УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального

государственного бюджетного учреждения науки

«Федеральный исследовательский центр

«Казанский научный центр

Российской академии наук»

420111, Российская Федерация, Татарстан,

г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31.

Чл.-корр. РАН, д.ф.м.н._____Калачев А.А.

« 01 » февраля 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Заворницына Романа Сергеевича

«Магнитотранспортные свойства спиновых клапанов на основе редкоземельных и переходных металлов», представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.12. Физика магнитных явлений.

Актуальность темы

Диссертационная работа Р.С. Заворницына посвящена экспериментальному изучению тонких пленок и спиновых клапанов со слоями переходных и редкоземельных металлов. В последние годы возрос интерес научного сообщества к спиновым клапанам на основе переходных металлов с резким изменением сопротивления при наложении слабых магнитных полей, зависящим от толщины магнитных и немагнитных слоев, а также химического состава. Толщина слоев в магнитном клапане может достигать несколько нанометров. Спиновые клапаны нашли свое применение в цифровых устройствах с двумя логическими состояниями, в элементах магнитной памяти, считывающих головках жестких дисков, при создании измерительных сенсоров магнитного поля и датчиков тока.

По сравнению с классическими магнетиками, где основное состояние задано структурой материала, в спиновых клапанах специальная термомагнитная обработка позволяет получить заданные направления оси однонаправленной анизотропии, что

позволяет управлять перемагничиванием этих слоев, создавая необходимые характеристики спиновых клапанов.

В связи с этим, проведенные Р.С. Заворницыным исследования зависимости магнитосопротивления спиновых клапанов от толщины слоев редкоземельного металла Dy или Ho в их комбинации с ферромагнитными слоями $Co_{90}Fe_{10}$, $Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}$, $Ni_{80}Fe_{20}$, $(Ni_{80}Fe_{20})_{60}Cr_{40}$ являются актуальными как в фундаментальном, так и в прикладном аспектах.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы, изложена на 157 страницах машинописного текста, включает в себя 107 рисунков и список литературы из 124 наименований.

Во введении обсуждается актуальность выбранной тематики, научная значимость и практическая ценность проведенных исследований.

В первой главе рассмотрены особенности эффекта гигантского магнитосопротивления, связанного с изменение сопротивления в гетероструктурах, включающих ферромагнитные и неферромагнитные проводящие слои. Рассмотрены зависимость сопротивления от угла между магнитными моментами различных слоев и толщины немагнитного и ферромагнитного слоев. Приведены особенности структуры спинового клапана. Показаны особенности синтетического антиферромагнетика, в котором трехслойная структура формируется двумя ферромагнитными слоями, связанными сильной антиферромагнитной обменной связью через металлическую прослойку. Рассмотрены различные варианты сплавов, магнитные свойства редкоземельных металлов и приведены магнитные фазовые H-T диаграммы для диспрозия и гольмия в виде тонких пленок и монокристаллов. Приведен технологический процесс изготовления сенсорных элементов.

Во второй главе обсуждаются методика магнетронного напыления многослойных наноструктур. Рассмотрен принцип работы оптического профилометр-интерферометра белого света, который используется для оценки шероховатости подложек, представлены особенности методов исследования структурных свойств: рентгеноструктурного анализа, рентгеновской рефлектометрии, просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии. Кратко представлены методики контактной и электронно-лучевой фотолитографии.

Оригинальные результаты изложены в 3 и 4 главах диссертации.

В **третьей** главе приведены результаты изучения спиновых клапанов с антиферромагнитным межслойным взаимодействием. Основной задачей было получить образцы с максимальным магнитосопротивлением для спинового клапана и малым сдвигом низкополевой петли гистерезиса. В главе приведены данные по измерению зависимости намагниченности от магнитного поля для спинового клапана Ta/NiFeCr/CoFeNi/Cu/CoFeNi/Ru/CoFeNi/FeMn/T, где варьировалась толщина слоя Cu. Главным достоинством этой главы является *первое* экспериментальное обнаружение осциллирующего характера величины магнитного поля, отвечающего за сдвиг низкополевой петли гистерезиса, демонстрирующего преобладание межслойного обменного взаимодействия над магнитным дипольным. Предложены высокочувствительные сенсорные элементы на основе спиновых клапанов с антиферромагнитным межслойным взаимодействием. *Впервые* в разных частях пленки спинового клапана сформированы две магнитные фазы с взаимно противоположными осями одноосной анизотропии, что привело к изменению величины магнитосопротивления вдвое и появлению двух областей плато – в положительных и отрицательных полях. Проведенной термомагнитной обработкой пленок спиновых клапанов на основе CoFeNi/Ru/CoFeNi были сформированы микрообъекты, входящие в мостовую схему Уитстона с шириной дорожек 20 мкм, имеющую форму ромба. Это позволило впервые сформировать мост Уитстона из магнито-чувствительных элементов с попарно противоположными направлениями осей однонаправленной анизотропии.

