

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., проф. Прудникова Владимира Васильевича на диссертационную работу «Магнитотранспортные свойства спиновых клапанов на основе редкоземельных и переходных металлов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений

Тенденцией современных исследований в области магнетизма стало смещение фундаментальных интересов от изучения свойств объемных образцов к изучению наноразмерных структур из ультратонких магнитных пленок. В низкоразмерных системах возрастает роль поверхностных эффектов, а также процессов, происходящих на границе раздела фаз, которые определяют такие свойства наноразмерных устройств, как гигантское магнитное сопротивление (ГМС) и туннельное магнитосопротивление (ТМС). Магнитные структуры с эффектами ГМС и ТМС нашли широчайшее применение в сенсорах магнитного поля, считывающих головках жестких дисков и энергонезависимой магниторезистивной памяти. Заметным прогрессом в деле совершенствования структур с ГМС можно рассматривать создание спин-вентильных систем, преимуществом которых являются низкие поля насыщения, значительно меньшие, чем в мультислойных магнитных структурах. Спиновые клапаны на основе переходных металлов стали основными наноструктурами для практического применения, т.к. обладают большой величиной магнитосопротивления и возможностью переключения между высоко- и низкорезистивным состоянием в очень слабых магнитных полях. До сих пор актуальной задачей является синтез спиновых клапанов, сочетающих большую величину магнитосопротивления, слабый гистерезис и возможность переключения в слабых полях, с целью их применения в качестве функциональных материалов для сенсорных устройств. Для решения данной задачи в диссертационной работе Заборницына Р.С. реализуется исследование особенностей межслойного взаимодействия в спиновых клапанах на основе переходных и редкоземельных металлов.

Введение в состав наноструктуры слоев редкоземельных металлов представляет особый научный интерес из-за реализации в них длиннопериодических геликоидальных магнитных структур. Для получения информации об особенностях магнитного упорядочения в ультратонких высокотекстурированных слоях гелимагнетиков и влияния их на эффекты перемангничивания в диссертации был предложен экспериментальный подход, связанный с использованием спиновых клапанов. При этом данный метод базируется на доступном в лабораторных условиях методе измерения

магнитосопротивления, поэтому **актуальность проведенных исследований** сомнений не вызывает.

Структура диссертации состоит из оглавления, введения, четырех глав (включающих литературный обзор, методику эксперимента и две оригинальные главы), заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 157 страниц, список литературы включает 124 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана степень разработанности тематики диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, описаны научная новизна, практическая и теоретическая значимость, достоверность работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы литературные данные современного состояния в области спинтроники, описываются основные физические принципы явления ГМС, а также магнитные и магнитотранспортные свойства спиновых клапанов. Рассмотрены свойства редкоземельных металлов диспрозия и гольмия как в объемном, так и в тонкопленочном видах. Уделено внимание датчикам магнитного поля на основе эффекта ГМС и способам оптимизации функциональных характеристик сенсорных элементов.

Во второй главе описаны экспериментальные методики, используемые в проведенных в диссертации исследованиях. Дано описание изготовления наноструктур методом магнетронного напыления, методов исследования структурных свойств - рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии, методов измерения полевых зависимостей намагниченности и магнитосопротивления, методов термомагнитной обработки. Приведено описание методик синтеза микрообъектов из пленочных наноструктур с помощью литографического оборудования

Третья глава посвящена результатам исследования кристаллической структуры и особенностей антиферромагнитного межслойного взаимодействия спиновых клапанов. Рассмотренные спиновые вентили содержали синтетический антиферромагнетик (САФ) CoFeNi/Ru/CoFeNi . Особенностью САФ является осуществление спин-флоп перехода, когда под действием магнитного поля намагниченности слоев САФ разворачиваются антипараллельно друг другу и ориентируются перпендикулярно приложенному полю. В диссертации применяется термомагнитная обработка в поле спин-флоп перехода для формирования попарно-противоположных осей однонаправленной анизотропии (ООА) в сенсорных элементах мостовой схемы. Такая конфигурация ООА в элементах моста Уитстона позволяет увеличить выходной сигнал магнитного датчика.

Показано, что спиновые клапаны на основе сплава $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ с буферным слоем $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ обладают совершенной текстурой $\langle 111 \rangle$ и гладкими межслойными границами. В случае малой шероховатости межслойных границ основной вклад во

взаимодействие ферромагнитных слоев будет осуществлять осциллирующее обменное взаимодействие. В таком случае можно добиться сочетания большой величины максимального магнитосопротивления для спинового клапана и малого сдвига низкополевой петли гистерезиса. Исследования, представленные в данной главе, направлены на реализацию этой возможности.

