

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.238.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
ИМ.А.В. ГАПОНОВА-ГРЕХОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27.02.2025 № 2

О присуждении Пашенькину Игорю Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Эффекты обменного и спин-орбитального взаимодействия в немагнитных прослойках ферромагнитных наноструктур» по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния – принята к защите 19 декабря 2024 г. (протокол заседания № 19) диссертационным советом 24.1.238.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ о создании диссертационного совета номер 670/нк от 30 июня 2017 года.

Соискатель Пашенькин Игорь Юрьевич, 1994 года рождения, в 2018 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» по специальности «11.04.04 Электроника и наноэлектроника», освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН) (срок обучения 01.09.2020 – 31.08.2024), работает в должности младшего научного сотрудника ИФМ РАН.

Диссертация выполнена в отделе магнитных наноструктур ИФМ РАН.

Научный руководитель – Сапожников Максим Викторович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом магнитных наноструктур ИФМ РАН.

Официальные оппоненты:

1. Мильев Михаил Анатольевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией квантовой нано-спинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук».

2. Пятаков Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики колебаний физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (НИУ МИЭТ) – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном директором центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» НИУ МИЭТ, кандидатом физико-математических наук, Дюжевым Николаем Алексеевичем, начальником научно-исследовательской лаборатории «Моделирование и разработка изделий нано- и микросистемной техники» ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» НИУ МИЭТ, доцентом Института интегральной электроники имени академика К. А. Валиева НИУ МИЭТ Деминым Глебом Дмитриевичем, и утвержденном проректором по научной работе НИУ МИЭТ, кандидатом

технических наук Дроновым Алексеем Алексеевичем, указала, что к наиболее значимым новым результатам работы можно отнести следующие:

1. Впервые обнаружена зависимость межслоевого обменного взаимодействия в туннельных магнитных контактах $\text{CoFeB/MgO/CoFeB/IrMn}$ от приложенного к барьеру электрического поля. Эффект проявляется в сдвиге кривой намагничивания свободного слоя по магнитному полю на величину порядка 6 Э при приложении к туннельному магнитному контакту напряжения величиной 1 В . Приложение к контакту коротких импульсов электрического напряжения величиной 2 В длительностью 100 нс приводит к изменению его магнитного и, соответственно, резистивного состояния. Оценка изменения проекции средней намагниченности свободного слоя на ось однонаправленной анизотропии в закреплённом слое составила $\Delta M_x = M_S$. При этом плотность тока импульса не превышает 10^4 А/см^2 .

2. Обнаружен новый эффект Холла в туннельных контактах CoFeB/MgO/НМ (НМ – (немагнитный металл) = Pt, Ta), обусловленный спин-орбитальным взаимодействием туннелирующих электронов с сильным внешним электрическим полем, приложенным к барьеру. Эффект проявляется в квадратичной зависимости поперечной разности потенциалов на НМ электродах от приложенного к барьеру напряжения и не зависит от материала НМ-электрода.

3. Впервые экспериментально продемонстрирован эффект обменного усиления магнитокалорической эффективности прослоек «слабых» ферромагнетиков между слоями «сильных» ферромагнетиков в структурах $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{72}\text{Cu}_{28}/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ (в 7 раз) и Fe/Gd/Fe (в 5 – 7 раз) по сравнению с отдельными парамагнитными пленками.

В конце отзыва делается заключение, что диссертация Пашенькина Игоря Юрьевича соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе, критериям раздела II Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 с последующими изменениями, а ее автор, Пашенькин Игорь Юрьевич, несомненно заслуживает присуждения ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Соискатель по теме диссертации имеет 11 опубликованных работ в рецензируемых научных журналах, 5 из которых приведены ниже:

1. Пашенькин, И. Ю. Магнитоэлектрический эффект в туннельных магниторезистивных контактах CoFeB/MgO/CoFeB / И. Ю. Пашенькин, М. В. Сапожников, Н. С. Гусев, В. В. Рогов, Д. А. Татарский, А. А. Фраерман, М. Н. Волочаев // Письма в ЖЭТФ. — 2020. — т. 111, вып. 12, С. 815.
2. Pashen'kin, I. Yu. Magnetization Reversal of Magnetic Tunnel Junctions by Low-Current Pulses / I. Yu.Pashen'kin, N. S. Gusev, D. A. Tatarskiy, M.V. Sapozhnikov // IEEE Trans. Electron Devices. — 2024. — Vol. 71, no. 4. — P. 2755–2759.
3. Pashenkin, I. Yu. Extrinsic tunnel Hall effect in MgO-based tunnel junctions / I. Yu. Pashenkin, M. V. Sapozhnikov, N. S. Gusev, E. A. Karashtin, A. A. Fraerman // Phys. Rev. B. — 2022. — Vol. 106, no. 22. — P. L220408.
4. Караштин, Е. А. Эффект Холла в туннельных магнитных контактах / Е. А. Караштин, Н. С. Гусев, И. Ю. Пашенькин, М. В. Сапожников, А. А. Фраерман // ЖЭТФ. – 2023. – т. 163, вып. 1. – С. 5–13.
5. Пашенькин, И. Ю. Увеличение магнитокалорической эффективности прослойки Gd между сильными ферромагнетиками / И. Ю. Пашенькин, Н. И. Полушкин, М. В. Сапожников, Е. С. Демидов, Е. А. Кравцов, А. А. Фраерман // Физика твердого тела. — 2022. — т 64, вып. 10. — С. 1357 – 1364.

Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступило 2 отзыва (**все положительные**):

1) Грановский Александр Борисович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.11: – «Физика магнитных» явлений, профессор кафедры магнетизма физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» в отзыве на автореферат диссертации

отмечает, что представленная работа по новизне, количеству и значимости полученных результатов выходит за рамки кандидатской диссертации. Представленная к защите диссертация является экспериментальной работой самого высокого уровня, и не уступает по достигнутым результатам уровню лучших мировых достижений. Работа включает в себя оригинальную постановку задачи, изготовление оригинальных образцов, их детальную характеристику, изучение магнитных, магнитотранспортных, магнитокалорических свойств и детальный анализ с сопоставлением полученных результатов с существующими теориями.

2) Журавлев Михаил Евгеньевич, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений» профессор кафедры проблем конвергенции естественных и гуманитарных наук Факультета свободных искусств и наук ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», отмечает что в целом, новизна, актуальность, научная и практическая значимость работы И. Ю. Пашенькина не вызывают сомнений и диссертационная работа удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 (с последующими изменениями) «О порядке присуждения ученых степеней», а её автор, Пашенькин Игорь Юрьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных физике магнитных явлений и, в частности, физике многослойных магнитных структур (ведущая организация – более 10 публикаций, оппонент Миляев М. А. – более 10 публикаций, оппонент Пятаков А. П. – более 10 публикаций, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что в работе, в результате выполненных соискателем исследований:

Отработана технология изготовления туннельных магнитных контактов CoFeV/MgO/CoFeV микронного и субмикронного латерального размера, демонстрирующие эффект туннельного магнитосопротивления величиной 200 % при комнатной температуре. **Показано**, что в зависимости от геометрических параметров туннельных магнитных контактов и структуры свободного слоя в нем реализуется квазиоднородное или вихревое распределение намагниченности.

Экспериментально обнаружен новый магнитоэлектрический эффект в туннельных магнитных контактах CoFeV/MgO/CoFeV , заключающийся в зависимости межслоевого обменного взаимодействия от электрического напряжения, приложенного к барьеру. Эффект проявляется в сдвиге кривой намагничивания свободного слоя по магнитному полю на 6 Э при приложении к контакту напряжения 1 В. **Показано**, что приложение к туннельному магнитному контакту короткого импульса электрического напряжения величиной 2 В длительностью 100 нс приводит к изменению его магнитного состояния.

Экспериментально обнаружен новый поперечный транспортный эффект в туннельных контактах CoFeV/MgO/NM ($\text{NM}=\text{Pt, Ta}$), обусловленный спин-орбитальным взаимодействием туннелирующих электронов с сильным электрическим полем, приложенным к барьеру. А именно, холловская разность потенциалов на немагнитном электроде квадратично зависит от напряжения, приложенного к туннельному контакту и не зависит от материала NM-электрода.

Экспериментально продемонстрировано обменное усиление магнитокалорического эффекта в структурах, состоящих из прослоек парамагнетика (ферромагнетика при температуре выше его температуры Кюри) между слоями ферромагнетиков. **Показано**, что магнитокалорическая эффективность прослоек в структурах $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{72}\text{Cu}_{28}/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ возрастает в

7 раз по сравнению с отдельной пленкой NiCu, а в структурах и Fe/Gd/Fe – в 5 – 7 раз по сравнению с отдельной пленкой Gd.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

Отработанная технология изготовления туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB с магнетосопротивлением 200 % при комнатной температуре может быть использована для разработки датчиков магнитного поля, магниторезистивной памяти, а также приемников и генераторов СВЧ излучения.

Возможность управления межслоевым обменным взаимодействием в туннельных магнитных контактах приложением к барьеру электрического напряжения, продемонстрированная в работе, может быть использована для разработки энергоэффективной магниторезистивной памяти с произвольным доступом.

Обнаруженный новый поперечный транспортный эффект в туннельных контактах представляет интерес с фундаментальной точки зрения и способствует расширению представлений о процессах спин-орбитального взаимодействия в подобных системах, а также может быть использован для управления транспортными свойствами магнитных наноструктур.

Оценка достоверности результатов исследования:

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием современного технологического и измерительного оборудования, а также адекватным выбором использованных подходов. Научные положения диссертации не противоречат экспериментальным результатам и теоретическим моделям других научных групп. Полученные результаты опубликованы в реферируемых журналах и доложены на ряде международных конференций.

