

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор ИФМ РАН-

филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки

"Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН",



д.ф.-м.н.

А.В.Новиков

10 ноября 2022г.

Отзыв

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

В диссертации Карелиной Л.Н., представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния», приведены результаты экспериментальных исследований гибридных систем сверхпроводник - ферромагнетик. Проблема взаимодействия сверхпроводимости и магнетизма в таких системах привлекает большое внимание как теоретиков, так и экспериментаторов. Работы по этой тематике постоянно появляются в ведущих физических журналах. Результаты автора диссертации могут быть отнесены к ряду ключевых направлений в данной тематике, таких как использование гибридных систем сверхпроводник – ферромагнетик в устройствах быстрой одноквантовой логики и сверхпроводящих вентилях. Мотивация данных работ существенно связана с перспективами реализации новых элементов сверхпроводниковой электроники. Акцент в диссертации сделан на использовании слабоферромагнитного сплава PdFe . Выбранный объект исследования интересен не только в плане возможных приложениях, но также и с точки зрения изучения фундаментальных особенностей джозефсоновского транспорта и эффекта близости в этих структурах. Здесь следует особенно подчеркнуть **важность и актуальность** полученных автором результатов, в контексте работ, которые ведутся в мире в упомянутом выше направлении физики сверхпроводников. Все опубликованные результаты, безусловно, относятся к «горячей теме» в физике конденсированного состояния.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, пяти глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 158 страницах, включает 84 рисунка.

Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава знакомит читателя с литературой по основным свойствам исследуемого слабого ферромагнитного сплава $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$, а также содержит обзор проблем джозефсоновской магнитной памяти и сверхпроводящего вентильного эффекта.

Во второй главе описаны основные технологические процессы и процедуры, которые использовались при изготовлении образцов гибридных структур сверхпроводник – ферромагнетик, включая осаждение тонкопленочных металлических слоев, контроль их толщины и профиля, описание фотолитографии и различных методов селективного травления. Приведено подробное описание экспериментальной установки на основе криостата ^4He , оборудованного системой откачки паров гелия для получения низких температур, и представлен обзор используемых в работе методик низкотемпературного эксперимента.

Третья глава посвящена изучению влияния электромагнитного излучения в гигагерцовом диапазоне частот на перемагничивание барьера джозефсоновского SIsFS-контакта квадратной формы импульсным магнитным полем. Представлены результаты измерений критического тока контакта в зависимости от магнитного состояния, установившегося в ферромагнитном барьере. Показано, что использование дополнительного микроволнового импульса при магнитном переключении увеличивает допустимый диапазон токов смещения через джозефсоновский контакт, обеспечивающих работу последнего в качестве элемента памяти. **Обнаружен** эффект стимуляции перемагничивания ферромагнитного барьера SIsFS-контакта под действием СВЧ поля. Величина эффекта зависит от амплитуды перемагничивающего импульса, температуры и растет с увеличением полной энергии СВЧ импульса.

В четвертой главе продемонстрирована работа джозефсоновских элементов магнитной памяти на основе многослойных SIsFS-контактов прямоугольной формы, в которых информация может быть закодирована с помощью продольной или поперечной ориентации остаточной намагниченности ферромагнитного барьера, а также проанализированы перспективы миниатюризации подобных элементов памяти до субмикронных размеров путем перехода от квадратных контактов к прямоугольным. **Впервые** реализованы и исследованы элементы джозефсоновской магнитной памяти с двумя (двоичные) и тремя (троичные) состояниями на основе многослойных джозефсоновских SIsFS-контактов прямоугольной формы.

В пятой главе изучены магниторезистивные эффекты в трехслойных планарных микромостиках на основе структуры $\text{PdFe}/\text{Nb}/\text{PdFe}$ с различной толщиной ферромагнитных слоев PdFe (сверхпроводящий псевдо спиновой вентиль). Обнаружено заметное уменьшение сопротивления гибридной структуры в магнитных полях, направление которых противоположно направлению исходной намагниченности ферромагнитных слоев, связанное с усилением сверхпроводимости в тонком слое ниобия. Показано, что состояние с низким сопротивлением (низкорезистивное) обладает эффектом магнитной памяти. Это обеспечивает возможность воспроизводимого переключения гибридной структуры между высокорезистивным намагниченным и низкорезистивным состояниями с помощью биполярных импульсов внешнего магнитного поля. **Обнаружено** усиление магниторезистивного эффекта при понижении температуры, связанное с зависимостью критического тока и дифференциального сопротивления микромостика от его магнитного состояния.

В заключительном разделе сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Наиболее важными результатами диссертации являются:

1. Обнаружен эффект стимуляции с помощью импульса микроволнового излучения процесса перемагничивания слоя слабого ферромагнетика $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$, входящего в состав барьера джозефсоновского FSIsFS-элемента сверхпроводниковой магнитной памяти.
2. Впервые проведены исследования многослойных джозефсоновских SIsFS-контактов прямоугольной формы с большим отношением сторон и показана возможность реализации на их основе масштабируемых элементов магнитной памяти с двумя и тремя цифровыми состояниями.
3. Обнаружены заметный магниторезистивный эффект и эффект магнитной памяти в сверхпроводящем псевдо спиновом вентиле на основе трехслойных планарных FSF-микромостиков $\text{PdFe}/\text{Nb}/\text{PdFe}$ с различной толщиной ферромагнитных слоев, при котором сопротивление структуры резко уменьшается в магнитных полях, противоположных по направлению к изначальной намагниченности слоев PdFe .

