

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
НИУ МИЭТ,

кандидат технических наук

А.А. Дронов

«10» февраля 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Пашенькина Игоря Юрьевича на тему «Эффекты обменного и спин-орбитального взаимодействия в немагнитных прослойках ферромагнитных наноструктур», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа И.Ю. Пашенькина посвящена экспериментальному исследованию эффектов обменной и спин-орбитальной природы, наблюдающихся в многослойных магнитных наноструктурах с немагнитными диэлектрическими и парамагнитными металлическими прослойками.

В частности, обнаружен новый магнитоэлектрический эффект, заключающийся в зависимости межслоевого обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB от приложенного к барьеру электрического напряжения. Интерес к изучению магнитоэлектрических явлений связан с необходимостью понижения плотности тока записи ($10^6 - 10^7$ А/см²) в магниторезистивной памяти с произвольным доступом (MRAM), сдерживающей ее масштабирование. Среди основных критически важных требований к запоминающим элементам MRAM можно выделить совместимость с КМОП-технологией, высокое быстродействие, а также термическую стабильность, определяющую время хранения информации. Несмотря на изобилие

известных в литературе способов управления магнитным состоянием наносистем электрическим полем, в силу тех или иных принципиальных ограничений они не нашли применения в магнитной памяти. Предложенный в работе механизм переключения состояния туннельного магнитного контакта за счет электрического управления межслоевым обменным взаимодействием может быть перспективен для разработки энергоэффективной MRAM.

Экспериментально обнаружен новый поперечный транспортный эффект в туннельных контактах CoFeB/MgO/NM (NM = Pt, Ta), обусловленный спин-орбитальным взаимодействием туннелирующих электронов с сильным внешним электрическим полем, приложенным к барьеру. Эффект проявляется в квадратичной зависимости Холловской разности потенциалов на NM-электроре от напряжения, приложенного к туннельной прослойке. Данное явление представляет интерес как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения. С одной стороны обнаруженный эффект способствует расширению представлений о процессах спин-орбитального рассеяния, с другой стороны, может быть использован для выпрямления переменных электрических сигналов.

Экспериментально продемонстрировано обменное усиление магнитокалорического эффекта прослоек «слабых» ферромагнетиков NiCu и Gd, помещенных между «сильными» ферромагнетиками в многослойных наноструктурах CoFeB/NiCu/CoFe и CoSm/Fe/Gd/Fe/CoFeB. Интерес к магнитокалорическому эффекту связан с потенциальной возможностью создания на его основе эффективных и экологичных систем магнитного охлаждения. Однако для достижения заметных изменений температуры объемных магнитокалорических материалов необходимо приложение большого магнитного поля (~1 Тл), что сдерживает разработку и применение магнитных холодильников. В многослойных системах, исследованных в рамках диссертационной работы, внешнее магнитное поле заменяется обменными полями на границах с ферромагнетиками с относительно высокой температурой Кюри, что позволяет существенно понизить величину внешнего

магнитного поля при сохранении величины магнитокалорического эффекта, что может быть полезно при разработке систем магнитного охлаждения.

Из вышесказанного следует, что тема диссертации Пашенькина Игоря Юрьевича является **актуальной** и своевременной для развития нового направления экспериментальных исследований интерфейсной физики спин-орбитальных и магнитокалорических эффектов в многослойных магнитных гетероструктурах.

Научная новизна

Ниже перечислены основные результаты, характеризующие научную новизну работы:

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 .

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 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{72}\text{Cu}_2/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ (в 7 раз) и Fe/Gd/Fe (в 5 – 7 раз) по сравнению с отдельными парамагнитными пленками.

Обоснованность и достоверность вошедших в диссертационную работу результатов и положений, выносимых на защиту, обеспечивается использованием современного научного технологического и измерительного оборудования, а также обоснованностью используемых автором подходов. Научные положения и результаты диссертационного исследования не противоречат экспериментальным результатам и теоретическим моделям

других научных групп. Материалы диссертации прошли апробацию на международных конференциях и опубликованы в реферируемых журналах.

Научная и практическая значимость работы

1. Отработанная технология изготовления туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB с величиной магниторезистивного эффекта до 200 % при комнатной температуре может быть использована для разработки MRAM, а также датчиков магнитного поля.

2. Обнаруженный эффект зависимости межслоевого обменного взаимодействия в туннельных магнитных контактах CoFeB/MgO/CoFeB от напряжения, приложенного к барьеру, может стать основой для разработки энергоэффективной магнитной памяти.

