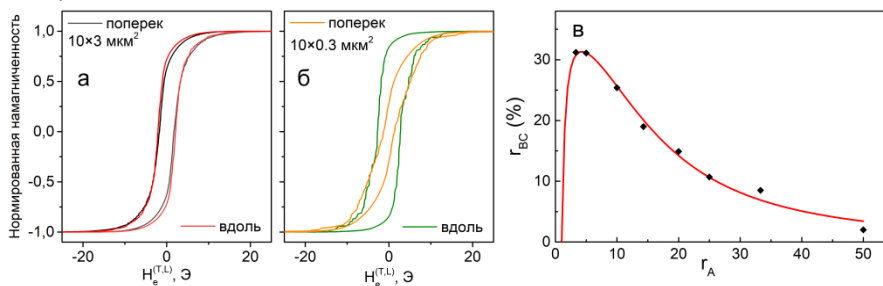


Рис. 6. (а), (б) Расчетные кривые перемагничивания для полосок  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$  размером  $10 \times 3 \text{ мкм}^2$  и  $10 \times 0.3 \text{ мкм}^2$  соответственно. (в) Зависимость нормированного диапазона допустимых токов смещения  $\Gamma_{BC}$  от соотношения сторон  $\Gamma_A$ .

**Пятая глава** посвящена исследованию планарных гибридных FS-структур, в которых ток смещения протекает параллельно плоскости образца. Основным объектом исследований являются трехслойные FSF-микромостики, в которых тонкий слой сверхпроводящего ниобия разделяет два слоя  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$  разной толщины. Такой объект является сверхпроводящим псевдо спиновым вентиляем, поскольку не содержит «якорного» слоя, фиксирующего направление одного из ферромагнетиков. Для реализации состояния с противоположно направленными намагниченностями (AP-состояния) в таких спиновых вентилях требуется, чтобы коэрцитивные поля F-слоев были различными. Экспериментальные результаты показывают (см. также [31]), что при использовании сплава  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$  для этого достаточно выбрать разные толщины верхнего и нижнего F-слоев.

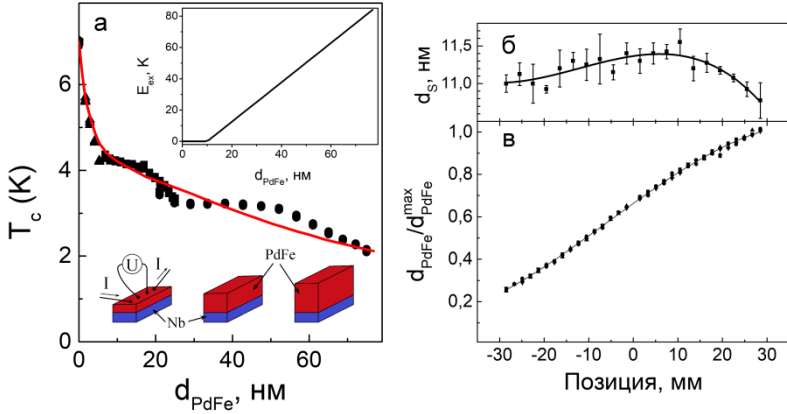


Рис. 7. (а) Зависимость критической температуры FS-бислоев Nb–Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,0</sub> от толщины слоя ферромагнетика  $d_{\text{PdFe}}$  при толщине сверхпроводника около 11 нм (см. панель (б)). Точки различной формы соответствуют трем разным образцам, изготовленным с использованием метода клина. Красная линия показывает аппроксимацию экспериментальных данных на основе микроскопической теории (см. обсуждение в тексте). На вставке приведена зависимость обменной энергии от толщины ферромагнетика, использовавшаяся при расчете. (б), (в) Зависимость толщин слоев ниобия и Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub> от положения на подложке. Профиль слоя Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub> нормирован на максимальное значение его толщины.

