

Отзыв

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

Актуальность

Предмет исследования представленной диссертационной работы многослойные магнитные структуры с эффектом гигантского магнитосопротивления (ГМС). На настоящий момент они являются одними из наиболее перспективных для использования в качестве чувствительных элементов в датчиках магнитного поля. Оптимизация данных структур для получения наилучших показателей чувствительности, динамического диапазона, линейности, термостабильности и т.д. является крайне актуальной задачей. Ее решение может быть основано на исследовании и понимании материальных свойств, механизмов взаимодействий и их зависимости от структуры многослойных магнитных пленок с эффектом ГМС. Решению этих задач и посвящена представленная диссертационная работа. Кроме того, автор исследует эффекты ГМС в композитных многослойных структурах включающих слои редкоземельных металлов, что открывает дополнительные возможности для управления свойствами таких систем. Исследования, проведенные автором, являются пионерскими и открывают новые возможности для дальнейшего успешного развития инженерии материалов с эффектом ГМС. Все вышесказанное обуславливает актуальность выбранной темы диссертации

Оригинальность и новизна работы

В представленной работе сформулированы новые идеи, на основе которых выполнены оригинальные исследования. Не останавливаясь на перечислении всех аспектов, указывающих на несомненную оригинальность работы, подчеркну, что использование структур типа спиновый клапан/редкоземельный металл позволяет крайне эффективно исследовать магнитную структуру редкоземельных металлов с геликоидальным распределением намагниченности при помощи достаточно простых транспортных измерений в широком диапазоне полей и температур.

Практическая ценность работы

Выполненная работа представляет непосредственный практический интерес в области развития и создания датчиков магнитного поля на основе

эффекта ГМС. Исследованная зависимость взаимодействия магнитных слоев через прослойку меди от ее толщины позволила автору разработать спиновый клапан (структуру с эффектом ГМС) с большой величиной магнитосопротивления и нулевым сдвигом петли гистерезиса. Предложенная и опробованная методика создания мостиков Уитстона из 4-х спиновых клапанов с противоположным направлением осей однонаправленной анизотропии существенно технологически упрощает изготовление подобных структур.

Апробация работы представлена в 11-ти научных публикациях в российских и иностранных научных изданиях, рекомендованных ВАК для подготовки кандидатских и докторских диссертационных работ, а также в 11-ти тезисах докладов на всероссийских и международных конференциях.

Вовведении обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, новизна и практическая значимость полученных результатов. Сформулирована цель, которая заключалась в получении данных об особенностях магнитотранспортных свойств спиновых клапанов на основе редкоземельных и переходных металлов, а также разработке эффективных методов управления этими свойствами. Поставлены задачи исследования, которые соответствуют цели исследования и способствуют получению достаточно полного представления об особенностях магнитотранспортных свойств спиновых клапанов на основе редкоземельных и переходных металлов.

Глава 1 представляет собой достаточно подробный обзор литературных данных по тематике диссертации. Описываются основные физические модели явления ГМС, а также принципы работы и свойства структур на его основе таких как спиновый клапан. Также приведены данные о магнитных свойствах редкоземельных металлов диспрозия и гольмия, которые использованы при создании исследуемых в последующих главах структур. Отдельно обсуждается практическое применение ГМС датчиков магнитного поля, а также способы оптимизации функциональных характеристик сенсорных элементов.

В Главе 2 подробно описаны методики изготовления исследуемых образцов (магнетронное напыление с последующей термомагнитной обработкой), исследования их структуры (рентгеновская дифрактометрия и просвечивающая электронная микроскопия), а также методы экспериментального исследования магнитных и транспортных свойств образцов.

В Главе 3 приведены результаты исследований спиновых клапанов на основе $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ с прослойкой Cu. Исследование структуры показало, что

использование буферных подслоев определенного состава ($Ta/(Ni_{80}Fe_{20})_{60}Cr_{40}$) обуславливает формирование в них высокоупорядоченной структуры и гладких интерфейсов, что уменьшает магнитостатическое взаимодействие между магнитными слоями. Проведено исследование зависимости взаимодействия слоев через медную прослойку в зависимости от ее толщины. Определены параметры структуры, при которых слабое магнитостатическое взаимодействие компенсируется РККУ взаимодействием через слой меди, и, в результате, низко полевая петля гистерезиса не смещена относительно нулевого поля. Разработана процедура термообработки спиновых клапанов, которая позволяет формировать структуры с геометрией моста Уитстона с противоположным направлением однонаправленной анизотропии для разных элементов моста. Однонаправленная анизотропия спиновых клапанов достигается благодаря тому, что один из магнитных слоев клапана представляет собой искусственный антиферромагнетик ($CoFeNi/Ru/CoFeNi$), обменно связанный с антиферромагнитным слоем $FeMn$. Разработанная структура спиновых клапанов, объединенных в мост Уитстона, может служить основой для создания высокочувствительного термостабильного датчика магнитного поля.

