

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Карелиной Любови Николаевны «Разработка элементов джозефсоновской магнитной памяти на основе сплава $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы

Джозефсоновские контакты (ДК) являются уникальным макроскопическим квантовым объектом, вызывающим неослабевающий интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. ДК применяются в метрологии (стандарт электрического напряжения) и высокочувствительной магнитометрии (СКВИД-магнитометры), но еще большие перспективы обещает их применение в сверхпроводящей двоичной и квантовой электронике. В этом направлении, однако, имеется «узкое горло» – отсутствие сверхпроводящей памяти произвольного доступа, которая в полной мере удовлетворяет чрезвычайно жестким требованиям работы на тактовых частотах от десятков гигагерц до суб-терагерц с тепловыделением на переключение состояния ячейки, измеряемым в аттоджоулях, и «красной линией» для площади, занимаемой собственно ячейкой памяти, не превышающей квадратного микрометра. Одним из направлений решения этой проблемы является память, основанная на магнитных джозефсоновских контактах (МДК), являющихся, по сути, устройствами сверхпроводящей спинтроники. Диссертация Карелиной Л.Н. посвящена разработке физических основ джозефсоновской магнитной памяти на основе ферромагнитного сплава $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ в качестве слабой связи в МДК и с пристальным вниманием к совместимости с требованиями сверхпроводящей электроники по быстродействию, энергоэффективности и масштабируемости к микронным размерам. По этой причине **тема диссертационной работы Карелиной Л.Н. актуальна** и представляет несомненный интерес для дальнейших прикладных и технологических работ в области сверхпроводящей спинтроники.

Структура и содержание диссертации

Диссертация Карелиной Л.Н. включает введение, пять глав, заключение, списки авторских публикаций и цитированной литературы. Общий объем

диссертации составляет 158 страниц, которые включают 84 рисунка и библиографию из 157 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность работы, формулируется цель исследования, ставятся задачи, на решение которых было направлено защищаемое исследование, обосновываются новизна и практическая ценность полученных результатов, приводятся формулировки положений, выносимых на защиту.

Первая глава является обзорной, в ней приводятся сведения о фундаментальных свойствах слабоферромагнитных сплавов $Pd_{1-x}Fe_x$ в области малых концентраций железа в интервале 1-10 атомных процентов ($x = 0.01 - 0.1$). Особое внимание уделяется составу $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$, актуальному для настоящей работы. Далее дается обзор физических свойств гибридных структур ферромагнетик-сверхпроводник на основе разбавленного сплава $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$. Эта информация является пре-реквизитом к рассмотрению предшествующих работ по магнитной джозефсоновской памяти на основе сплава $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$. В результате проведенного анализа формулируются направления дальнейшего совершенствования дизайна ячеек магнитной джозефсоновской памяти, которые затем являются предметом исследований в последующих оригинальных главах. Наконец, последний параграф посвящен методике оценки быстродействия элементов магнитной джозефсоновской памяти.

Вторая глава оригинальная и целиком посвящена вопросам изготовления образцов и методике проведения экспериментов, связанные с личным вкладом автора в подготовку диссертации. Приведено описание установки магнетронного осаждения, которая использовалась для осаждения тонкопленочных слоев ниобия и $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$. Детально описываются и обосновываются внедренные автором методы контроля толщины и пространственного профиля осаждаемых металлических пленок, а также их применение к методам «протяжки» и «клина». Изложены методики приготовления основных типов образцов: двухслойных FS-пленок Nb- $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$, трехслойных FSF-мостиков и многослойных джозефсоновских SISFS-контактов. Описана использованная автором экспериментальная установка для измерения транспортных свойств на основе кристата 4He и методики измерений на ней.

Третья глава – оригинальная, она посвящена экспериментам по микроволновому стимулированию процесса записи цифрового состояния в SIsFS-элементах джозефсоновской магнитной памяти (S(s) – сверхпроводник, I – изолятор, F – $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$). В первом разделе приведено описание использованной экспериментальной установки и методик измерения вольт-амперных характеристик и определения критического тока образца. В нем дано определение цифровых состояний, обладающих разными уровнями критического тока, приведены характерные кривые перемагничивания. В следующем разделе рассматривается переключение SIsFS-контакта между двумя цифровыми состояниями, в присутствии и при отсутствии микроволнового сигнала. Оказывается, что при определенных условиях микроволновое поле «помогает» магнитной слабой связи ДК перемагничиваться, что трактуется как микроволновое стимулирование переключения МДК между различными логическими состояниями. Найдены оптимальные значения длительности и мощности СВЧ излучения, амплитуды перемагничивающего импульса, при которых эффект микроволнового стимулирования максимален и материализуется в кратном увеличении допустимого диапазона токов смещения.