В начале работы было неясно, насколько сильно будет подавляться критическая температура тонкой пленки ниобия ( $d_S \approx 10\text{--}20$  нм) при выбранных толщинах F-слоев (25–40 нм), поскольку в литературе эффект близости в паре Nb–PdFe был исследован явно недостаточно. Поэтому в [разделе 5.1](#) была исследована зависимость критической температуры двухслойных образцов Nb–Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub> от толщины слоя Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub>. Было обнаружено плавное уменьшение критической температуры в неожиданно широком диапазоне толщин (10–75 нм), заведомо превышающем «температурную» длину когерентности [32]  $\xi_{\text{PdFe}} = \sqrt{\hbar D_{\text{PdFe}} / 2\pi k T_c}$  в слое Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub>. Здесь  $D_{\text{PdFe}}$  – коэффициент диффузии электронов в слое Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub>, а  $T_c$  – критическая температура двухслойной FS-пленки. Показано, что полученные данные могут быть описаны с помощью уравнений микроскопической теории [22, 33], при учете зависимости эффективной энергии обменного взаимодействия  $E_{\text{ex}}$  от толщины слоя Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub>. Удовлетворительное совпадение теории с экспериментом может быть получено уже при использовании линейной зависимости  $E_{\text{ex}}(d_{\text{PdFe}})$ . Масштаб изменения  $E_{\text{ex}}$  качественно соответствует толщиной зависимости температуры Кюри слоев Pd<sub>0,99</sub>Fe<sub>0,01</sub>.

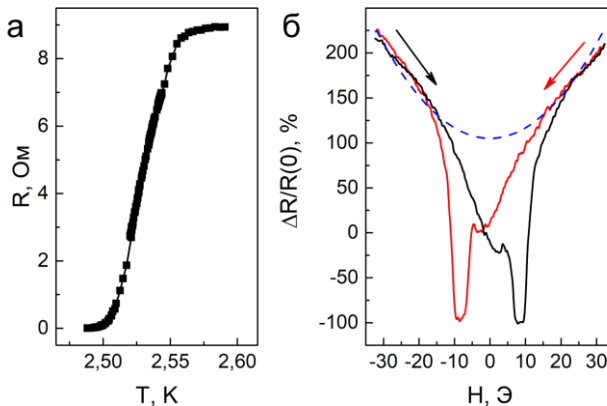


Рис. 8. (а) Температурная зависимость сопротивления FSF-микромостика  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{-Nb-Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$  размером  $6 \times 20 \text{ мкм}^2$ . (б) Кривые магнетосопротивления для того же микромостика при температуре 2.48 К. Стрелками показано направление развертки магнитного поля. Ток смещения 20 мкА.

В разделе 5.2 рассматривается магнетосопротивление FSF-мостиков различных размеров в окрестности сверхпроводящего перехода. Магнитное поле прикладывалось параллельно току питания, протекавшему вдоль мостика в плоскости образца. В целом, сопротивление мостиков росло с увеличением абсолютной величины приложенного магнитного поля (см. пунктирную кривую на Рис. 8(б)). На фоне этой зависимости наблюдались гистерезисные провалы магнетосопротивления при двух магнитных полях  $\pm H_0 \approx 9 \text{ Э}$ , противоположных по знаку исходной намагниченности насыщения, что свидетельствует об усилении сверхпроводимости в слое ниобия. Было обнаружено, что глубина провалов (т.е. значение  $\Delta R(H)/R_N$  в минимуме) возрастает по мере уменьшения температуры в пределах сверхпроводящего перехода. Обнаруженная температурная зависимость указывает, что данный магниторезистивный эффект связан именно с усилением сверхпроводимости в тонком слое ниобия, а не вызван, например, магнетосопротивлением в слоях  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ .

В работе было проведено исследование большого количества образцов. Оказалось, что микроstructuring не разрушает эффект. Напротив, наиболее выраженные отрицательные пики магнетосопротивления наблюдались для самых маленьких образцов: длиной 6-20 мкм и шириной 4-8 мкм. По мере увеличения размеров мостиков пики становились шире и постепенно сливались с



магниторезистивной кривой, проявляясь в виде небольших искажений (см. Рис. 9). Это согласуется с предыдущими исследованиями [20], в которых наблюдался переход от квазиоднородного к магнитно-неоднородному состоянию квадратных джозефсоновских контактов Nb-Pd<sub>0.99</sub>Fe<sub>0.01</sub>-Nb при увеличении размера от 10×10 мкм<sup>2</sup> до 30×30 мкм<sup>2</sup>.