В главе 4 приведены результаты исследований ГМР структур, обменно связанных со слоем редкоземельного металла Ho или Dy . Выбор редкоземельных металлов обусловлен тем, что при определенных температурах в них существует распределение намагниченности в виде ориентированной спирали. Исследованы особенности кривых магнитосопротивления таких образцов при разных температурах. Показано, что их форма связана с магнитной конфигурацией слоя редкоземельного металла, а именно, зависящим от температуры периодом магнитной спирали. Определена температура магнитной компенсации магнитного слоя спинового клапана и обменно связанного с ним слоя редкоземельного металла.

В заключении представлены основные результаты работы, которые отражают выполнение поставленных задач диссертационной работы и достижение сформулированной цели, а именно:

- установлено, что использование в спиновых клапанах на основе тройного ферромагнитного сплава $Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}$ составного буферного слоя $Ta/(Ni_{80}Fe_{20})_{60}Cr_{40}$ 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;

- 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;
- 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 $\langle 0002 \rangle$. Показано, что величина температуры перехода парамагнетик-антиферромагнетик уменьшается при уменьшении толщины редкоземельного слоя;
- 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;
- обнаружено, что особенности перемагничивания спинового клапана на основе Dy или Ho, наблюдаемые в температурном диапазоне, соответствующем геликоидальному упорядочению, обусловлены температурными изменениями периода антиферромагнитного геликоида;
- обнаружено, что антиферромагнитный геликоид в нанослое Ho поворачивается во внешнем магнитном поле вокруг гексагональной оси за счет наличия некомпенсированного магнитного момента геликоидальной структуры конечных размеров;
- 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.

Общая логика диссертации, ее совместимость с современными трендами в магнетизме, тщательное планирование и осуществление экспериментов, большое количество самопроверок, сопоставление с результатами других авторов для аналогичных систем – позволяет утверждать, что **достоверность полученных в диссертации результатов является несомненной.**

В процессе изучения диссертационной работы возникли некоторые замечания и вопросы.

Замечания:

1. Не указано какой именно состав - массовый или атомарный подразумевается в слоях $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ и в других аналогичных случаях.

2. На странице 18, говоря о длине свободного пробега электронов автор, видимо, подразумевает длину спинового пробега.

3. Во многих местах текста автор делает неправильное утверждение, что температура блокировки является температурой, при которой происходит исчезновение обменного взаимодействия на границе ФМ/АФМ. Физический смысл этой температуры другой.

4. Несмотря на то, что в литературном обзоре (Глава 1.) дано достаточно полное описание работ ведущихся в области ГМР спиновых клапанов, автор не указывает конкретного места своей работы и своих результатов среди широко ведущихся во всем мире исследований.

Вопросы:

1. Насколько велико шунтирующее влияние дополнительных подслоев и слоя, необходимого для создания однонаправленной анизотропии, на величину ГМР всей структуры по сравнению с ГМР спинового клапана без подслоев?

2. В чем физическая причина появления температурного пика сопротивления магнитного материала в точке магнитного фазового перехода (Рис. 1.9)?

3. Каковы данные или, хотя бы, представления о наличии в исследуемых слоях редкоземельных металлов доменов с разной хиральностью магнитных спиралей? Как это должно отразиться на кривых магнитосопротивления исследуемых образцов?

Несмотря на сделанные замечания, общая высокая ценность работы очевидна, и сделанные замечания не влияют на основные выводы работы.

Представленная диссертационная работа Заворницына Р.С. соответствует паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Диссертация Заворницына Романа Сергеевича «Магнитотранспортные свойства спиновых клапанов на основе редкоземельных и переходных металлов» является научно-квалификационной работой и соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертационным работам в соответствии с пунктами 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от

24 сентября 2013 года № 842, в действующей редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 20 марта 2021 года № 426.

Автор представленной работы, Заборницын Роман Сергеевич, достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Сапожников Максим Викторович,
доктор физ.-мат. наук (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния),
заведующий отделом физики магнитных наноструктур Института физики микроструктур РАН— филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт прикладной физики Российской академии наук»
Тел.: 8-831-417-94-96
E-mail: msap@ipmras.ru

М.В.Сапожников

24.01.2023

Адрес организации: 603950, Нижний Новгород, ГСП-105, Институт физики микроструктур РАН (ИФМ РАН).