В **четвертой** главе излагаются результаты экспериментов по изучению магнитотранспортных свойств спиновых клапанов, в состав которых включены нанослои гелимагнетиков гольмия или диспрозия. Проведено изучение магнитных и транспортных свойств пяти составов с различной толщиной слоя редкоземельного металла. Изучены зависимости температуры Нееля от толщины слоёв. Установлено, что в системе стекло/металл(50Å)/Dy(400Å)/металл(50Å) в температурных зависимостях электросопротивления наблюдается максимум вблизи температуры Нееля. *Впервые* установлен характер изменения температуры перехода парамагнетик-антиферромагнетик от толщины слоя редкой земли для серии структур CoFe/Dy(tDy)/Ta и CoFe/Co/CoFe и NiFeCr/Ho/NiFeCr. Проведено изучение динамики на границе CoFe/Dy из-за диффузии, происходящей со временем или при нагреве. Впервые установлено, что максимальная величина магнитосопротивления ($\Delta R/Rs$)max уменьшается при увеличении температуры от 83 до 333 K. Измерены зависимости максимального магнитосопротивления и полей насыщения от температуры для спиновых клапанов Ta(50Å)/CoFe(50Å)/Cu(28Å)/CoFe(35Å)/Dy(tDy)/Ta(50Å). Впервые установлено, что при

уменьшении температуры от 233 до 83 K наблюдается сдвиг внешних ветвей зависимостей $\Delta R/R$s(H) в область бо́льших полей. Изучено сопротивление клапана в зависимости от угла φ между магнитными моментами слоев. Показано, что скачок намагниченности в малых полях при разных температурах, возникает из-за перемагничивания магнитного момента
свободного слоя.

На защиту выносится сформулированные в диссертации пять научных положений. Все выводы хорошо обоснованы и не вызывают возражений.

Научная новизна и достоверность защищаемых положений

– Впервые установлено направление оси однонаправленной анизотропии, совпадающей с направлением магнитного момента в слое $Co_{90}Fe_{10}$ в упорядоченном слое Dy;

– Впервые показано, что антиферромагнитный геликоид вращается во внешнем магнитном поле вокруг гексагональной оси за счет наличия некомпенсированного магнитного момента;

– Впервые установлено, что перемагничивание спинового клапана на основе редкоземельных ионов диспрозия и гольмия с геликоидальным упорядочением, обусловлены зависимостью периода геликоида от температуры;

– Впервые увеличение электросопротивления связывается с компенсацией магнитных моментов слоя Dy и соседнего ферромагнитного слоя $Co_{90}Fe_{10}$ при уменьшении температуры.

Достоверность полученных данных подтверждается использованием современного аттестованного оборудования, согласием с экспериментальными результатами других авторов и непротиворечивостью известным физическим моделям.

Научная и практическая значимость работы

Полученные в диссертации научные результаты являются качественно новыми и вносят существенный вклад в понимание физических свойств спиновых кластеров, образованных ферромагнитными и неферромагнитными слоями металлов. Наиболее существенным результатом с нашей точки зрения является выяснение и отладка режимов термомагнитной обработки сенсорных элементов, позволившие получить высокие значения чувствительности мостовых схем Уитстона на основе спиновых клапанов, что подчеркивает практическую значимость разработанных методик. Проведенные исследования влияния анизотропии формы на направление осей одноосной анизотропии, в мостовых схемах Уитстона с малой шириной микрополос – 2 и 4 мкм, позволили

получить сенсорные элементы с дифференциальными характеристиками $dR/dH > 0$ и $dR/dH < 0$. С практической точки зрения, результаты данной работы могут найти применение в элементной базе спинтроники, работающей на квантовых принципах.

К важнейшим результатам диссертационной работы Заворницына Романа Сергеевича можно отнести:

- получение и исследования магниторезистивных характеристик спиновых клапанов с геликоидальными слоями ионов диспрозия;
- исследования изменения магнитосопротивления спинового клапана со временем, связанного с процессами диффузии ионов металла.

Каждый из этих результатов обладает несомненной научной новизной и является практически значимым. Результаты работы достаточно полно изложены в 11 статьях, опубликованных в высокорейтинговых, рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, а также неоднократно докладывались на международных и российских конференциях. Автореферат диссертации отражает ее содержание.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы диссертационной работы Заворницына Р.С. могут быть **рекомендованы к использованию** многими организациями Российской Федерации: ИОФ РАН, ФИ РАН, КФТИ РАН, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Институт физики микроструктур РАН, ведущими университетами, такими как МГУ, Санкт-Петербургский университет, МИЭТ, МИРЭА, Уральский федеральный университет и др.

