

Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

На правах рукописи

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно - квалификационной работы (диссертации)

### **«ЭФФЕКТЫ ОБМЕННОГО И СПИН-ОРБИТАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В НЕМАГНИТНЫХ ПРОСЛОЙКАХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУР»**

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

направление подготовки: 03.06.01 — Физика и астрономия  
направленность: 01.04.01 – 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Выполнил аспирант: Пашенькин Игорь Юрьевич

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук:

Сапожников Максим Викторович

дата: \_\_\_\_ июня 2024 г.

Нижний Новгород - 2024 г.

## Актуальность темы исследования

Исследования тонких магнитных пленок и слоистых наноструктур, проведенные за последние 50 лет, имеют огромное фундаментальное и прикладное значение. Интенсивное развитие технологии поспособствовало открытию большого количества новых физических эффектов обменной и спин-орбитальной природы, возникающих при объединении ферромагнетиков с антиферромагнитными, парамагнитными или немагнитными материалами в единой многослойной системе.

Так, открытие Альбертом Фертом и Петером Грюнбергом в 1988 году эффекта гигантского магнетосопротивления (ГМС) в сверхрешетках Fe/Cr [1,2], за что в 2007 году им была присуждена нобелевская премия, положило начало новому витку развития спинтроники. Эффект туннельного магнетосопротивления (ТМС), не получивший должного внимания на момент открытия в 1975 году Мишелем Жюльером в структурах Fe/GeO/Co [3] ввиду малой его величины (около 14 % при температуре 4.2 К), однако, обладал колоссальным потенциалом. На сегодняшний день туннельные магниторезистивные (ТМР) структуры, благодаря гигантским значениям магниторезистивного эффекта в структурах с кристаллическим барьером MgO [4] (более 200 % при комнатной температуре), являются одним из основных компонентов элементной базы спиновой электроники.

Эффекты ГМС и ТМС обусловлены обменным расщеплением спиновых подзон в ферромагнетиках, которое приводит к относительному увеличению плотности состояний на уровне Ферми электронов со спиновым моментом, чаще всего сонаправленным с намагниченностью. Большинство магниторезистивных элементов имеют структуру типа «спиновый» клапан, состоящую из ферромагнитных слоев, разделенных немагнитными прослойками, способных под действием внешнего магнитного поля изменять взаимную ориентацию намагниченности. Как правило, намагниченность одного из ферромагнетиков «закрепляют» путем наведения в нем однонаправленной анизотропии за счет прямого обменного взаимодействия (ОВ) ферромагнетика с антиферромагнетиком.

Межслоевое обменное взаимодействие (МОВ), имеющее место в слоистых структурах типа FM/NM, PM, D/FM (FM – ферромагнетик, NM – немагнитный металл, PM – парамагнетик (ферромагнетик при температуре выше его точки Кюри), D – диэлектрик), может быть достаточно сильным, чтобы определять основное магнитное состояние системы во внешних магнитных полях до нескольких килоэрстед. Как правило, обменное взаимодействие между ферромагнетиками, разделенными немагнитными металлическими или диэлектрическими слоями, осуществляется через электроны проводимости и имеет

осциллирующую знакопеременную зависимость от толщины прослойки [5, 6]. Структуры FM/NM/FM с антиферромагнитным межслоевым РККИ взаимодействием, называемые синтетическими антиферромагнетиками (или ферримагнетиками) (САФ) часто используют для усиления обменного сдвига и компенсации полей рассеяния в спин-вентильных магниторезистивных элементах [7].

Интерес к изучению МОВ в структурах FM/D/FM обусловлен потенциальной возможностью управления его величиной с помощью электрического поля, что может стать основой для разработки энергоэффективной магниторезистивной памяти с произвольным доступом (MRAM).

Межслоевое взаимодействие ферромагнетиков в структурах FM/PM/FM является следствием эффекта обменной магнитной близости FM и PM [8], возникающего из-за наличия между ними прямого ОВ, и может быть использовано для изучения магнитокалорических свойств таких систем [9], благодаря наличию связи между изменением энтропии прослойки PM и производной константы МОВ по температуре [9]. ОВ на границах с FM может приводить к наведению в PM магнитного момента [10]. Результатом, так называемого, эффекта магнитной близости, может быть обменное усиление магнитокалорического эффекта (МКЭ) в таких системах, теоретически предсказанное в [11, 12]. При этом по МОВ между слоями FM можно судить о степени магнитного упорядочения PM-прослойки.