3. Обнаруженный в ходе выполнения диссертационной работы новый квадратичный эффект Холла в туннельных контактах CoFeB/MgO/немагнитный металл, представляет интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. С одной стороны, наблюдаемое явление способствует расширению представлений о процессах спин-орбитального рассеяния, с другой стороны, может быть использован для выпрямления переменных электрических сигналов.

4. Продемонстрированный в работе эффект обменного усиления магнитокалорической эффективности в многослойных структурах FM/PM/FM может быть полезен при разработке систем магнитного охлаждения.

Рекомендации по использованию выводов диссертационной работы

Результаты диссертации могут быть рекомендованы для ознакомления и использованы в научных и образовательных организациях, где осуществляются теоретические и экспериментальные исследования эффектов спинтроники в тонкопленочных магнитных гетероструктурах, например: ФГБУН «ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН» (г. Москва), ФГБУН «Институт физики им. Х.И. Амирханова» ДФИЦ РАН (г. Махачкала), ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова» (г. Москва), ФГБУН ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург), ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС» (г. Москва), ФГБОУ ВО «БашГУ» (г. Уфа), ФГАОУ ВО «БФУ им. Иммануила Канта» (г. Калининград), ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» (г. Сыктывкар), ФГБОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского» (г. Омск), ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН (г. Ижевск), а также других научно-исследовательских учреждениях. Результаты могут быть использованы в качестве экспериментальной основы

для проектирования элементной базы устройств спинтроники, работающих на туннельном магниторезистивном эффекте. Помимо вышесказанного, данные результаты рекомендуются к использованию в учебном процессе ВУЗов по научным специальностям, связанным с физикой твердого тела.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертационная работа Пашенькина И.Ю. «Эффекты обменного и спин-орбитального взаимодействия в немагнитных прослойках ферромагнитных наноструктур», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует паспорту научной специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния. Направление исследования соответствует пункту 6 «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами».

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа по содержанию и структуре отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Работа изложена на 125 страницах, включает в себя 51 рисунок и 1 таблицу. Библиографический список состоит из 140 наименований. Содержание диссертации включает введение, четыре главы с оригинальными результатами, заключение, три приложения, список публикаций по теме диссертации и библиографический список.

Во **Введении** обоснована актуальность темы работы, описана степень ее разработанности, сформулированы основные цели и задачи, аргументирована научная новизна исследований, а также практическая значимость полученных результатов; описана методология и методы исследования, указан личный вклад автора в работу, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** обсуждаются особенности технологии изготовления многослойных магнитных наноструктур с немагнитными диэлектрическими и металлическими слоями, исследованных в рамках диссертационной работы.

Описаны основные способы формирования тонких пленок, в особенности, метод магнетронного распыления. Рассмотрены технологические аспекты создания топологического рисунка в

функциональных слоях слоистых наноструктур, в частности описаны методы литографии и ионного травления.

Приведены теоретические основы туннельного магнетосопротивления, а также гигантского туннельного магниторезистивного эффекта в эпитаксиальных структурах Fe(001)/MgO(001)/Fe(001).

Особое внимание уделено технологии изготовления туннельных магнитных контактов с аморфным барьером Al_2O_3 и текстурированным барьером MgO (001). Продемонстрирована возможность получения в ИФМ РАН туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB с величиной магнетосопротивления до 200 % при комнатной температуре. Описаны особенности получения различных типов распределения намагниченности в свободном слое туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB.

Глава 2 посвящена описанию результатов проведенных исследований возможности управления магнитным состоянием туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB с помощью электрического поля за счет изменения межслоевого обменного взаимодействия ферромагнитных слоев через диэлектрическую прослойку при приложении к ней напряжения.

Показано, что приложение к барьеру разности потенциалов в 1 В приводит к сдвигу кривой гистерезиса свободного слоя структуры по магнитному полю на 6 – 10 Э, соответствующему возникновению или увеличению эффективного поля межслоевого обменного взаимодействия антиферромагнитного типа. 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 закрепленном слое составила $\Delta M_x = M_S$. При этом плотность тока импульса не превышает 10^4 А/см². Автор связывает изменение межслоевого обменного взаимодействия с зависимостью формы потенциального барьера и его эффективной ширины от приложенного к нему электрического поля.