Вопросы и замечания

1. $J1$ – обменная константа, которая характеризует межслойное взаимодействие ФМ слоев, формула (1.11) на стр. 25 – необходимо пояснить, насколько приведенное выражение соответствует размерности физических величин.

2. У редкоземельного металла тербия Tb и его сплавов анизотропная магнитострикция при низких температурах превышает анизотропную магнитострикцию железа, кобальта, никеля и их сплавов в тысячи раз в монокристаллах. Гигантская магнитострикция наблюдалась в интерметаллических соединениях $TbFe_2$ при комнатных температурах. Возможно ли проявление магнитомеханических эффектов в измеренных полевых зависимостях магнитосопротивления спиновых клапанов, включающих соединения диспрозия?

3. Необходимо пояснить, с какой точностью проводились измерения толщин слоев в спиновом клапане, сравнимы ли эти значения с шероховатостью пленок.

Сделанные замечания не снижают качества диссертации. Диссертационная работа Р.С. Заворницына представляет собой экспериментальное исследование, проведённой на высоком научном уровне. Работа обладает значительной научной и практической значимостью.

Заключение

Диссертация Р.С. Заворницына «МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА СПИНОВЫХ КЛАПАНОВ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ» отвечает всем требованиям ВАК п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам диссертант – ЗАВОРНИЦЫН Роман Сергеевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Диссертационная работа была доложена и обсуждена на расширенном научном семинаре лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков и лаборатории проблем сверхпроводимости и спинтроники Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», протокол № 1 от 27 января 2023 г, отзыв одобрен на заседании Ученого Совета КФТИ-ОСП ФИЦ КазНЦ РАН протокол № 4 от 01 февраля 2023 г.

Ведущий научный сотрудник
лаборатории радиоспектроскопии диэлектриков,
КФТИ – обособленного структурного
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН
телефон: 89600460812
E-mail: REremina@yandex.ru
д. ф.-м. н., доцент Еремина Рушана Михайловна

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории нелинейной оптики,
КФТИ – обособленного структурного
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН
телефон: 8 (843) 2319074
E-mail: ltagirov@mail.ru
д. ф.-м. н., профессор Тагиров Ленар Рафгатович

Подписи д.ф.-м.н. Р.М.Ереминой и д.ф.-м.н. Л.Р.Тагирова заверяю.
Главный ученый секретарь ФИЦ КазНЦ РАН
к.х.н. Зиганшина С.А.

С отзывом ознакомлен
02.02.2023 (Заворницын Р.С

СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

по диссертации Заворницына Романа Сергеевича «Магнитотранспортные свойства спиновых клапанов на основе редкоземельных и переходных металлов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений.

1.	Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» »
2.	Сокращенное наименование организации	ФИЦ КазНЦ РАН
3.	Организационно-правовая форма организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
4.	Ведомственная принадлежность организации	Министерство образования и науки Российской Федерации
5.	Место нахождения	Российская Федерация, Татарстан, г. Казань,
6.	Почтовый адрес организации	420111, Российская Федерация, Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261.
7.	Телефон организации	Телефон: +7(843) 292-75-97 Факс: +7(843) 292-77-45
8.	Адрес электронной почты организации	presidium@knc.ru
9.	Адрес официального сайта организации в сети Интернет	http://knc.ru/
10.	Руководитель организации	Чл-корр РАН Калачев Алексей Алексеевич
11.	Наименование профильного структурного подразделения, занимающегося проблематикой диссертации	Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук»
12.	Сведения о лице, утверждающем отзыв ведущей организации	Директор ФИЦ КазНЦ РАН, д.ф.-м.н. Калачев Алексей Алексеевич
13.	Сведения о составителе отзыва из ведущей организации	Еремина Рушана Михайловна, доктор физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник; Тагиров Ленар Рафгатович, доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник
14.	Список публикаций работников ведущей организации по теме диссертации Заворницына Р. С. за последние 5 лет: 1. Exchange spin waves in thin films with gradient composition / I.A. Golovchanskiy, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, B.F. Gabbasov, N.N. Abramov, R.V. Yusupov, R.I. Khaibullin, L.R. Tagirov // Physical Review Materials.-2022.-V.6(6). - p.064406. 2. Ultrafast signatures of magnetic inhomogeneity in Pd1-xFex (x ≤ 0.08) epitaxial thin films / A.V. Petrov, S.I. Nikitin, L.R. Tagirov, A.I. Gumarov, I.V. Yanilkin, R.V. Yusupov // Beilstein J. Nanotechnol. – 2022. – V.13. – P.836–844. 3. Engineering the Exchange Spin-Waves in Graded Thin Ferromagnetic Films /	

I. Yanilkin, A. Gumarov, I. Golovchanskiy, B. Gabbasov, R. Yusupov, L. Tagirov // Nanomaterials (MDPI). – 2022. – V.12. – Art.4361.