В четвертой главе приведены результаты исследования магнитотранспортных свойств спинового клапана, содержащего нанослой Dy или Ho, напыленные на буферный слой CoFe. Приведены данные об особенностях формирования обменного сдвига в интерфейсе CoFe/Dy в структуре спинового клапана. Описаны особенности магнитного состояния гелимагнетика в зависимости от конфигурации магнитных моментов ФМ слоев, окружающих слой Dy, и величины внешнего магнитного поля. Получена информация о подвижности антиферромагнитного геликоида в нанослое Ho. Приведены результаты исследования магнитотранспортных свойств спинового клапана, содержащего ультратонкий высокотекстурированный слой Dy.

Показано, что на границах раздела редкоземельный/переходный металл формируется антиферромагнитное обменное взаимодействие. В этом случае, изменение магнитного состояния РЗМ приводит к изменению характера перемагничивания спинового клапана. Изучение его магнитотранспортных свойств с использованием обычных лабораторных методов измерения магнитосопротивления позволило получить информацию о характеристиках магнитного упорядочения в нанослое гелимагнетика.

Среди **основных результатов** работы, имеющих теоретическую и практическую значимость, хотелось бы отметить:

1. Использование составного буферного слоя состава Ta/(Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ в спиновых клапанах на основе ферромагнитного сплава Co₇₀Fe₂₀Ni₁₀ приводит к формированию высокоупорядоченной структуры и гладких интерфейсов. Следствием является ослабление ферромагнитного межслойного взаимодействия, что позволяет наблюдать изменение магнитотранспортных свойств, обусловленное осциллирующим межслойным обменным взаимодействием РККИ типа.

2. Для магниточувствительных элементов, объединенных в мостовую схему Уитстона, найдена последовательность и определены режимы термомагнитных обработок, позволяющих сформировать в сенсорных элементах попарно-противоположные направления осей однонаправленной анизотропии и обеспечивающих высокую чувствительность получаемых датчиков.

3. В спиновых клапанах, содержащих слой Dy, на границе Dy/Co₉₀Fe₁₀ в процессе фазового перехода парамагнетик-антиферромагнетик формируется однонаправленная

анизотропия. Направление оси однонаправленной анизотропии совпадает с направлением магнитного момента в слое $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ при магнитном фазовом переходе в слое Dy.

4. На основе анализа магниторезистивных данных для спиновых клапанов различных композиций, содержащих нанослой Ho, показано, что антиферромагнитный геликоид может поворачиваться во внешнем магнитном поле вокруг гексагональной оси за счет наличия нескомпенсированного магнитного момента.

5. Особенности перемагничивания спинового клапана на основе редкоземельных металлов Dy или Ho, наблюдаемые в температурном диапазоне, соответствующем геликоидальному упорядочению, обусловлены температурными изменениями периода геликоидальной структуры.

6. Для спинового клапана, содержащего ультратонкий (3-10 нм) слой Dy, при уменьшении температуры наблюдается увеличение электросопротивления. Эта особенность связана с изменением характера перемагничивания спинового клапана и компенсацией магнитных моментов слоя Dy и соседнего ферромагнитного слоя $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$. Температура компенсации зависит от величины внешнего магнитного поля и толщины слоя диспрозия.

Следует отметить, что в диссертационной работе использованы современные экспериментальные методы получения и исследования гетероструктур, такие как: методы магнетронного напыления для создания наноструктур и оптической фотолитографии, электронно-лучевой литографии для полосовых микрообъектов; методы рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии, позволяющие детально аттестовать исследуемые образцы. Приятно поражает последовательная научная логика проводимых экспериментальных исследований, глубокий анализ как результатов отдельных измерений, так и при их сопоставлении друг с другом.

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается воспроизводимостью экспериментальных данных и их сопоставимостью с литературным данными для аналогичных систем, опубликованными в открытой печати.

К **замечаниям** следует отнести:

1) В главе 1 на стр. 17 в формуле (1.4) приведено неправильное выражение для магнитосопротивления трехслойной структуры в рамках применения двухтоковой модели Мотта. Корректное выражение: $\Delta R/R = (\rho_{\uparrow} - \rho_{\downarrow})^2 / 4\rho_{\uparrow}\rho_{\downarrow} = (\alpha - 1)^2 / 4\alpha$.

2) В главе 3, на стр. 63 указано, что шероховатость поверхности спинового клапана Ta/NiFeCr/CoFeNi/Cu(33 Å)/CoFeNi/Ru/CoFeNi/FeMn/Ta характеризуется среднеквадратичным отклонением rms = 3 – 5 Å. В дальнейшем было показано, что осциллирующий характер $H_j(t_{\text{Cu}})$ (рис. 3.7) является признаком того, что вклад осциллирующего обменного

взаимодействия в межслойное взаимодействие является доминирующим над ферромагнитным дипольным. Проводилось ли в работе исследование влияния шероховатости на величину магнитосопротивления и каким образом контролировался размер шероховатости?