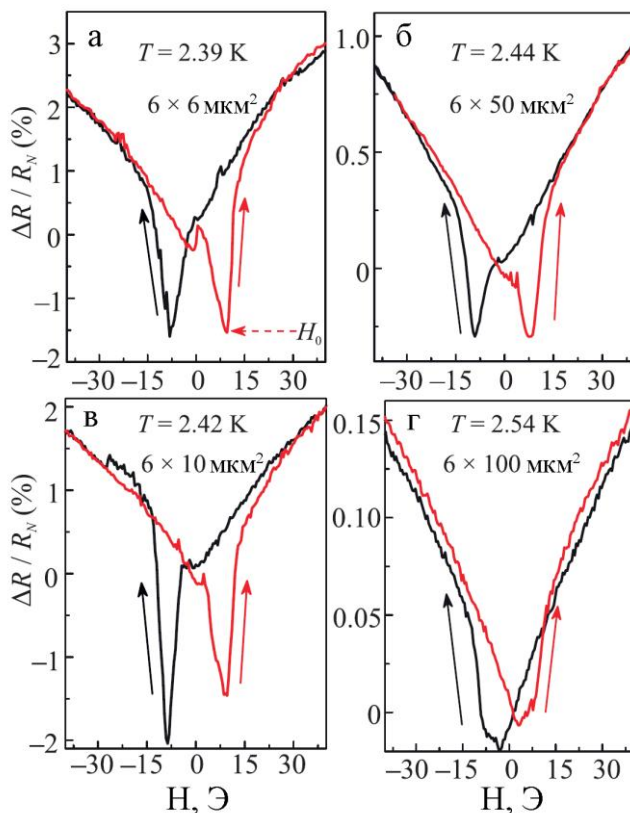


Рис. 9. Магнитосопротивление FSF-мостиков с одинаковой шириной 6 мкм но разной длиной. Толщина верхнего слоя Pd<sub>0.99</sub>Fe<sub>0.01</sub> равна 45 нм, а нижнего – 25 нм. Ток смещения 20 мкА.

Практический интерес представляет вопрос о возможности запоминания низкорезистивного состояния, достигаемого в полях ±9 Э (Рис. 8(б)). Ответ представлен на Рис. 10, где приведена частная магниторезистивная кривая FSF-мостика с изменением направления развертки в поле +9 Э. Можно видеть, что низкорезистивное состояние при этом сохраняется вплоть до -5 Э. При дальнейшем движении в

отрицательном направлении магнитосопротивление постепенно возвращается к исходному участку петли (в полях  $-15-20$  Э). Такой процесс можно проводить циклично, тем самым переводя образец из высоко- в низкорезистивное состояние и наоборот. В диссертации представлены результаты демонстрационного эксперимента, в которых FSF-мостик переключался под действием импульсов внешнего магнитного поля между уровнями напряжения  $0.3$  мкВ и  $1.3$  мкВ при токе смещения  $20$  мкА. Такой уровень напряжения соответствует характеристической частоте около  $0.5$  ГГц. Энергопотребление в резистивном состоянии составляет около  $15$  пВт, что в  $3000$  раз меньше, полученного в главе 4 и на  $2-4$  порядка меньше энергопотребления КМОП элементов памяти, обсуждавшихся недавно [34, 35].

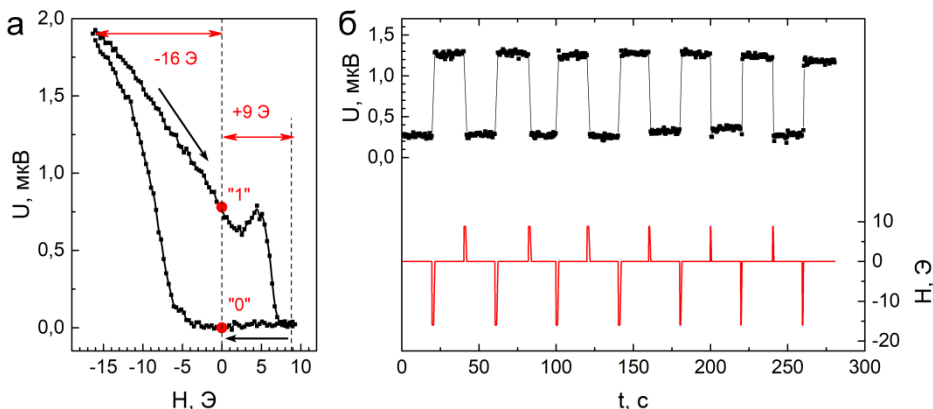
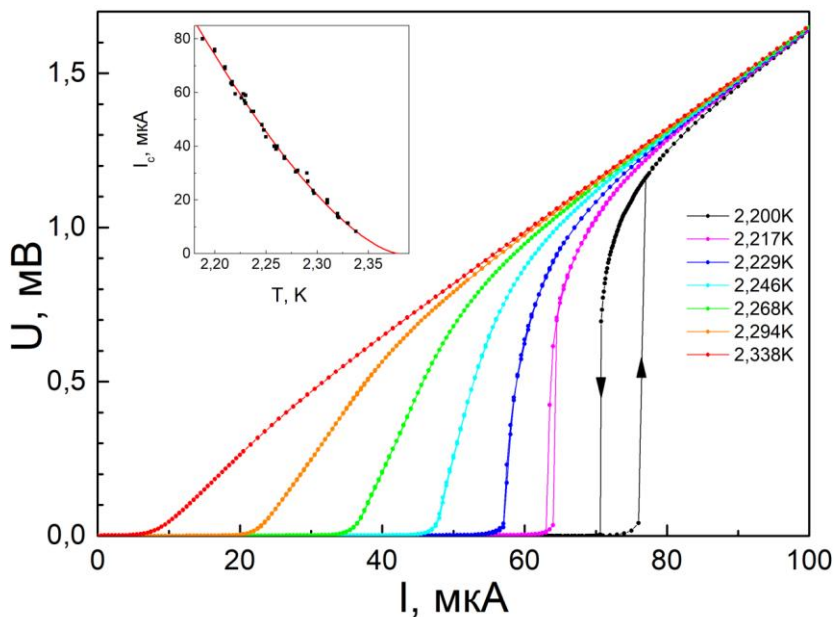