В **Главе 3** обсуждается новый эффект, заключающийся в возникновении поперечной разности потенциалов в NM-электроре при протекании спин-поляризованного электрического тока через туннельный контакт CoFeB/MgO/NM (NM = Pt, Ta). Показано, что Холловский сигнал в NM-электроре содержит нечетную и четную по электрическому полю компоненты. Зависимость четной части Холловского сигнала по напряжению хорошо

аппроксимируется параболой, а нечетная – линией. Автор утверждает, что линейная компонента содержит вклады от аномального и спинового эффектов Холла в металлических берегах туннельного контакта, а квадратичная обусловлена спин-орбитальным рассеянием во внешнем приложенном поле. Показано, что величина квадратичного Холловского сигнала не зависит от материала NM-электрода. Увеличение толщины последнего приводит к общему падению величины Холловского сигнала в связи с эффектом шунтирования. Приложение к туннельному контакту переменного напряжения приводит к возникновению постоянного Холловского сигнала, величина которого квадратично зависит от амплитуды этого напряжения.

Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию эффекта обменного усиления магнитокалорической эффективности тонких прослоек «слабого» ферромагнетика между слоями «сильных» ферромагнетиков в многослойных наноструктурах типа FM/PM/FM.

Приводятся оригинальные результаты исследования магнитных и магнитокалорических свойств многослойных структур CoFeB(15)/Ni₇₂Cu₂₈(15)/CoFe(20). Изменение энтропии системы ΔS определялось по кривым намагничивания структур, полученным при различных температурах с использованием соотношения Максвелла. Показано, что увеличение температуры приводит к уменьшению поля перемагничивания свободного слоя исследуемых структур, что соответствует падению величины эффективного поля межслоевого обменного взаимодействия ферромагнитных слоев через прослойку Ni₇₂Cu₂₈. Величина этого взаимодействия является показателем степени обменного подмагничивания «рефрижеранта». Показано, что изменение энтропии прослойки Ni₇₂Cu₂₈ толщиной 5 нм, которое происходит при смене взаимной ориентации намагниченности ферромагнетиков, в 50 раз превосходит магнитокалорический потенциал отдельной пленки Ni₆₈Cu₃₂ при приложении к ней магнитного поля величиной 30 Э, что соответствует увеличению магнитокалорической эффективности $\Delta S/\Delta H$ прослойки Ni₇₂Cu₂₈ в 7 раз.

Приведены экспериментальные результаты по обменному усилению магнитокалорической эффективности $\Delta S/\Delta H$ прослоек Gd в многослойных структурах CoSm(30)/Fe(1)/Gd(d)/Fe(1)/CoFeB(2). Продемонстрировано увеличение магнитокалорической эффективности $\Delta S/\Delta H$ прослоек Gd толщиной 2.5 и 3 нм в 5–7 раз по сравнению с отдельной пленкой Gd толщиной 30 нм, полученной в схожих технологических условиях.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Диссертация написана понятным научным языком, по каждой главе сделаны краткие и обоснованные выводы, отражающие суть диссертационного исследования.

Однако, диссертация не лишена недостатков, которые следует отметить.

Замечания по диссертационной работе

1. Установлено, что величина обменного взаимодействия в магнитных туннельных переходах стремится к нулю с ростом толщины туннельной прослойки MgO в область выше 1.5 нм (для Fe/MgO/Fe [T. Katayama, et al., Appl. Phys. Lett. – v. 89. – p. 112503. – 2006]). В диссертации утверждается, что «при приложении к туннельному промежутку электрического поля эффективная ширина потенциального барьера изменяется, что приводит к изменению межслоевого взаимодействия». В связи с этим вопрос – проводилась ли оценка, насколько в экспериментальных структурах CoFeB(2)/MgO(1.5–2.5)/CoFeB(4)/IrMn(10), где толщина MgO варьируется от 1.5 до 2.5 нм, константа межслоевого обменного взаимодействия возрастает с ростом напряжения в выбранном диапазоне толщин? При возможности было бы хорошо это указать, чтобы количественно подтвердить приведенные в Главе 2 выводы.

2. Автором в Главе 2 приводятся кривые изменения сопротивления магнитных туннельных контактов при различной амплитуде 100 нс импульсов напряжения, которые свидетельствуют о частичном переманчивании свободного ферромагнитного слоя, что фактически имитирует синаптическое поведение исследуемых структур и их мемристивные свойства с набором резистивных состояний (см. например, [P. Krzysteczko, et al., Advanced Materials. – v. 24. – p. 762. – 2012, S. Lequeux, et al., Sci. Rep. – v. 6. – p. 31510. – 2016]). В свете современного развития нейроморфной тематики в диссертации уместно отразить данное практическое применение результатов исследования в дополнение к созданию энергоэффективной MRAM.