В четвертой оригинальной главе представлена реализация SIsFS-элементов ($F=\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$) джозефсоновской магнитной памяти прямоугольной формы и обсуждаются перспективы их миниатюризации до субмикронных размеров. В отличие от выполненных ранее исследований ДК квадратной формы в плоскости контакта, в четвертой главе приведены результаты исследований ДК прямоугольной формы с большим отношением длинной стороны к короткой. На образце с отношением сторон, равным трем, продемонстрировано, что при ориентации остаточной намагниченности вдоль или поперек длинной стороны значения критического тока в нулевом поле существенно отличаются. Таким образом, выбрав ток смещения между полученными значениями критического тока, можно переключать ДК между сверхпроводящим и резистивным состояниями при помощи импульсов магнитного поля. Для другого ДК с отношением сторон, равным пяти, и значительно большим критическим током, оказалось, что магнитное поле тока смещения расщепляет «поперечное» магнитное состояние на два, остаточная намагниченность которых параллельна или антипараллельна собственному полю тока смещения. В результате, такой ДК приобрел три устойчивых состояния в нулевом магнитном поле, между которыми можно переключаться

импульсами биполярного магнитного поля. Проанализированы быстродействие и энергоэффективность исследованных ячеек памяти на совместимость с требованиями сверхпроводящей электроники, а также перспективы миниатюризации прямоугольных SIsFS-элементов джозефсоновской магнитной памяти, показавшие их работоспособность при уменьшении площади ДК до 2 мкм^2 .

Пятая оригинальная 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 вентилем, поскольку не содержит слоя антиферромагнетика, фиксирующего направление намагниченности одного из ферромагнетиков. Исследуется магнитосопротивление FSF-мостиков различных размеров в окрестности сверхпроводящего перехода. Магнитное поле прикладывалось параллельно току питания, протекающему вдоль мостика в плоскости образца. Были обнаружены гистерезисные провалы магнитосопротивления при двух магнитных полях $\pm 9\text{Э}$, соответствовавших антипараллельной конфигурации намагниченностей слоев $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$, что свидетельствовало об усилении сверхпроводимости в слое ниобия. Исследование магнитосопротивления показало, что при обходе малой (неполной) петли магнитного гистерезиса имеются две точки сопротивления в нулевом поле, сильно отличающиеся по величине. Продемонстрировано, что прикладывая импульсы биполярного магнитного поля с амплитудой в пределах малой петли можно переключать такую ячейку между состояниями с нулевым и конечным сопротивлением. Проанализирована совместимость параметров такой ячейки памяти с требованиями сверхпроводящей электроники.

В разделе Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые не вызывают сомнений и возражений.

Наиболее важными результатами диссертации являются следующие:

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. Найдена

оптимальная амплитуда импульса перемагничивающего магнитного поля, заметно меньшего, чем поле насыщения.

2. Впервые реализованы и исследованы элементы джозефсоновской магнитной памяти прямоугольной формы на основе многослойных SIsFS-контактов и измерены параметры их переключения.
3. Впервые показано, что при использовании SIsFS-контактов прямоугольной формы с большим соотношением сторон могут быть реализованы троичные элементы памяти (элементы с тремя устойчивыми состояниями).
4. Проанализированы перспективы миниатюризации прямоугольных SIsFS-элементов памяти. Показано, что их площадь потенциально может быть уменьшена до 2 мкм^2 при соотношении сторон около 50.
5. Обнаружен значительный 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 насыщения. Показано, что микроструктурирование не разрушает этот эффект.
6. Обнаружено, что низкорезистивное состояние FSF-микромостика обладает эффектом магнитной памяти. Продемонстрировано переключение такого образца между цифровыми состояниями под действием биполярных импульсов магнитного поля.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые выполнен полный цикл работ от приготовления образцов сверхпроводящих гетероструктур, содержащих ферромагнитные компоненты из сплава $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$, с использованием технологий оптической литографии, до измерения их физических характеристик и демонстрации заложенного в них функционала элементов памяти. В основе функционирования трех вариантов ячеек памяти лежат три принципиально разных физических эффекта, предоставляющих возможность выбора оптимального варианта при интегрировании с цепями сверхпроводящей электроники.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов определяются использованием современного научного оборудования, согласованностью результатов измерений, полученных разными физическими методами, выполнением тестовых измерений, выполнением моделирования,

хорошо согласующегося с экспериментальными данными, а также сопоставлением и согласием полученных результатов с литературными данными.