Рис. 10. (а) Зависимость напряжения на FSF-мостике размером  $6 \times 20$  мкм<sup>2</sup> от магнитного поля полученная при токе смещения  $20$  мкА и температуре  $2.48$  К. Черными стрелками обозначено направление развертки магнитного поля. Красными стрелками обозначены амплитуды импульсов, использованных для переключения цифрового состояния на панели (б). Цифровые состояния «0» и «1» схематически отмечены красными точками. (б) Временная диаграмма напряжения на FSF-микромостике (верхняя кривая), иллюстрирующая его переключение между цифровыми состояниями под действием импульсов магнитного поля (нижняя кривая). Температура  $T=2.50$  К. Ток смещения  $15$  мкА.

В разделе 5.3 рассматривалось можно ли добиться увеличения амплитуды эффекта путем увеличения тока смещения при более низких температурах. Для этого была измерена серия вольт-амперных характеристик при низких температурах (см. Рис. 11). Показано, что форма ВАХ является нелинейной и содержит участок с нулевым напряжением. Появление напряжения, по-видимому, связано с достижением тока распаривания в слое ниобия FSF-микромостика. Это

подтверждает температурная зависимость критического тока для FSF-мостика, которая подчиняется хорошо известному закону  $I_c = (1 - T/T_c)^{3/2}$  [36] (см. вставку к Рис. 11).



**Рис. 11.** Эволюция вольт-амперных характеристик FSF-мостика в зависимости от температуры. Стрелками показано направление развертки при температуре 2.200 К (черная кривая). На вставке показана температурная зависимость критического тока. Линия показывает аппроксимацию при помощи ур.  $I_c = (1 - T/T_c)^{3/2}$ .

Было обнаружено, что при низких температурах магнитное состояние мостика (Р или АР-состояние) влияет на критический ток и форму вольт-амперной характеристики образца. Вычитание вольт-амперных характеристик, измеренных для Р и АР-состояний, выявляет наличие разностного пика в окрестности критического тока мостика (см. Рис. 12). Амплитуда разностного пика возрастает с понижением температуры вследствие роста критического тока и дифференциального сопротивления в окрестности  $I_c$ . Это говорит о возможности получить большую разность напряжений в цифровых состояниях при использовании образца в качестве сверхпроводящего элемента памяти. Нижний предел рабочей температуры такого элемента связан с появлением на вольт-амперной характеристике гистерезиса, вызванного,

по-видимому, перегревом образца при его переходе в резистивное состояние (см. черную кривую на Рис. 11). Также уменьшается допустимый диапазон токов смещения, о чем можно судить по уменьшению ширины разностного пика при понижении температуры (см. Рис. 12(г)–(е)). При  $T = 2.214$  К, примерно равной нижней рабочей температуре, был проведен демонстрационный эксперимент по магнитному переключению FSF-мостика между уровнями напряжения 30 мкВ и 710 мкВ при токе питания 65 мкА (см. Рис. 13(б)). Напряжение в резистивном состоянии соответствует характеристической частоте примерно 340 ГГц, что удовлетворяет диапазону частот быстрой одноквантовой логики.