3. В подписи к рисунку 3.5 указано, что кривые на рисунке 3.5в, где Холловский сигнал раскладывается на четную и нечетную составляющие, представляют собой «сумму и разность кривых» на рисунках 3.5а и 3.5б. Однако это не корректное утверждение, которое может привести в заблуждение, так как, согласно (3.3), амплитуды сигналов на рисунке 3.5в составляют половину от суммы и разности соответствующих сигналов.

4. Хорошо известно, что в спин-орбитальных гетероструктурах типа «ферромагнетик-тяжелый металл» результирующий Холловский сигнал при разложении на гармоники имеет составляющую $V_{2\omega}$ второго порядка [R. H.

Liu, W. L. Lim, and S. Urazhdin, Phys. Rev. B. – v. 89. – p. 220409. – 2014, L. Neumann and M. Meinert, AIP Advances. – v. 8. – p. 095320. – 2018], которая квадратична по отношению к плотности тока и электрическому полю соответственно ($V_{2\omega} = R_H^{2\omega} I_0 \sim j^2 \sim E^2$). По аналогии с магнитным туннельным переходом, данная компонента определяет влияние продольной и поперечной составляющей спин-орбитального вращательного момента на характер перемагничивания ферромагнитного слоя, а также паразитной добавки от аномального эффекта Нернста, связанной с градиентом температуры. Для оценки вклада эффекта в спин-транспортные свойства структуры неплохо было бы провести сравнение характерных зависимостей $V_{2\omega}$ от плотности тока j для туннельной структуры Pt(Ta)/MgO/CoFeB и близкой спин-орбитальной структуры Pt(Ta)/CoFeB.

5. Подписи на рисунках следует сделать русскоязычными и расшифровать вводимые на них аббревиатуры (в частности, рисунок 2.1, рисунок 3.1, рисунок 3.2, рисунок 3.3, рисунок 4.1, рисунок 4.4, рисунок 4.5, рисунок 4.7, рисунок 4.10, рисунок 4.11, рисунок 4.13, рисунок 4.14). Также у рисунков 4.3 и 4.4 слабый контраст – их качество следовало бы улучшить.

6. В тексте диссертационной работы нарушена нумерация рисунков – два раза встречается рисунок 3.3.

7. В подписи к рисунку 4.126 указана магнитокалорическая эффективность $\Delta S/\Delta H$, однако на самом рисунке в обозначении оси OY приводится параметр ΔS , характеризующий магнитокалорический потенциал.

8. В Главе 4 на основе полученных экспериментальных данных рекомендуется дать оценку, в каком диапазоне толщин парамагнитной прослойки (NiCu, Gd) будет достигаться кратное обменное усиление магнитокалорического эффекта по сравнению с отдельной пленкой при одинаковых внешних условиях.

Тем не менее, стоит отметить, что вышперечисленные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, а также не снижают ее научную и практическую значимость.

Заключение

Диссертационная работа Пашенькина Игоря Юрьевича на тему «Эффекты обменного и спин-орбитального взаимодействия в немагнитных прослойках ферромагнитных наноструктур», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, имеющие научную и практическую значимость для развития физики конденсированного состояния и технологии спиновой электроники. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Основные результаты работы представлены в 11 статьях, опубликованных в ведущих российских и зарубежных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, а также в 14 тезисах докладов международных конференций. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Пашенькина Игоря Юрьевича на тему «Эффекты обменного и спин-орбитального взаимодействия в немагнитных прослойках ферромагнитных наноструктур» представляет собой законченное научное исследование, **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.

Материал диссертации и настоящий отзыв обсуждены и одобрены на заседании ЦКП "Микросистемная техника и электронная компонентная база" Национального исследовательского университета «МИЭТ» « 29 » января 2025 г., протокол № 1.

Директор ЦКП «МСТ и ЭКБ»,
к.ф.-м.н.



Дюжев Н.А.

Отзыв составил:

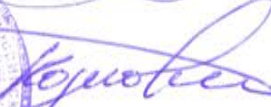
Демин Глеб Дмитриевич,

к.ф.-м.н., начальник научно-исследовательской лаборатории «Моделирование и разработка изделий нано- и микросистемной техники» ЦКП "Микросистемная техника и электронная компонентная база", доцент Института ИнЭл



Демин Г.Д.

Подписи Дюжева Н.А. и Демина Г.Д. заверяю
Ученый секретарь НИУ МИЭТ, к.т.н.



Козлов А.В.

МП

« 10 » февраля 2025 г.

Полное название организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

Телефон: (499) 731-44-41; **Факс:** (499) 710-22-33.

Электронная почта: netadm@miee.ru.