Комбинирование сверхтонких ферромагнитных слоев со слоями тяжелых металлов, а также оксидов позволило обнаружить новые спин-орбитальные эффекты. Так, наличие границы с материалом с большим спин-орбитальным взаимодействием (СОВ) может приводить к возникновению в ферромагнитной пленке поверхностной перпендикулярной магнитной анизотропии [13]. Еще одним проявлением СОВ на интерфейсе ферромагнетика и тяжелого металла является взаимодействие Дзялошинского-Мория [14], приводящее к возникновению киральных неоднородных топологически защищенных распределений намагниченности. Спин-орбитальное рассеяние электронов проводимости, инжектируемых из ферромагнетика с тяжелый металл, приводит к возникновению обратного спинового эффекта Холла (СЭХ) [15].

Многослойные магнитные наноструктуры, содержащие немагнитные металлические или диэлектрические функциональные слои являются основными компонентами большинства приборов спиновой электроники, среди которых можно выделить датчики магнитного поля [16], магниторезистивную память [17], генераторы излучения с частотами от сотен мегагерц [18] до единиц терагерц [19]. Стремительный прогресс двух последних десятилетий в разработке материалов и устройств на основе магнитных

наноструктур делает спинтронику конкурентоспособной с полупроводниковой электроникой в ряде приложений. Помимо высокого быстродействия, низкого энергопотребления и долговечности приборы на основе магнитных наноструктур обладают выдающейся радиационной стойкостью, а также энергонезависимостью.

### **Степень разработанности темы исследования**

Развитие TMR-технологии стимулировали поиск способов переключения состояния ТМК. Существует целый ряд работ, в которых управление магнитным состоянием ячеек MRAM осуществляется путем электрического управления МОВ и СОВ. Наиболее изученным и широко применяемым на практике является эффект передачи спинового момента (spin-transfer torque (STT)), возникающий при протекании спин-поляризованного электрического тока через барьер туннельного магнитного контакта (ТМК) [20]. Величина плотности тока, необходимая для осуществления переключения состояния определяется его спиновой поляризацией, а также магнитной анизотропией и толщиной свободного слоя и составляет порядка  $10^6$  А/см<sup>2</sup>. Широко исследован и на сегодняшний день активно внедряется способ переключения ячеек магнитной памяти за счет спинового эффекта Холла. Этот механизм также основан на эффекте STT, однако инжекция спин-поляризованного тока в свободный слой ТМК осуществляется путем пропускания электрического тока по тяжелому металлу, на котором формируется TMR-структура (SOT-MRAM) [21]. Описанные механизмы управления магнитным состоянием ТМК объединяет общий недостаток – высокая плотность тока записи ( $10^6 - 10^7$  А/см<sup>2</sup>), что обуславливает их низкую энергоэффективность и сдерживает процесс миниатюризации MRAM.

Поэтому одной из наиболее актуальных задач спиновой электроники на сегодняшний день является поиск способов переключения магнитного состояния наносистем с помощью электрического поля, а не тока (магнитоэлектрический эффект). Исследования магнитоэлектрических явлений в магнитных наноструктурах, в основном, направлены на понижение энергии переключения элементов магнитной памяти.

Ряд работ в этом направлении посвящен управлению величиной обменного смещением в системах типа FM-oxide/FM/AFM за счет окислительно-восстановительных реакций, протекающих под действием электрического поля [22]. Однако низкая скорость электрохимических процессов делает этот метод непригодным для практического использования. Известны работы, в которых наблюдается смена знака обменного сдвига тонких ферромагнитных пленок, помещенных на магнитоэлектрический антиферромагнетик Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при одновременном приложении к нему электрического и

магнитного поля [23].