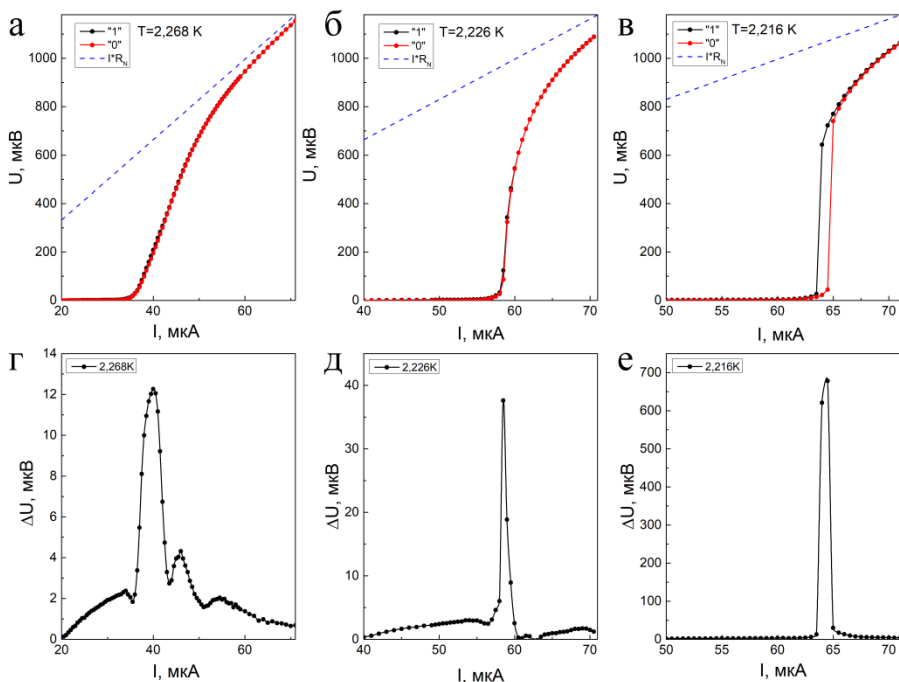


Рис. 12. (а)–(в) Изменение вольт-амперных характеристик в двух цифровых состояниях мостика: («1» – черные точки и «0» – красные точки) с понижением температуры. Пунктирными линиями обозначена асимптота  $U = R_N I$ . (г)–(д) Разность этих же вольт-амперных характеристик.

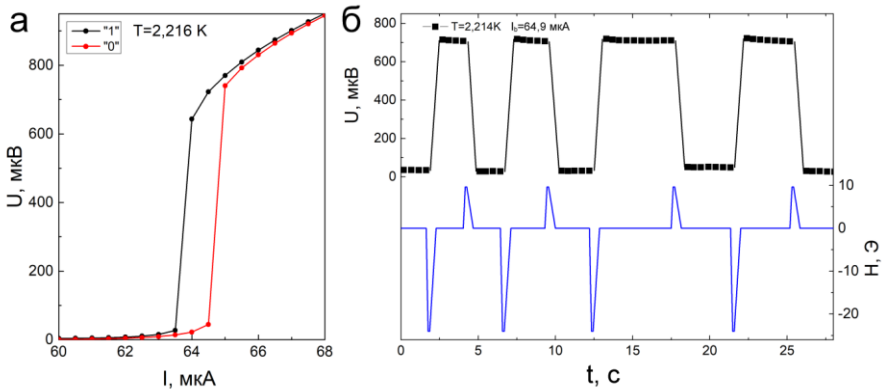


Рис. 13. (а) Увеличенный участок вольт-амперных кривых мостика в двух цифровых состояниях вблизи критического тока.  $T = 2.216 \text{ K}$ . (б) Верхняя кривая: переключение FSF-мостика между двумя логическими состояниями импульсами внешнего магнитного поля, показанными ниже.  $T = 2.214 \text{ K}$ ,  $I_b = 64.9 \mu\text{A}$ .

Интересные явления наблюдаются в диапазоне малых напряжений – единиц микровольт. В этой области форма вольт-амперных кривых существенно отличается для P- и AP-состояний. В частности, в AP-состоянии нулевое напряжение сохраняется практически до величины критического тока, тогда как в P-состоянии наблюдается незначительный рост напряжения («низковольтное P-состояние») даже при токах, меньших  $I_c$  на 30–40%. Поэтому в этом диапазоне токов возможны переключения с амплитудой до 2.5  $\mu\text{V}$ , что соответствует характеристической частоте около 1 ГГц. Это не очень большая величина, однако, она способна обеспечить частотную совместимость исследованных мостиков с элементами быстрой одноквантовой логики.