Научная и практическая значимость работы заключается в развитии основ технологии и принципов функционирования сверхпроводящей спинтронной памяти, обладающей чрезвычайно большим быстродействием, энергоэффективностью, на порядки величин превосходящей современные полупроводниковые ячейки памяти, и обладающей потенциалом интеграции с современными вариантами сверхпроводящей электроники для суперкомпьютинга и работы с большими данными. Немаловажным для приложений в электронике является и вопрос миниатюризации к микронным масштабам, которому уделяется систематическое внимание во всей диссертационной работе.

Замечания по диссертации:

1. вплоть до стр. 74 нет упоминания, на каких подложках приготавливались образцы;
2. на стр. 49 дана ссылка на формулу (17) вместо (19);
3. на Рис. 3 не указано соответствие номеров линий температурам измерений;
4. на стр. 127-128 только немного затронут вопрос о возникновении триплетных компонент сверхпроводящего спаривания при неколлинеарных магнитных конфигурациях в образцах. Генерация триплетных компонент также может быть физическим эффектом, обеспечивающим функционал ячейки памяти;
5. в диссертации не указано, проводилось ли микромагнитное моделирование, использованное в ходе работы, с помощью самостоятельно написанной диссертантом программы, или же с помощью внешних программ типа OOMMF;
6. есть систематические отсутствие пунктуации вводных предложений в сложносочиненных предложениях (стр. 22, 35, 81, ...) и в пунктуации междометия «однако» в начале предложения (стр. 17, 20, 23, 135);

7. есть технический брак со степенями величин и использованием наклонных букв для обозначения переменных в тексте и формулах (нужно ориентироваться на ЛАТЭХ) (стр. 12, 13, 22, 26, 31, 81);
8. формулы – тоже часть текста, поэтому знаки препинания в них тоже ставятся.

Приведенные замечания, однако, не снижают общей высокой оценки представленной диссертации. В целом, следует отметить, что диссертационная работа Карелиной Л.Н. демонстрирует высокую квалификацию автора как физика-экспериментатора в равной мере владеющего экспериментальным оборудованием и методами его использования, а также знанием и умением моделирования полученных результатов и анализа физических причин и эффектов, лежащих в основе выбора или построения модели и ее анализа. Это существенно повышает достоверность и значимость результатов, а также дает инструмент для предсказательного моделирования – численного эксперимента, который может значительно сократить время и материальные затраты на планирование дальнейшего эксперимента.

Полученные результаты представляют большой интерес и могут быть рекомендованы к использованию в Институте химической физики (г. Москва), Физико-техническом институте ФИЦ КазНЦ РАН (г. Казань), МГТУ им. Н. Э. Баумана, Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС», Казанском федеральном университете, Московском государственном университете, Институте физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), и в ряде других научных центрах, занимающихся исследованиями физики сверхпроводящих гетероструктур.

Основные результаты диссертации опубликованы в пяти статьях в высокорейтинговых международных научных журналах, входящих в перечень ВАК, а также докладывались на ряде российских и международных конференций. **Автореферат диссертации полностью отражает её основное содержание.**

По своему содержанию, объему, новизне, достоверности, и практической значимости полученных результатов диссертация на тему «Разработка элементов джозефсоновской магнитной памяти на основе сплава $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$ » удовлетворяет требованиям, установленным "Положением о порядке присуждения степеней" (пункты 9-11,13,14), утвержденного постановлением

Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, и Паспорту специальности 1.3.8, а ее автор, Карелина Любовь Николаевна, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук (01.04.02 – теоретическая физика),
профессор, ведущий научный сотрудник
лаборатории нелинейной оптики
Казанского физико-технического
института им. Е.К. Завойского –
обособленного структурного
подразделения Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки «Федеральный
исследовательский центр «Казанский
научный центр Российской академии наук»
Тагиров Ленар Рафгатович


18.11.2022г.

Адрес: 420029, г. Казань,
ул. Сибирский тракт, д.10/7,
тел. (843)2319074
e-mail: ltagirov@mail.ru

Я, Тагиров Ленар Рафгатович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.136.01 (Д 002.100.02), и их дальнейшую обработку.



Подпись *Тагирова Л.Р.*
Зав. канцелярией КФТИ - обособленное
структурное подразделение ФЦИК КазНЦ РАН
Куркина Н.Г.