Практическая значимость:

Результаты экспериментальных исследований особенностей джозефсоновского транспорта и эффекта близости в гибридных системах сверхпроводник – ферромагнетик на основе слабоферромагнитного сплава PdFe представляют несомненный практический интерес и могут быть использованы для разработки масштабируемых энергоэффективных элементов магнитной памяти, обладающей технологической и частотной совместимостью в схемах быстрой одноквантовой логики.

Выводы, приведенные автором в заключении диссертации, кратко излагают основные результаты, полученные автором в диссертационной работе. Заключение завершается списком опубликованных работ. Приведенный выше анализ диссертации по главам подчеркивает **научную новизну основных результатов** диссертации. **Достоверность основных выводов**, сформулированных диссертантом, обеспечивается правильным выбором необходимых методов исследования и апробацией работы на Российских и Международных конференциях. Новизна и практическая значимость полученных результатов, подтверждаются достаточным количеством публикаций в ведущих физических журналах. Материалы диссертации опубликованы в 5 (пяти) статьях в научных журналах, рекомендованных ВАК для опубликования материалов диссертационных исследований и индексируемых базой данных «Web of Science».

Вместе с тем по диссертации можно сделать некоторые критические замечания.

1. Замечания по главе 3.
 - А. В диссертации практически не обсуждаются проявления ферромагнитного резонанса в механизме стимулирования перемагничивания СВЧ импульсом, хотя и отмечено, что "...рабочая частота также соизмерима с частотой ферромагнитного резонанса (ФМР)...". Наблюдались ли какие-либо особенности ВАХ из-за соизмеримости рабочей частоты и частоты ФМР?
 - Б. СВЧ излучение увеличивает отличие значений критического тока $I_c(0)$ и $I_c(1)$ в состояниях 0 и 1, соответственно. Каков механизм влияния СВЧ излучения на конечное магнитное состояние F слоя? Есть ли отличие конечных магнитных состояний F слоя при наличии/отсутствии импульса ВЧ излучения?
2. Замечания по главе 4.
 - А. В диссертации указано, что "Цифровое состояние может сохраняться в течение как минимум нескольких десятков секунд." Отличаются ли времена жизни магнитных состояний в прямоугольном барьере, намагниченном вдоль длинной и короткой сторон? Как эти времена зависят от геометрии образца?

Б. Используемая в расчетах модель учитывает магнитостатическое взаимодействие кластеров. Из описания модели не ясно, учитывается ли при этом влияние полей рассеяния вне образца?

3. Замечания по главе 5.

А. Каковы физические аргументы в пользу предположения о зависимости эффективной обменной энергии от толщины ферромагнитного слоя (37)?

Б. Приведенные на Рис.74 зависимости магнитосопротивления FSF-мостиков с разным соотношением сторон соответствуют разным температурам. Это затрудняет их сравнение.

В тексте диссертации имеются некоторые технические недочеты.

В подписи к рисунку 3 не указано, какая температура соответствует какой петле гистерезиса.

На стр.28 вызывает вопросы фраза "При этом в главе 5 показано, что толщина слоя сверхпроводящего ниобия 11–15 нм достаточно мала для наблюдения практически значимых эффектов в слоистых FS-структурах Nb–Pd_{0.99}Fe_{0.01}." Неясно о каких конкретных "значимых эффектах" идет речь в тексте.

Приведенные замечания, однако, не снижают общей высокой оценки представленной диссертации и значимости полученных результатов. Все поставленные в диссертационной работе цели достигнуты и соответствуют положениям, выносимым на защиту. В целом, следует отметить, что диссертационная работа Карелиной Л.Н. демонстрирует высокую квалификацию автора как физика-экспериментатора и является существенным вкладом в развитие физики гибридных сверхпроводящих систем.

Диссертационная работа Карелиной Любови Николаевны «**Разработка элементов джозефсоновской магнитной памяти на основе сплава Pd_{0.99}Fe_{0.01}**» представляет собой законченное научное исследование на актуальную тему, и содержит новые важные результаты, которые могут быть рекомендованы к использованию для **решения различных задач физики конденсированного состояния** в научных коллективах: Институт физики твердого тела РАН (г. Черноголовка), Физико-технический институт им. Иоффе (г. Санкт-Петербург), Институт физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт физических проблем им. П.Л. Капицы (г. Москва), Московский государственный университет (г.Москва), Институт физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва), Московский Физико-Технический Институт (г. Долгопрудный), Московский Институт Стали и Сплавов (г. Москва) и других научных центрах, занимающихся исследованиями по данной проблеме.

Диссертация и автореферат написаны хорошим и понятным языком. **Автореферат полностью отражает содержание диссертации.**

Итак, результаты диссертации представляются достоверными и научно обоснованными, обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью. Диссертация представляет собой законченную работу, которая соответствует всем критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Карелина Любовь Николаевна, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Доклад по материалам диссертационной работы был заслушан и обсужден на научном семинаре по физике твердого тела 17 октября 2022 г.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук (специальность 01.04.07 – «физика конденсированного состояния») заведующим отделом физики сверхпроводников ИФМ РАН, Мельниковым Александром Сергеевичем (Россия, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105, тел. +79103929860, E-mail: melnikov@ipm.sci-nnov.ru).

Доктор физ.-мат. наук,

Главный научный сотрудник ИФМ РАН

Зав.отделом физики сверхпроводников

А.С.Мельников

Подпись Мельникова А.С.заверяю:

Ученый секретарь ИФМ РАН

к.ф.-м.н.

Гапонова Д.М.



«10» ноября 2022 года

Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН) (телефон: 8 (831) 417-94-73, e-mail: director@ipmras.ru, сайт: <http://www.ipmras.ru>). Почтовый адрес: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ИФМ РАН.