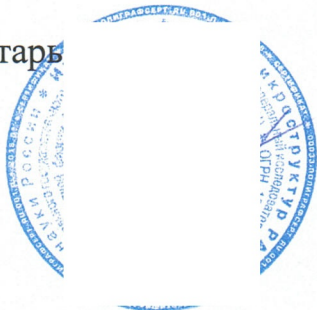
Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт прикладной физики Российской академии наук», <http://www.ipmras.ru>

Подпись д.ф.-м.н. Сапожникова М.В. заверяю.

Ученый секретарь

ИФМ РАН

24.01.2023



Д.М. Гапонова

С ошубом ознакомлен
01.02.2023 — Заборницын Р.С.

Сведения об оппоненте

- **Фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) официального оппонента:** Сапожников Максим Викторович;
- **ученая степень и ученое звание официального оппонента:** доктор физико-математических наук;
- **наименования отрасли науки, научных специальностей, по которым им защищена диссертация:** 01.04.07 – Физика конденсированного состояния;
- **полное наименование организации, являющейся основным местом работы официального оппонента на момент представления им отзыва:** Институт физики микроструктур РАН - филиал ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук";
- **должность:** заведующий отделом магнитных наноструктур;
- **почтовый адрес организации:** Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия
- **телефон:** +7 (831) 417-94-65,
- **e-mail:** msap@ipmras.ru
- **список основных публикаций Сапожникова М.В. по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций):**

1. N. S. Gusev, A. V. Sadovnikov, S. A. Nikitov, M. V. Sapozhnikov, and O. G. Udalov, Manipulation of the Dzyaloshinskii–Moriya Interaction in Co/Pt Multilayers with Strain, PRL **124**, 157202 (2020); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.157202>.

2. И. Ю. Пашенькин, М. В. Сапожников, Н. С. Гусев, В. В. Рогов, Д. А. Татарский, А. А. Фраерман, М. Н. Волочаев, Магнитоэлектрический эффект в туннельных магниторезистивных контактах CoFeB/MgO/CoFeB, Письма в ЖЭТФ **111**, 815 (2020); http://www.jetpletters.ac.ru/ps/2286/article_34120.shtml.

3. I. Yu. Pashenkin, M. V. Sapozhnikov, N. S. Gusev, E. A. Karashtin, and A. A. Fraerman, Extrinsic tunnel Hall effect in MgO-based tunnel junctions, Phys. Rev. B **106**, L220408 (2022); DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.L220408>.

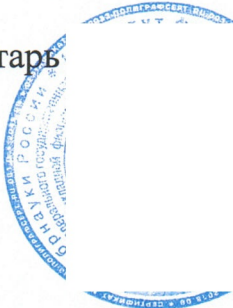
4. M. V. Sapozhnikov, R. V. Gorev, E. V. Skorokhodov, N. S. Gusev, A. V. Sadovnikov, and O. G. Udalov, Zigzag domains caused by strain-induced anisotropy of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction, Phys. Rev. B **105**, 024405 (2022); DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.024405>.

5. M.V. Sapozhnikov, N.S. Gusev, S.A. Gusev, D.A. Tatarskiy, Yu.V. Petrov, A.G. Temiryazev, A. A. Fraerman, Direct observation of topological Hall effect in Co/Pt nanostructured films, Phys. Rev. B **103**, 054429 (2021); DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.054429>.

6. И.Ю. Пашенькин, М.В. Сапожников, Н.С. Гусев, В.В. Рогов, Д.А. Татарский, А.А. Фраерман, Туннельные магниторезистивные элементы для датчиков магнитного поля, Журнал технической физики, 2019, том 89, вып. 11, 1732-1735; 10.21883/JTF.2019.11.48336.122-19.
7. M. A. Kuznetsov, I. Y. Pashenkin, N. I. Polushkin, M. V. Sapozhnikov, and A. A. Fraerman, Magnetocaloric effect in exchange-coupled strong/weak/strong ferromagnet stacks, J. Appl. Phys. **127**, 183904 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0003223>.
8. V. L. Vadimov, M. V. Sapozhnikov, and A. S. Mel'nikov, Magnetic skyrmions in ferromagnet-superconductor (F/S) heterostructures, Appl. Phys. Lett. **113**, 032402 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5037934>.
9. O. G. Udalov, I. S. Beloborodov, and M. V. Sapozhnikov, Magnetic skyrmions and bimerons in films with anisotropic interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction, Phys. Rev. B **103**, 174416 (2021); <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.174416>.
10. I. A. Kolmychek, E. A. Mamonov, N. S. Gusev, M. V. Sapozhnikov, V. G. Golubev, and T. V. Murzina, Resonant optical effects in composite Co/opal-based magnetoplasmonic structures, Opt. Lett. **46**, 3087-3090 (2021); <https://doi.org/10.1364/OL.427965>.

Ученый секретарь

ИФМ РАН



✓

Д.М. Гапонова