Выяснение природы низковольтного P-состояния FSF-микромостиков будет исследоваться на следующих этапах научной работы. Например, напряжение в этом состоянии может быть связано с движением вихрей (flux-flow режим), созданных в тонком слое ниобия полями рассеяния слоев  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ . Похожие явления наблюдались в работе [37]. Основным преимуществом низковольтного режима является переключения между чисто сверхпроводящим («0») и резистивным («1») состояниями мостика. Низковольтный режим значительно менее требователен к стабилизации температуры, поскольку обладает гораздо более широким диапазоном допустимых токов питания (30–40%  $I_c$  согласно Рис. 14). Поэтому вероятность ошибочного считывания (bit

error rate) в этом режиме должна быть гораздо ниже. Преимуществом высоковольтного режима, описанного выше, является большая амплитуда изменения напряжения и связанная с этим большая характеристическая частота. Поэтому выбор режима работы мостика в качестве сверхпроводникового элемента памяти должен определяться исходя из поставленной практической задачи.

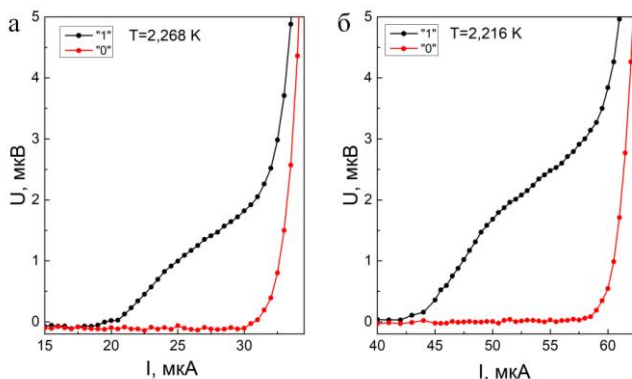


Рис. 14. Вольт-амперные характеристики мостика в двух цифровых состояниях («1» – черные точки и «0» – красные точки) в диапазоне низких напряжений. Панель (а) соответствует Рис. 12(а), а панель (б) – Рис. 12(в).

В **заключении** приводятся основные результаты работы:

1. Обнаружен эффект микроволнового стимулирования процесса перемагничивания слоя  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ , входящего в состав джозефсоновского барьера SISFS-элемента сверхпроводниковой магнитной памяти. Продемонстрировано существование оптимальной амплитуды перемагничивающего импульса магнитного поля, заметно меньшего, чем поле насыщения.
2. Впервые реализованы и исследованы элементы джозефсоновской магнитной памяти прямоугольной формы на основе многослойных SISFS-контактов.
3. Показано, что при использовании SISFS-контактов прямоугольной формы с большим соотношением сторон могут быть реализованы троичные элементы памяти.
4. Проанализированы перспективы миниатюризации прямоугольных SISFS-элементов памяти. Показано, что их площадь потенциально может быть уменьшена до  $2 \text{ мкм}^2$  при длине  $10 \text{ мкм}$  и соотношении сторон около 50.
5. Исследована зависимость критической температуры двухслойных FS-

пленок  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{-Nb}$  при изменении толщины F-слоя в широком диапазоне, который является практически значимым для реализации элементов джозефсоновской магнитной памяти. Обнаружено монотонное уменьшение критической температуры вплоть до неожиданно больших толщин (не менее 75 нм), что коррелирует с увеличением температуры Кюри используемого слабоферромагнитного сплава.

6. Обнаружен заметный магниторезистивный эффект в трехслойных планарных FSF-микромостиках  $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{-Nb-Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ , который представляет собой резкое уменьшение его сопротивления в магнитных полях, противоположных по направлению к изначальной намагниченности. Показано, что микроструктурирование не разрушает эффект: наиболее выраженные кривые наблюдались при наименьших размерах мостиков 5–20 мкм.
7. Обнаружено, что низкорезистивное состояние FSF-микромостика обладает эффектом магнитной памяти. Продемонстрировано переключение такого образца между цифровыми состояниями под действием импульсов магнитного поля.
8. Обнаружено усиление магниторезистивного эффекта при понижении температуры, связанное с зависимостью критического тока микромостика от его магнитного состояния. Показано, что ограничивающим фактором является появление на вольт-амперной характеристике гистерезиса, связанного с перегревом микромостика в резистивном состоянии. Получена амплитуда переключения напряжения около 700 мкВ, что соответствует характерному частотному диапазону цифровой сверхпроводниковой электроники.

