

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.136.01 (Д 002.100.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА ИМЕНИ Ю.А. ОСИПЬЯНА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК.

аттестационное дело №

решение диссертационного совета от 6 декабря 2022 г. № 10

О присуждении Карелиной Любови Николаевне, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка элементов джозефсоновской магнитной памяти на основе сплава $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$ » по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния принята к защите 26.09.2022 (протокол заседания №7) диссертационным советом 24.1.136.01 (Д 002.100.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук 142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 2, Приказ Минобрнауки от 17.10.2019 N 925/нк.

Соискатель Карелина Любовь Николаевна, 17.12.1992 года рождения, в 2017 году окончила магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по специальности «03.03.01 прикладные математика и физика». В 2021 г. окончила аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия. Справка об обучении в аспирантуре № 413 выдана в 2022 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН). С 2017 года Карелина Любовь Николаевна работает младшим научным сотрудником ИФТТ РАН. Диссертация выполнена в лаборатории сверхпроводимости ИФТТ РАН.

Научный руководитель:

Рязанов Валерий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией сверхпроводимости Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук.

Научный консультант:

Большин Виталий Валериевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории сверхпроводимости Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Тагиров Ленар Рафгатович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник 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»,

Семенов Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей и экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет»,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - Институт физики микроструктур РАН (ИФМ РАН) – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), **в своём положительном заключении**, подписанном Александром Сергеевичем Мельниковым, доктором физико-математических наук, заведующим отделом физики сверхпроводимости в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» и утверждённом директором ИФМ РАН, доктором физико-математических наук Новиковым Алексеем Витальевичем, **указала**, что проблема взаимодействия сверхпроводимости и магнетизма в гибридных системах сверхпроводник - ферромагнетик 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 в сверхпроводящих вентилях. Мотивация данных работ тесно связана с перспективами реализации новых элементов

сверхпроводниковой электроники. Акцент в диссертации сделан на использовании слабоферромагнитного сплава $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$. Выбранный объект исследования интересен как в плане возможных приложений, так 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 данном направлении физики сверхпроводников. Все опубликованные результаты, безусловно, относятся к «горячей теме» в физике конденсированного состояния.

В качестве замечаний было отмечено:

1. В диссертации практически не обсуждаются проявления ферромагнитного резонанса в механизме стимулирования перемангничивания 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?

2. 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?

3. 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?

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

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

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

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

8. 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.

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

Соискатель имеет 5 опубликованных работ по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях:

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.

На диссертацию и автореферат поступило 4 отзыва. Были высказаны следующие замечания:

Кошелец Валерий Павлович (д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН), отмечает отсутствие в автореферате изображений разрезов исследуемых многослойных элементов сложной геометрии, которые приведены в полном тексте диссертации.

Кленов Николай Викторович (д.т.н., доцент, профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова) отмечает, что не разобрана подробно перспективная с точки зрения применений топология магнитной джозефсоновской памяти с микроволновым стимулированием.

Шукринов Юрий Маджнунович (д.ф.-м.н, ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, профессор Кафедры нанотехнологий и новых материалов Университета «Дубна») отмечает присутствующую в автореферате неточность в терминологии: произвольное использование терминов «сверхпроводящий» и «сверхпроводниковый».

Фоминов Яков Викторович (д.ф.-м.н, зам. директора по научной работе Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук) отмечает, что при чтении автореферата диссертации у него возник ряд вопросов:

1. Ряд результатов относится к поведению исследованных слоистых систем в параллельном слоем магнитном поле. С какой точностью поле в действительности является параллельным слоем? Позволяет ли эта точность исключить качественно иные эффекты, связанные с возникновением вихрей за счет нормальной компоненты поля?
2. На рис. 7(а) показано поведение критической температуры FS-бислоев как функции толщины F слоя. При этом теоретическая подгонка представлена монотонной кривой, в то время как поведение экспериментальных точек весьма похоже на немонотонное. Эффект немонотонной зависимости действительно известен в таких системах. Связана ли наблюдаемая зависимость с известным механизмом интерференции в F слое или же здесь причины такого поведения другие?
3. На рис. 8(б) показаны кривые магнитосопротивления FSF-мостиков. Из приведенных результатов кажется, что в момент перемагничивания одного из слоев имеется локальный максимум сопротивления (сменяющийся затем минимумом в результате полного перемагничивания слоя и перехода всей системы в антипараллельное состояние). Может ли локальный максимум сопротивления быть связан с усилением эффективного паразитирующего рассеяния на магнитных неоднородностях (которые наиболее выражены как раз в коэрцитивном состоянии)?