Широко изучен эффект зависимости поверхностной анизотропии от электрического поля (voltagecontrolofmagneticanisotropy (VCMA)), обусловленный зарядовой аккумуляцией на границе диэлектрика и ферромагнетика [24]. Однако этот метод требует, чтоб исходная анизотропия свободного (переключаемого) слоя была достаточно низка, что понижает термическую стабильность ячеек памяти. В ряде работ продемонстрировано изменение магнитокристаллической анизотропии ферромагнитных пленок с использованием явления магнострикции в гибридных структурах сегнетоэлектрик/ферромагнетик [25].

Известно, что МОВ ферромагнитных слоев через туннельно-прозрачный слой диэлектрика зависит от его толщины [6]. Приложение к барьеру электрического напряжения должно приводить к изменению формы потенциального барьера и, следовательно, его эффективной ширины. Пользуясь таким простым предположением, можно рассчитывать на изменение МОВ под действием электрического поля. Однако вопрос о возможности электрического управления МОВ в ТМК изучен недостаточно. Исследованию этого вопроса посвящена Глава 2 данной работы.

Большое количество теоретических и экспериментальных работ посвящено изучению транспортных эффектов, обусловленных СОВ, а также механизмам спин-орбитального рассеяния в магнитных наноструктурах. СОВ отвечает за многие интенсивно исследуемые физические свойства и явления, включая топологические изоляторы [26], СЭХ [15], анизотропное и туннельное анизотропное магнетосопротивление [27].

Известны работы, в которых при исследовании СЭХ в пленках тяжелых металлов в качестве инжектора спин-поляризованного тока используется туннельный контакт с ферромагнитным электродом [28]. При этом возникновение поперечной разности потенциалов в нормальном металле объясняется спин-орбитальным рассеянием инжектированных электронов на атомарных полях материала холловского электрода. Существует ряд теоретических работ, в которых учитывается спин-орбитальное рассеяние внутри туннельного барьера. Так, в работах [15, 29], так называемый, туннельный эффект Холла (ТЭХ) рассчитывался в системе FM/D/NM с учетом нецентросимметричности прослойки (спин-орбитальное взаимодействие Рашба и Дрессельхаус). Авторами работ [30, 31] было рассмотрено рассеяние на примесях в барьере. Все перечисленные транспортные эффекты обусловлены СОВ, вызванным атомарными или встроенными электрическими полями. Вопрос о возможных эффектах, обусловленных спин-орбитальным рассеянием электронов во внешнем электрическом поле, приложенном к туннельному контакту ( $\sim 10^9$  В/м), в достаточной степени не изучен.

Лишь в работе [32] теоретически вычислялся «аномальный» холловский ток в системе FM/D/FM с учетом индуцированного приложенным полем СОВ. Однако, экспериментально предложенный механизм спин-орбитального рассеяния во внешнем электрическом поле не исследован.

Большое число теоретических и экспериментальных работ посвящено изучению эффектов обменной магнитной близости, возникающих при контакте материалов с различным магнитным порядком [33]. Одно из проявлений данного эффекта заключается в наведении намагниченности в парамагнетике, граничащем с ферромагнетиком [10]. В работах [11, 12] было предложено использовать обменные поля для усиления магнитокалорической эффективности в слоистых системах FM/PM/FM. Прямое ОВ на границах PM и FM будет приводить к подмагничиванию парамагнитной прослойки. Причем средний квадрат намагниченности, а, следовательно, и энтропия в ней будет зависеть от взаимной ориентации магнитных моментов в берегах, которая может переключаться в магнитных полях порядка сотни Э. Такой подход может позволить достигать изменения энтропии, эквивалентного получаемому при приложении магнитного поля к парамагнетику около 1 Тл. Однако, описанный эффект требует последовательного экспериментального исследования, что и было сделано в данной работе.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Цель диссертационного исследования состояла в исследовании обменных и спин-орбитальных эффектов в немагнитных прослойках ферромагнитных наноструктур.

