

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.133.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ
МЕТАЛЛОВ ИМЕНИ М.Н. МИХЕЕВА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИФМ УрО РАН)
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ
НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 17.02.2023, №1

О присуждении Заворницыну Роману Сергеевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Магнитотранспортные свойства спиновых клапанов на основе редкоземельных и переходных металлов» по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений принята к защите 13.12.2022, протокол №20, диссертационным советом 24.1.133.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, приказы Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 и № 188/нк от 26.02.2015.

Соискатель Заворницын Роман Сергеевич, 1993 года рождения, в 2017 году с отличием окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ) по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника». Заворницын Р.С. освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в очной аспирантуре при Федеральном государственном бюджетном

учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, год окончания аспирантуры 2021, работает в должности младшего научного сотрудника в лаборатории квантовой наноспинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Диссертация выполнена в лаборатории квантовой наноспинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией квантовой наноспинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Официальные оппоненты:

- 1) Прудников Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского», г. Омск;
- 2) Сапожников Максим Викторович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики магнитных наноструктур Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород

– дали положительные отзывы на диссертацию Р.С. Заборницына.

Ведущая организация 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», г. Казань в своем положительном заключении, подписанным Ереминой Рушаной Михайловной, доктором физико-математических наук, доцентом, ведущим научным сотрудником лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков и Тагировым Ленаром Рафгатовичем, доктором физико-математических наук, профессором, ведущим научным сотрудником лаборатории нелинейной оптики, указала, что «диссертационная работа Заворницына Романа Сергеевича на тему «Магнитотранспортные свойства спиновых клапанов на основе редкоземельных и переходных металлов», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений, является завершённой научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, имеющие значение для развития физики магнитных явлений. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Работа 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 Заворницын Роман Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.»

Соискатель имеет 34 опубликованных работы (12,2 печатных листа), в том числе по теме диссертации 22 работы, из них статей, опубликованных в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях и входящих в перечень ВАК – 11, тезисов докладов в материалах российских и международных конференций – 11.

В результате проведённых исследований автором были получены данные об особенностях магнитотранспортных свойств спиновых клапанов

на основе редкоземельных и переходных металлов, а также разработаны эффективные методы управления этими свойствами.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Magnetoresistive properties of Dy-based bottom spin valve / L.I. Naumova, R.S. Zavornitsyn, M.A. Milyaev, M.V. Makarova, V.V. Proglyado, V.V. Ustinov // IEEE Trans. Nano. – 2021. – V.20. – P.866-872.

2. Спиновые клапаны как инструмент изучения геликоидального магнетизма / В.В. Устинов, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Р.С. Заборницын, Т.П. Креницина, В.В. Проглядо // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – №12. – С.26-30.

3. Формирование однонаправленной магнитной анизотропии в спиновом клапане, содержащем слой Dy / Л.И. Наумова, Р.С. Заборницын, М.А. Миляев, М.В. Макарова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов // ФММ. – 2021. – Т.122. – С.581-587.

4. Mobility of magnetic helicoid in holmium nano-layer / R.S. Zavornitsyn, L.I. Naumova, M.A. Milyaev, M.V. Makarova, V.V. Proglyado, V.V. Ustinov // Current Applied Physics. – 2020. – V.20. – P.1328-1334.

5. Использование спин-флоп состояния при создании спин-вентильных элементов для полного моста Уитстона / М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Р.С. Заборницын, И.К. Максимова, А.Ю. Павлова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов // ФММ. – 2020. – Т.121. – С.794-801.

6. Неколлинеарное магнитное упорядочение в слое диспрозия и магнитотранспортные свойства спинового клапана, содержащего структуру CoFe/Dy/CoFe / Р.С. Заборницын, Л.И. Наумова, М.А. Миляев, М.В. Макарова, Т.П. Креницина, В.В. Проглядо, В.В. Устинов // ФММ. – 2020. – Т.121. – С.688-695.

7. Magnetoresistive properties of exchange biased spin valve caused by helical magnetic ordering in dysprosium layer / V.V. Ustinov, M.A. Milyaev, R.S. Zavornitsyn, T.P. Krinitsina, V.V. Proglyado, L.I. Naumova // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – V.1389. – P.012159(1-7).