3) Встречающиеся неточности в терминологии, а именно, вместо «электросопротивления» используется термин «магнитосопротивление», как более комплексной величины (стр. 19); вместо «параллельной» или «антипараллельной» конфигураций магнитных моментов слоев используются иногда (стр. 22) термины «ферромагнитного» или «антиферромагнитного» упорядочения магнитных моментов ферромагнитных слоев. Для обозначения среднеквадратичной шероховатости на стр. 86 используется обозначение σ , а на стр. 63 – обозначение *rms*.

Указанные замечания не снижают общий высокий научный уровень проведенного исследования, а только демонстрируют интерес оппонента к проведенным исследованиям. Представленные результаты прошли достаточную апробацию на различных всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах и семинарах. Материалы диссертации опубликованы в 11 статьях, в том числе в таких научных журналах, как Физика Металлов и Металловедение, Поверхность, IEEE Transactions on Nanotechnology, Current Applied Physics. Полученные результаты известны специалистам. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Результаты могут быть востребованы как российскими, так и зарубежными исследователями. Представленная диссертация является самостоятельным и завершенным научным исследованием.

Диссертация соответствует пунктам 3 и 7 паспорта специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений.

В **заключении** стоит отметить, что по объёму, достоверности, оригинальности полученных результатов, теоретической и практической значимости диссертационная работа «Магнитотранспортные свойства спиновых клапанов на основе редкоземельных и переходных металлов» соответствует всем квалификационным требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Заборницын Роман Сергеевич, заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.02 – Теоретическая физика,

профессор, заведующий кафедрой теоретической физики,
ФГАОУ ВО «Омский государственный
университет им. Ф.М. Достоевского»

Прудников Владимир Васильевич

Дата: 31 января 2023 г.

Адрес служебный: 644077, Российская Федерация, г. Омск, пр-т Мира, Д.55А,
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского», тел. 8 3812
630 445, факс: 8 3812 642 700, e-mail: prudnikov@univer.omsk.su

Подпись д.ф.-м.н., зав. кафедрой теор. физики Омского государственного университета
им. Ф.М. Достоевского Прудникова В.В. удостоверяю.

Ученый секретарь Омского государственного университета
им. Ф.М. Достоевского,
кандидат филологических наук

Рогалева Ольга Сергеевна



С оценок ознакомлен

02.02.2023

Заворшцов Р.С.

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Прудников Владимир Васильевич

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук, профессор.

Научная специальность 01.04.02 – теоретическая физика

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования (ФГАОУ ВО) «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского»

Почтовый адрес: 644077, г. Омск, проспект Мира, 55 а

Тел.: (3812)630445; e-mail: prudnikov@mail.ru

Должность: заведующий кафедрой теоретической физики

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Е.В. Дворуруб, В.В. Прудников, П.В. Прудников. Моделирование поведения и магнитных свойств спин-вентильных наноструктур // Известия РАН. Сер. физич. 2022. Т. 86, № 2. С. 148–154. DOI: 10.31857/S0367676522020089
2. P.V. Prudnikov, V.V. Prudnikov, M.V. Mamonova, N.I. Piskunova. Influence of anisotropy on magnetoresistance in magnetic multilayer structures // J. Magn. Magn. Mater. 2019. Vol.482. P. 201-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.03.061>
3. V.V. Prudnikov, P.V. Prudnikov, M.V. Mamonova, M.M. Firstova, A.A. Samoshilova. Manifestation of aging in giant magnetoresistance of the Co/Cu/Co nanostructure // J. Phys. Commun. 2019. Vol. 3. No.1. 015002. <https://dx.doi.org/10.1088/2399-6528/aaf99c>
4. P.V. Prudnikov, V.V. Prudnikov, A.N. Purto, M.V. Mamonova, N.I. Piskunova. Non-equilibrium critical dynamics of multilayer magnetic structures // J. Magn. Magn. Mater. 2019. Vol. 470. P. 143-146. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.084>
5. В.В. Прудников, П.В. Прудников, М.В. Мамонова. Эффекты старения в неравновесном поведении магнитных сверхструктур и их проявление в магнитосопротивлении // ЖЭТФ. 2018. Т. 154. № 4(10). С. 855–867. DOI: 10.1134/S0044451018100000.
6. M.V. Mamonova, V.V. Prudnikov, P.V. Prudnikov, A.A. Samoshilova. Influence of diffuse interfaces on the magnetoresistance in trilayer magnetic structures // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1389. P. 012155. DOI: 10.1088/1742-6596/1389/1/012155.

Сведения удостоверяю:

Ученый секретарь ФГАОУ ВО
ОмГУ им. Ф.М. Достоевского,
кандидат филолог. наук, доц.



О.С. Рогалева