Основными задачами данной работы являлись:

- Исследование возможности управления межслоевым обменным взаимодействием в через диэлектрическую прослойку с помощью электрического поля, приложенного к туннельному магнитному контакту CoFeB/MgO/CoFeB;
- Изучение процессов спин-орбитального рассеяния электронов в сильном внешнем электрическом поле, приложенном к барьеру туннельного контакта;
- Экспериментальное исследование усиления магнитокалорической эффективности в слоистых наноструктурах за счет эффекта обменной магнитной близости между парамагнетиком и окружающими его ферромагнетиками

### **Научная новизна**

Впервые обнаружена зависимость межслоевого обменного взаимодействия в ТМК

CoFeB/MgO/CoFeB от приложенного к барьеру электрического поля. Эффект проявляется в сдвиге кривой намагничивания свободного слоя по магнитному полю на  $6 \text{ Э}$  при приложении к ТМК напряжения величиной  $1 \text{ В}$ . Продемонстрировано изменение магнитного состояния ТМК при приложении к нему коротких импульсов напряжения величиной  $2 \text{ В}$  длительностью  $100 \text{ нс}$ . При этом плотность тока, протекающего через контакт не превышает  $10^4 \text{ А/см}^2$ . Изменение проекции средней намагниченности свободного слоя ТМК на ось однонаправленной анизотропии закрепленного слоя составила около  $\Delta M_x = M_S$ .

Обнаружен новый эффект Холла в туннельных контактах CoFeB/MgO/NM (NM = Pt, Ta), обусловленный СОВ туннелирующих электронов с сильным внешним электрическим полем, приложенным к барьеру. Эффект проявляется в квадратичной зависимости поперечной разности потенциалов на NM-электродах от приложенного к барьеру и не зависит от материала NM-электрода.

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 10 раз) и  $\text{Fe}/\text{Gd}/\text{Fe}$  (в 5 раз) по сравнению с отдельными парамагнитными пленками.

### **Практическая значимость**

В ходе выполнения работы разработана уникальная для РФ технология изготовления туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB микронного и субмикронного латерального размера. В зависимости от геометрических параметров контакта реализуется квазиоднородное или вихревое распределение намагниченности свободного слоя. Обнаружена зависимость межслоевого обменного взаимодействия от электрического поля, приложенного к туннельному барьеру MgO, а также показана возможность изменения магнитного состояния туннельных магнитных контактов CoFeB/MgO/CoFeB приложением к нему короткого импульса напряжения. Полученные результаты могут быть использованы для разработки энергоэффективной магниторезистивной памяти с произвольным доступом. Разработанная в ходе выполнения диссертационной работы оригинальная технология изготовления ТМК с вихревым распределением намагниченности свободного слоя защищена патентом и может быть использована для разработки высокочувствительных датчиков магнитного поля, а также излучателей и приемников электромагнитного излучения.

Обнаружен новый эффект, заключающийся в спин-орбитальном рассеянии электронов

во внешнем электрическом поле, приложенном к барьеру туннельного контакта. Эффект проявляется в квадратичной зависимости поперечной разности потенциалов в NM-электроре, от напряжения, приложенного к туннельному контакту CoFeB/MgO/NM. Полученный результат интересен с фундаментальной точки зрения, также может быть использован для управления транспортными свойствами магнитных наноструктур.

Экспериментально продемонстрировано 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. В первом случае магнитокалорическая эффективность прослойки Ni<sub>72</sub>Cu<sub>28</sub> толщиной 20 нм возрастает примерно в 10 раз по сравнению с отдельной пленкой Ni<sub>67</sub>Cu<sub>33</sub>. Магнитокалорическая эффективность прослойки Gd толщиной 3 нм в составе структуры CoSm/Fe/Gd/Fe/CoFeB увеличивается примерно в 5 раз по сравнению с пленкой Gd толщиной 30 нм, полученной в схожих технологических условиях. Продемонстрированный принцип обменного усиления магнитокалорического эффекта может быть использован для дальнейшей разработки систем магнитного охлаждения, в том числе и на основе объемных гранулированных материалов.