Личный вклад соискателя в исследования, вошедшие в диссертацию:

1. Основной вклад в разработку технологии и изготовление многослойных магнитных наноструктур, в том числе туннельных магнитных контактов и структур FM/PM/FM.

2. Проведение основного объема транспортных и магнитооптических измерений исследуемых структур.

3. Равнозначный вклад в проведение постростовых процессов для проведения транспортных измерений. Оптическая литография, ионное травление, термический отжиг проводились совместно с Гусевым Н. С. Электронная литография выполнялась Скороходовым Е. В.

4. Равнозначный вклад в исследования магнитоэлектрического эффекта в туннельных магнитных контактах CoFeB/MgO/CoFeB. Постановка задачи осуществлялась совместно с Сапожниковым М. В. и Фраерманом А. А. Изготовление образцов – совместно с Гусевым Н. С. Разработка стенда для проведения транспортных исследований и программы автоматизации измерительного процесса – Сапожников М. В.

5. Равнозначный вклад в исследования эффектов Холла в туннельных контактах. Постановка задачи осуществлялась совместно с Сапожниковым М. В., Фраерманом А. А. и Караштиным Е. А. Изготовление образцов – совместно с Гусевым Н. С. Разработка программы автоматизации транспортных измерений – Сапожников М. В.

6. Равнозначный вклад в экспериментальные исследования обменного усиления магнитокалорического эффекта в магнитных наноструктурах. Постановка задачи – совместно с Сапожниковым М. В., Фраерманом А. А., Полушкиным Н. И., Изготовление структур осуществлялось автором. Получение кривых намагничивания методом вибрационной магнитометрии проводились Кравцовым Е. А. (Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия).

В ходе защиты диссертации официальным оппонентом М. А. Миляевым было высказано следующее замечание:

«Для получения высокого туннельного магнетосопротивления цепочки туннельных магнитных контактов использовался их отжиг при температуре 330 °С в течение 2 часов, после которого наблюдалось уменьшение обменного сдвига закрепленного слоя (стр. 48). Указано, что уменьшение обменного сдвига может

быть обусловлено нарушением качества границы CoFeB/IrMn из-за диффузии атомов Mn из антиферромагнитного слоя IrMn. Используемая температура отжига превышает температуру блокировки для антиферромагнетика IrMn. Если отжиг проводился без приложения внешнего магнитного поля, то уменьшение обменного сдвига может быть также обусловлено изменением магнитного порядка на границе. Об отжиге туннельных контактов без информации о приложении магнитного поля также указано на стр. 74. Является ли использованная температура отжига оптимальной?».

Соискатель Пашенькин И. Ю. в своём ответе сообщил, что

«Отжиг туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB/IrMn проводился во внешнем магнитном поле величиной около 4 кЭ. Действительно, в тексте на с. 48 нет упоминания о магнитном поле при проведении отжига, хотя оно есть на с. 57. Температура отжига 330 °С является оптимальной для получения высоких значений туннельного магниторезистивного эффекта в таких системах.»

Официальный оппонент А. П. Пятаков высказал следующее замечание:

«с. 62 Приведенная величина температурного коэффициента (меньше 100 К мкм²/(мВт)) нуждается в пояснении, поскольку при наличии тепловыделения с квадратного сантиметра порядка 1кВт (как, например, в центральном процессорном устройстве) при таком температурном коэффициенте нагрев будет меньше 1К, во что трудно поверить.»

Соискатель Пашенькин И. Ю. в своём ответе сообщил, что

«Исследуемая система – одиночный туннельный магнитный контакт площадью 6 мкм², размещенный на массивной подложке с латеральными размерами около сантиметра, выполняющей роль термостата с большой теплоемкостью. Изменение температуры ТМК определяется эффективностью отведения тепла от рабочей области в подложку.»

В центральном процессоре электрическая мощность ($\sim 1 \text{ кВт/см}^2$) выделяется на всей площади подложки, поэтому она не может выполнять функцию термостата, поскольку быстро разогревается. Температура ЦП при его работе определяется эффективностью теплоотведения в окружающую среду через радиатор. Если ТМК будут размещены на подложке плотным массивом (MRAM) и при этом на каждом ТМК в массиве будет выделяться мощность, изменение температуры будет существенно больше. Следует отметить, что температурный коэффициент выбран наибольшим из приведенных в научной литературе, поэтому оценка изменения температуры ТМК сделала «сверху»»

На заседании 27.02.2025 г. диссертационный совет, за проведённые экспериментальные исследования эффектов обменного и спин-орбитального взаимодействия в слоистых магнитных наноструктурах, состоящих из ферромагнитных слоев с немагнитными диэлектрическими и парамагнитными прослойками, принял решение присудить Пашенькину И. Ю. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 7 докторов науки по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.8 – Физика конденсированного состояния), участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 19, против 0 (нет).

Председатель диссертационного совета

Красильник З. Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета

Водолазов Д. Ю.

Дата оформления Заключения 27.02.2025 г.