8. Spin valve based sensor elements for full Wheatstone bridge / R.S. Zavornitsyn, L.I. Naumova, M.A. Milyaev, A.Y. Pavlova, I.K. Maksimova, V.V. Proglyado, V.V. Ustinov // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – V.1389. – P.012157(1-6).

9. Spin valve with a composite dysprosium-based pinned layer as a tool for determining Dy nanolayer helimagnetism / L.I. Naumova, M.A. Milyaev, R.S. Zavornitsyn, T.P. Krinitsina, V.V. Proglyado, V.V. Ustinov // Current Applied Physics. – 2019. – V.19. – P.1252-1258.

10. Высокочувствительные сенсорные элементы на основе спиновых клапанов с антиферромагнитным межслойным взаимодействием / Л.И. Наумова, М.А. Миляев, Р.С. Заборницын, А.Ю. Павлова, И.К. Максимова, Т.П. Криницина, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов // ФММ. – 2019. – Т.120. – С.710-716.

11. Магнитотранспортные свойства псевдо спиновых клапанов CoFe/Cu/CoFe/Dy в условиях интердиффузии слоев диспрозия и ферромагнитного сплава CoFe / Л.И. Наумова, М.А. Миляев, Р.С. Заборницын, Т.П. Криницина, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов // ФММ. – 2019. – Т.120. – С.464-470.

На диссертацию и автореферат поступило 8 отзывов:

1. От Свалова Андрея Владимировича, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника отдела магнетизма твердых тел института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия.

Без замечаний.

2. От Овчинникова Владимира Владимировича, доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника лаборатории пучковых воздействий ФГБУН Института электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Замечание 1: «На некоторых рисунках надписи настолько мелкие, что едва различимы (см., например, рисунки 8 и 18)».

Замечание 2: «В работе приводится информация об оценке температуры перехода парамагнетик-антиферромагнетик для нанослоев редкоземельных металлов Dy и Ho различной толщины, однако нет комментариев насчет температуры перехода антиферромагнетик-ферромагнетик для нанослоев Dy и Ho».

3. От Усеинова Ниязбека Хамзовича, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры общей физики Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Казань, Россия.

Замечание 1: «Термин «спиновый клапан» обычно используется для того, чтобы подчеркнуть, что в магнитной гетероструктуре текут два спин-поляризованных тока и при различной ориентации намагниченностей слоев структуры эти токи определяют величину магнитосопротивления. Более того, термин «спиновый клапан» используется также для магнитных гетероструктур, когда спин-поляризованный ток течет перпендикулярно плоскости структуры. В рукописи автореферата этим термином обозначаются все композиции магнитных гетероструктур, и какой именно случай не поясняется».

Замечание 2: «В автореферате показаны зависимости магнитосопротивления от магнитного поля, когда ток течет в плоскости структуры. Полагаю, при той глубине анализа и широком наборе экспериментальных методов, которые использовал автор, вполне возможно получить зависимость магнитосопротивления от разности потенциалов, когда ток течет перпендикулярно плоскости гетероструктуры, что было бы очень полезно для конструкторов устройств спинтроники. Впрочем, последнее замечание может служить своего рода рекомендацией для развития будущих экспериментальных исследований».

4. От Патрина Геннадия Семеновича, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой общей физики ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия.

Без замечаний.

5. От Горнакова Владимира Степановича, доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника лаборатории квантовых кристаллов ФГБУН Института физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, г. Черноголовка, Россия.

Замечание 1: «В автореферате не приводится чем мотивирован выбор редкоземельных металлов диспрозия и гольмия в качестве РЗМ для исследования магнитотранспортных свойств спиновых клапанов».

Замечание 2: «В работе отмечается нестабильность магнитотранспортных свойств спиновых клапанов на основе редкоземельных металлов по отношению воздействия температуры и с течением времени. Насколько стабильными являются спиновые клапаны на основе переходных металлов?».