4. Epitaxial thin-film $Pd_{1-x}Fe_x$ alloy – a tunable ferromagnet for superconducting spintronics / A. Esmaeili, I.V.Yanilkin, A.I. Gumarov, I.R. Vakhitov, B.F. Gabbasov, R.V. Yusupov, D.A. Tatarsky, L.R. Tagirov // Science China Materials. - 2021. - V. 64. - p. 1246-1255.

5. Controllable two- and three-state magnetization switching in single-layer epitaxial $Pd_{1-x}Fe_x$ films and an epitaxial $Pd_{0.92}Fe_{0.08}/Ag/Pd_{0.96}Fe_{0.04}$ heterostructure / I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, G.F. Gizzatullina, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // Beilstein Journal of Nanotechnol. – 2022. – V.13. – P.334–343.

6. Synthesis, characterization, and magnetoresistive properties of the epitaxial Pd0.96Fe0.04/VN/Pd0.92Fe0.08 superconducting spin-valve heterostructure / I.V. Yanilkin, W.M. Mohammed, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // Nanomaterials (MDPI). – 2021. – V.11. – Art.64.

7. Chirality of Bloch domain walls in exchange-biased CoO/Co bilayer studied by waveguide-enhanced neutron spin-flip scattering // Yu. N. Khaydukov, D. Lenk, V. Zdravkov, R. Morari, T. Keller, A. S. Sidorenko , L. R. Tagirov, R. Tidecks, S. Horn, and B. Keimer // Physical Review B. – 2021. – V.104. – Art.174445.

8. Epitaxial growth and superconducting properties of thin-film PdFe/VN and VN/PdFe bilayers on MgO substrate / W.M. Mohammed, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, A.G. Kiiamov, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // Beilstein Journal of Nanotechnol. – 2020 – V.11. – P.807–813.

9. Increasing the performance of the superconducting spin valve using a Heusler alloy / A.A. Kamashev, A.A. Validov, J. Schumann, V. Kataev, B. Büchner, Ya.V. Fominov and I.A. Garifullin // Beilstein J. Nanotechnol. - 2018. – V. 9. - P.1764.

10. Superconducting spin-vale effect in heterostructure containing the Heusler alloy as a ferromagnetic layer / A.A. Kamashev, P.V. Leksin, A.A. Validov, N.N. Garif'yanov, I.A. Garifullin, Ya.V. Fominov, J. Schumann, V. Kataev, B. Büchner // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – V.459. - P. 7-11.

11. Superconducting switching due to a triplet component in the Pb/Cu/Ni/Cu/Co2Cr1-xFexAly spin-valve structure / Andrey Kamashev, Nadir Garif'yanov, Aidar A. Validov, Joachim Schumann, Vladislav Kataev, Bernd Büchner, Yakov V. Fominov, Ilgiz A. Garifullin // Beilstein J. Nanotechnol. – 2019. – V.10. - P. 1458-1463.

12. Giant Spin-Valve Effect in Heterostructures with a Superconducting Layer / Andrey Kamashev, Nadir Garif'yanov, Aidar A. Validov, Joachim Schumann, Vladislav Kataev, Bernd Büchner, Yakov V. Fominov, Ilgiz A. Garifullin // JETP Letters. – 2019. – V.110. - P. 342–347.

13. Superconducting spin-valve effect in heterostructures with ferromagnetic Heusler alloy layers / Andrey Kamashev, Nadir Garif'yanov, Aidar A. Validov, Joachim Schumann, Vladislav Kataev, Bernd Büchner, Yakov V. Fominov, Ilgiz A. Garifullin // Physical Review B. – 2019. – V.100. – Art.134511.

14. Superconducting Spin-Valve Effect in Structures with a Ferromagnetic Heusler Alloy Layer / A.A. Kamashev, N.N. Garif'yanov, A.A. Validov, Y.V. Fominov, I.A. Garifullin // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2020. – V. 131, P. 311-321.

	15. Antiferromagnetism of the cation-ordered warwickite system Mn2-xMgxBO4 (x = 0.5, 0.6 and 0.7)/ N.V. Kazak, N.A. Belskaya, E.M. Moshkina, L.N. Bezmaternykh, A.D. Vasiliev, S.N. Sofronova, R.M. Eremina, E.V. Eremin, A.R. Muftakhutdinov, M.A. Cherosov, S.G. Ovchinnikov //JMMM.-2020.-V. 507.-p.166820

Ведущая организация подтверждает, что соискатель не является ее сотрудником и не имеет научных работ по теме диссертации, подготовленных на базе ведущей организации или в соавторстве с ее сотрудниками.

Главный ученый секретарь ФИЦ КазНЦ РАН
к.х.н. Зиганшина С.А.