Несмотря на все вышеперечисленные замечания, все отзывы положительные, и в них отмечается, что диссертационная работа Карелиной Л.Н. является законченным исследованием, выполненным в актуальном направлении, а также что диссертация отвечает всем требованиям Высшей аттестационной комиссии.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что

Тагиров Ленар Рафгатович доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник 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», является ведущим специалистом в области сверхпроводимости, магнетизма и их взаимодействия в гибридных системах на основе сверхпроводников и магнетиков. Автор 224 научных работ.

Семенов Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей и экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет» является ведущим специалистом в области исследования фундаментальных основ сверхпроводниковых детекторов и других элементов сверхпроводниковой электроники на основе тонкопленочных сверхпроводящих структур. Автор 37 научных работ.

Сотрудники отдела физики сверхпроводимости ведущей организации – Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», широко известны своими научными достижениями и способны оценить актуальность, новизну, научную и практическую значимость диссертационной работы. ИФМ РАН – один из признанных мировых лидеров в области теоретических, экспериментальных и технологических исследований сверхпроводниковых гибридных структур на основе сверхпроводников, ферромагнетиков и нормальных металлов.

Диссертационный совет отмечает, что выполненные соискателем исследования и обнаруженные эффекты обеспечивают новые подходы к реализации сверхпроводниковой магнитной памяти, в том числе, в части физических основ ее функционирования, адресации к ее элементам, уменьшению их размеров, улучшению быстродействия и энергоэффективности.

К наиболее существенным научным результатам относятся:

- Продемонстрирован эффект микроволнового стимулирования записи цифрового состояния элементами сверхпроводниковой магнитной памяти, способный обеспечить подход к адресации к отдельным элементам в матрице.
- Впервые реализованы и исследованы джозефсоновские элементы магнитной памяти прямоугольной формы, миниатюризация которых может производиться уменьшением их ширины.
- Показано, что использование джозефсоновских магнитных элементов сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник (SFS-элементов) прямоугольной формы позволяет реализовать не только бинарные, но и троичные элементы памяти.
- Детально исследованы особенности сверхпроводящих и магнито-транспортных характеристик многослойных структур на основе сверхпроводящего ниобия и слабомагнитного

сплава $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$. Обнаружены нетривиальные магниторезистивные эффекты в трехслойных FSF-микромостиках $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{-Nb-Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$, связанные с взаимной ориентацией намагниченностей ферромагнитных слоев $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$. Показано, что микроstructuring не нарушает обнаруженные эффекты, и это позволяет использовать их в устройствах памяти микронных и, возможно, субмикронных размеров.

- Обнаружено, что низкорезистивное состояние FSF-микромостиков обладает эффектом магнитной памяти. Продемонстрировано переключение такого элемента между цифровыми состояниями под действием импульсов магнитного поля.

Новизна и фундаментальная значимость диссертации связана с полученными оригинальными результатами в области исследования сосуществования сверхпроводимости и магнетизма в слоистых гибридных структурах, обнаружением новых магниторезистивных явлений, анализом этих явлений в рамках существующих теоретических моделей.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенных подходов и разработанных структур для реализации сверхпроводящей (джозефсоновской) магнитной памяти для нового поколения цифровой электроники.

Достоверность представленных к защите результатов обеспечивается использованием современных экспериментальных методов и непротиворечивым объяснением полученных данных на основе современных теоретических моделей. Представленные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ и входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, а также неоднократно докладывались на международных конференциях и выставках.

Личный вклад соискателя состоит в разработке и применении тонкопленочных методов при изготовлении всех исследованных структур, проектировании их дизайнов, выполнении магниторезистивных низкотемпературных измерений, активном участии в интерпретации полученных результатов и подготовке публикаций.

Диссертационный совет заключает, что диссертация Карелиной Любови Николаевны является самостоятельной завершенной научной квалификационной работой. Работа Карелиной Л.Н. полностью отвечает всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук в соответствии с п.9 Положения о присуждении учёных степеней Постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.

На заседании 6 декабря 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Карелиной Л.Н. учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек из них 21 доктор наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 28 человек, входящих в состав совета, проголосовали "за" — 21, "против" — 0, "недействительных бюллетеней" — 0.

Председатель
диссертационного совета
чл.-корр. РАН



Левченко Александр Алексеевич

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

Курлов Владимир Николаевич

7 декабря 2022г