Замечание 3: «При описании трехэтапной термообработки элементов мостовой схемы Уитстона, представленной на рисунке 6, говорится, что на первом этапе образцы подвергались нагреву до температуры блокировки 448 К с последующим охлаждением в поле -9 кЭ, тогда как на втором и третьем этапах поле устанавливалось равным нулю и H_{sf} , соответственно, но ничего не говорится о температуре, которой подвергались образцы».

Замечание 4: «При описании рисунка 18 говорится, что «при понижении температуры наблюдается переход спинового клапана из низкоомного в высокоомное состояние», однако из рисунка следует, что на более раннем этапе понижения температуры (от $T = 220$ К) вначале происходит изменение сопротивления от высокоомного к низкоомному состоянию. С чем связано это понижение сопротивления не объясняется».

6. От Владимира Наумовича Бержанского, доктора физико-математических наук, профессора кафедры экспериментальной физики Физико-технического института ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», г. Симферополь, Россия.

Замечание 1: «На основе температурных измерений магнетосопротивления определены фазовые H - T -диаграммы компенсационных структур, реализуемых в $3d$ - $5f$ спиновых клапанах. Классический подход к построению подобных диаграмм базируется на измерении непосредственно магнитных свойств. Если подобные измерения были сделаны, а судя по автореферату в распоряжении автора был комплекс высокочувствительной магнитометрической аппаратуры, то было бы полезно провести такое сравнение».

Замечание 2: «Известно, что Dy обладает наибольшим значением константы магнитострикции среди всех $4f$ -металлов. На наш взгляд было бы интересно проанализировать вклад магнитоупругой подсистемы спинового клапана на его основе

как при формировании однонаправленной анизотропии, так и оценить ее возможное влияние на полученные *H-T* фазовые диаграммы».

7. От Демидова Евгения Сергеевича, доктора физико-математических наук, профессора кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия.

Замечание 1: «В автореферате сказано, что синтез спиновых клапанов, сочетающих большую величину магнитосопротивления, слабый гистерезис и возможность переключения в слабых полях, является актуальной задачей. Было бы полезно привести сравнение достижений работы в этом направлении с таковыми в литературе».

Замечание 2: «На рисунках 7, 9 приводятся магниторезистивные кривые для элементов моста Уитстона на основе спинового клапана. Непонятно почему не приведены аналогичные зависимости для моста Уитстона в целом».

8. От Трушина Олега Станиславовича, доктора физико-математических наук, заместителя директора Ярославского филиала ФГБУН Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН, г. Ярославль, Россия.

Замечание 1: «Текст автореферата набран слишком мелким шрифтом. Это конечно позволило увеличить объем представленного материала, но существенно затрудняет его восприятие».

Выбор официальных оппонентов доктора физико-математических наук, профессора В.В. Прудникова и доктора физико-математических наук М.В. Сапожникова, а также ведущей организации - 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», г. Казань, обосновывается публикациями оппонентов, тематикой структурного подразделения ведущей организации, относящимися к сфере исследований, которым посвящена диссертация.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Показано, что использование в спиновых клапанах на основе тройного ферромагнитного сплава $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ составного буферного слоя $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ приводит к формированию высокоупорядоченной структуры и гладких интерфейсов. Изменение магнитотранспортных свойств этих спиновых клапанов, наблюдаемое при изменении толщины слоя меди, обусловлено осциллирующим межслойным обменным взаимодействием.
2. Разработан метод формирования противоположно направленных осей однонаправленной анизотропии в микрообъектах, объединенных в мостовую схему Уитстона. Факторами, определяющими направление оси однонаправленной анизотропии в отдельном сенсорном элементе, являются одноосная анизотропия и анизотропия формы микрообъекта.
3. Установлено, что нанослои Dy, напыленные на буферные слои $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ или Ta, а также нанослои Ho, напыленные на буферный слой $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, являются поликристаллическими с аксиальной текстурой $\langle 0001 \rangle$. Показано, что величина температуры перехода парамагнетик-антиферромагнетик уменьшается при уменьшении толщины редкоземельного слоя.
4. Установлено, что в спиновых клапанах на основе Dy на границе Dy/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, в температурном интервале существования антиферромагнитной фазы в Dy, формируется однонаправленная анизотропия. Направление оси однонаправленной анизотропии совпадает с направлением магнитного момента слоя $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ в температурной области фазового перехода парамагнетик-антиферромагнетик для Dy.
5. Обнаружено, что особенности перемагничивания спинового клапана на основе Dy или Ho, наблюдаемые в температурном диапазоне, соответствующем геликоидальному упорядочению, обусловлены температурными изменениями периода антиферромагнитного геликоида.
6. Для спинового клапана с нижним расположением ультратонкого слоя диспрозия, номинальная толщина которого соизмерима с пространственным