#### **Работы, опубликованные автором по теме диссертации**

- A1. RF assisted switching in magnetic Josephson junctions / R. Caruso, D. Massarotti, V. V. Bolginov [et al.] // J. Appl. Phys. – 2018. – Vol. 123. – P. 133901.
- A2. Properties of ferromagnetic Josephson junctions for memory applications / R. Caruso, D. Massarotti, A. Miano [et al.] // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2018. – Vol. 28. – P. 1–6.
- A3. Магнитосопротивление микромостиков ферромагнетик/сверхпроводник/ферромагнетик на основе сильно разбавленного сплава PdFe / Л. Н. Карелина, В. В. Больгинов, Ш. А. Эркенов [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112. – С. 743–748.
- A4. Scalable memory elements based on rectangular SISFS junctions / L.

N. Karelina, R. A. Novhannisyanyan, I. A. Golovchanskiy [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2021. – Vol. 130. – P. 173901.

A5. Эффект магнитной памяти в планарных микромостиках ферромагнетик / сверхпроводник / ферромагнетик на основе сильно разбавленного сплава PdFe / Л. Н. Карелина, Н. С. Шуравин, А. С. Ионин [и др.] // *Письма в ЖЭТФ.* – 2022. – Т. 116. – С. 108–115.

### Список цитированной литературы

1. Gross, R. *Applied Superconductivity: Josephson Effect and Superconducting Electronics.* / R. Gross, A. Marx, F. Deppe. – Walter de Gruyter, 2017. – 480 p.
2. Ильичев, Е. В. *Введение в электродинамику сверхпроводниковых квантовых цепей. Глава 2* / Е. В. Ильичев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 174 с.
3. Nahum, M. *Electronic microrefrigerator based on a normal-insulator-superconductor tunnel junction* / M. Nahum, T. M. Eiles, J. M. Martinis // *Appl. Phys. Lett.* – 1994. – Vol. 65. – P. 3123–3125.
4. *Ultrafast superconducting single-photon detector* / G. Goltsman, A. Korneev, A. Divochiy [et al.] // *J. Mod. Opt.* – 2009. – Vol. 56. – P. 1670–1680.
5. Nahum, M. *Ultrasensitive-hot-electron microbolometer* / M. Nahum, J. M. Martinis // *Appl. Phys. Lett.* – 1993. – Vol. 63. – P. 3075–3077.
6. *Superconductor analog-to-digital converters* / O. A. Mukhanov, D. Gupta, A. M. Kadin, V. K. Semenov // *Proc. IEEE.* – 2004. – Vol. 92. – P. 1564–1584.
7. Bunyk, P. *RSFQ technology: physics and devices* / P. Bunyk, K. K. Likharev, D. Zinoviev // *Int. J. High Speed Electron. Syst.* – 2001. – Vol. 11. – P. 257–305.
8. *Superconducting Quantum Computing: A Review* / H. L. Huang, D. Wu, D. Fan, X. Zhu // *Sci. China Inf. Sci.* – 2020. – Vol. 63. – P. 180501.
9. *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor* / F. Arute, K. Arya, R. Babbush [et al.] // *Nature.* – 2019. – Vol. 574. – P. 505–510.
10. *Beyond Moore’s technologies: Operation principles of a superconductor alternative* / I. I. Soloviev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy [et al.] // *Beilstein J. Nanotechnol.* – 2017. – Vol. 8. – P. 2689–2710.
11. Likharev, K. K. *Resistive single flux quantum logic for Josephson junction technology* / K. K. Likharev, O. A. Mukhanov, V. K. Semenov // *SQUID '85 Superconducting Quantum Interference Devices and their*



Applications. – Walter de Gruyter, 1985. – P. 1103–1108.

12. Yoshikawa, N. Reduction of power consumption of RSFQ circuits by inductance-load biasing / N. Yoshikawa, Y. Kato // *Supercond. Sci. Technol.* – 1999. – Vol. 12. – P. 918–920.

13. 18-GHz, 4.0-aJ/bit operation of ultra-low-energy rapid single-flux-quantum shift registers / M. Tanaka, M. Ito, A. Kitayama [et al.] // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 51. – P. 053102.

14. Ultra-low-power superconductor logic / Q. P. Herr, A. Y. Herr, O. T. Oberg, A. G. Ioannidis // *J. Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 109. – P. 103903.

15. Kirichenko, D. E. Zero static power dissipation biasing of RSFQ circuits / D. E. Kirichenko, S. Sarwana, A. F. Kirichenko // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2011. – Vol. 21. – P. 776–779.

16. An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device / N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa // *Supercond. Sci. Technol.* – 2013. – Vol. 26. – P. 035010.