периодом геликоидальной структуры, в различных магнитных полях определена температура компенсации магнитных моментов слоев Dy и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$. Установлено, что температура компенсации зависит от величины внешнего магнитного поля и толщины слоя диспрозия.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что на основе анализа магнитотранспортных свойств спиновых клапанов, содержащих нанослой геликоидальных магнетиков, определены диапазоны полей и температур, в которых происходит компенсация магнитных моментов слоев Dy и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$. Установлено, что поля и температуры, в которых происходит компенсация, соответственно, деформация геликоидальной структуры, зависят от толщины нанослоя Dy.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что установленные в работе особенности осциллирующего межслойного взаимодействия представляют интерес в контексте разработки высокочувствительных функциональных материалов для практических приложений. Предложен метод управления обменным сдвигом в спиновых клапанах на основе ферромагнитного сплава $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$, позволяющий оптимизировать процесс создания магниточувствительных датчиков.

В работе реализован экспериментальный подход, нацеленный на получение качественной информации об особенностях магнитного упорядочения в высокотекстурированных нанослоях гелимагнетиков. Метод основан на изучении особенностей магнитотранспортных свойств спиновых клапанов, содержащих слой исследуемого гелимагнетика, в температурном интервале существования антиферромагнитной фазы в слое редкоземельного металла.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что экспериментальные исследования, представленные в диссертационной работе, проведены с помощью метрологически аттестованного оборудования

и апробированных методик. Выводы, приведенные в работе, не противоречат литературным данным, опубликованным в открытой печати.

Личный вклад соискателя состоит в том, что постановка задач исследования проводилась диссертантом Заборницыным Р.С. совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. Миляевым М.А. Личный вклад автора заключается в проведении пробоподготовки образцов, исследовании магнитных и магнитотранспортных свойств пленочных образцов при комнатной температуре, исследовании магнитотранспортных свойств пленочных образцов и микрообъектов при разных температурах, поиске эффективных режимов термомагнитной обработки прототипов магнитных датчиков. Автором проведены обработка и анализ экспериментальных данных. Подготовка публикаций проводилась совместно с научным руководителем Миляевым М.А. и соавторами. Результаты представлены автором на различных международных и всероссийских конференциях.

Исследуемые образцы приготовлены методом магнетронного напыления Наумовой Л.И. и Проглядо В.В. в сотрудничестве с автором. Структурные исследования проведены Кренициной Т.П. и Макаровой М.В. Изготовление микрообъектов методами литографии проведено Максимовой И.К.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, посвящённую изучению особенностей магнитотранспортных свойств спиновых клапанов на основе редкоземельных металлов, получению информации о магнитном состоянии, формирующимся в нанослоях гелимагнетиков при низких температурах, а также разработке эффективных методов управления магнитной анизотропией и межслойным взаимодействием спиновых клапанов на основе переходных металлов в контексте оптимизации функциональных характеристик наноструктур для практических приложений, и соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением

Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от 20.03.2021 № 426.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

На заседании 17.02.2023, проведённом в очном режиме, диссертационный совет принял решение присудить Заворницыну Роману Сергеевичу учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации 1.3.12. Физика магнитных явлений, 4 доктора наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 6 докторов наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – нет, проголосовали: «за» – 17, «против» – нет, «воздержался» – нет.

Председатель заседания, заместитель
председателя диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук



А.П. Носов

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук



Т.Б. Чарикова

20 февраля 2023 г.