17. Holmes, D. S. Energy-Efficient Superconducting Computing — Power Budgets and Requirements / D. S. Holmes, A. L. Ripple, M. A. Manheimer // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2013. – Vol. 23. – P. 1701610.

18. Gueret, P. Investigations for a Josephson Computer Main Memory / P. Gueret, A. Moser, P. Wolf // *IBM J. Res. Dev.* – 1980. – Vol. 24. – P. 155–166.

19. Suzuki, H. A 4k Josephson Memory / H. Suzuki, N. Fujimaki, H. Tamura // *IEEE Trans. Magn.* – 1989. – Vol. 25. – P. 783–788.

20. Magnetic switches based on Nb-PdFe-Nb Josephson junctions with a magnetically soft ferromagnetic interlayer / V. V. Bol'ginov, V. S. Stolyarov, D. S. Sobanin [et al.] // *JETP Lett.* – 2012. – Vol. 95. – P. 366–371.

21. Ferromagnetic Josephson switching device with high characteristic voltage / T. I. Larkin, V. V. Bol'ginov, V. S. Stolyarov [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 100. – P. 222601.

22. Theoretical model of superconducting spintronic SISFS devices / S. V. Bakurskiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 102. – P. 192603.

23. Josephson magnetic memory cell system / O. Naaman, D. L. Miller, A. Y. Herr, N. O. Birge // *Patent US 9013916 B2.* – 2015.

24. Hybrid superconducting-magnetic memory device using competing order parameters / B. Baek, W. H. Rippard, S. P. Benz [et al.] // *Nat. Commun.* – 2014. – Vol. 5. – P. 3888.

25. Memory effect and triplet pairing generation in the superconducting exchange biased Co/CoOx/Cu41Ni59/Nb/Cu41Ni59 layered heterostructure /

- V. I. Zdravkov, D. Lenk, R. Morari [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 103. – P. 062604.
26. Controllable  $0-\pi$  Josephson junctions containing a ferromagnetic spin valve / E. C. Gingrich, B. M. Niedzielski, J. A. Glick [et al.] // Nat. Phys. – 2016. – Vol. 12. – P. 564–567.
27. Memory cell based on a  $\varphi$  Josephson junction / E. Goldobin, H. Sickinger, M. Weides [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 102. – P. 242602.
28. Demler, E. Superconducting proximity effects in magnetic metals / E. Demler, G. Arnold, M. Beasley // Phys. Rev. B. – 1997. – Vol. 55. – P. 15174–15182.
29. Micromagnetic modeling of critical current oscillations in magnetic Josephson junctions / I. A. Golovchanskiy, V. V. Bolginov, V. S. Stolyarov [et al.] // Phys. Rev. B. – 2016. – Vol. 94. – P. 214514.
30. Tagirov, L. R. Low-field superconducting spin switch based on a superconductor/ferromagnet multilayer / L. R. Tagirov // Phys. Rev. Lett. – 1999. – Vol. 83. – P. 2058–2061.
31. Uspenskaya, L. S. Anomalous magnetic relaxation in thin Pd<sub>0.99</sub>Fe<sub>0.01</sub> films / L. S. Uspenskaya, I. N. Khlyustikov // J. Exp. Theor. Phys. – 2017. – Vol. 125. – P. 875–878.
32. Шмидт, В. В. Введение в физику сверхпроводников / В. В. Шмидт. – Изд. 2-е. – М.: МЦНМО, 2000. – 402 с.
33. Protected  $0-\pi$  states in SISFS junctions for Josephson memory and logic / S. V. Bakurskiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2018. – Vol. 113. – P. 082602.
34. Wang, C. C. 67.5-fJ per access 1-kb SRAM using 40-nm logic CMOS process / C. C. Wang, C. P. Kuo // Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst. – 2021. – P. 1–4.
35. Mishra, A. K. A Partially Static High Frequency 18T Hybrid Topological Flip-Flop Design for Low Power Application / A. K. Mishra, U. Chopra, D. Vaithyanathan // IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs. – 2022. – Vol. 69. – P. 1592–1596.
36. Schmidt, V. V. The Physics of Superconductors / V. V. Schmidt. – Springer Berlin, Heidelberg, 1997. – 207 p.
37. Proximity effect and spontaneous vortex phase in planar SF structures / V. V. Ryazanov, V. A. Oboznov, A. S. Prokof'ev, S. V. Dubonos // JETP Lett. – 2003. – Vol. 77. – P. 39–43.