### **Методы и методология исследования**

Многослойные магнитные наноструктуры изготавливались методом магнетронного распыления. Туннельные магнитные контакты микронного и субмикронного латерального размера изготавливались методами безмасочной оптической и электронной литографии соответственно. Магнитные свойства изготавливаемых структур исследовались измерениями магнитооптического эффекта Керра, методами СКВИД-магнитометрии и вибромагнитометрии, а также спектроскопии ферромагнитного резонанса (ФМР) при различных температурах. Для проведения транспортных исследований туннельных магнитных контактов был разработан специальный стенд, включающий в себя столик с прижимными контактными зондами, оборудованными механической системой позиционирования, оптический микроскоп, источник-измеритель и электромагнит с источником тока. Измерительный процесс полностью автоматизирован с применением программного пакета LabVIEW.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Приложение электрического напряжения к туннельному магнитному контакту



CoFeB/MgO/CoFeB позволяет управлять его магнитным состоянием за счет изменения межслоевого обменного взаимодействия через диэлектрическую прослойку.

2. В сильном электрическом поле (до  $10^9$  В/м), приложенном к туннельному контакту CoFeB/MgO/немагнитный металл, возникает квадратичный по напряжению поперечный транспортный эффект - туннельный эффект Холла, обусловленный спин-орбитальным рассеянием туннелирующих электронов во внешнем электрическом поле.

3. Эффект обменной магнитной близости на границах парамагнитного и ферромагнитных слоев в системах CoFeB/NiCu/CoFe и CoSm/Fe/Gd/Fe/CoFeB приводит к кратному возрастанию магнитокалорической эффективности по сравнению с отдельными пленками NiCu и Gd.

### **Личный вклад автора**

- Основной вклад в разработку технологии и изготовление многослойных магнитных наноструктур, в том числе туннельных магнитных контактов и структур FM/PM/FM.

- Проведение основного объема транспортных и магнитооптических измерений исследуемых структур.

- Равнозначный вклад в проведение постростовых процессов для проведения транспортных измерений. Оптическая литография, ионное травление, термический отжиг проводились совместно с Гусевым Н. С.

- Равнозначный вклад в исследования магнитоэлектрического эффекта в туннельных магнитных контактах CoFeB/MgO/CoFeB. Постановка задачи осуществлялась совместно с Сапожниковым М. В. и Фраерманом А. А. Изготовление образцов – совместно с Гусевым Н. С. Разработка стенда для проведения транспортных исследований и программы автоматизации измерительного процесса – Сапожников М. В.

- Равнозначный вклад в исследования эффектов Холла в туннельных контактах. Постановка задачи осуществлялась совместно с Сапожниковым М. В., Фраерманом А. А. и Караштиным Е. А. Изготовление образцов – совместно с Гусевым Н. С. Разработка программы автоматизации транспортных измерений – Сапожников М. В.

- Равнозначный вклад в экспериментальные исследования обменного усиления магнитокалорического эффекта в магнитных наноструктурах. Постановка задачи – совместно с Сапожниковым М. В., Фраерманом А. А., Полушкиным Н. И., Изготовление структур осуществлялось автором. Магнитометрические измерения проводились Кравцовым Е. А. (Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия).

## **Степень достоверности и апробация результатов**

Работа выполнена на современном оборудовании. Научные положения и результаты диссертации обоснованы сопоставлением с имеющимися в литературе данными, использованием дополняющих друг друга подходов, сравнением с результатами теоретических расчетов. Полученные результаты опубликованы в реферируемых журналах. Результаты диссертационной работы докладывались на 10 российских и международных конференциях. В их число входят:

- XXIII, XXIV, XXVI, XXVII, XXVIII Международные симпозиумы «Нанозифика и наноэлектроника», (Н.Новгород, 2019, 2020, 2022, 2023, 2024 гг.).
- XXIV Международная научная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (1 – 8 июля 2021 года, Москва).
- V International Baltic Conference on Magnetism (August 20 – August 24 2023, Kaliningrad, Russia).
- VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism»: EASTMAG-2022 (August 22 2022 – August 26 2022, Kazan, Russia).
- Samarkand International Symposium on Magnetism SISM-2023 (July 02 2023 – July 06 2023, Samarkand, Uzbekistan)
- 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism (May 04 2023 – May 11 2023, Fethiye-Oludeniz, Turkey)

## **Публикации**

Результаты работы опубликованы в оригинальных статьях в отечественных и зарубежных журналах, сборниках трудов и тезисов докладов на научных конференциях. Всего по материалам диссертации опубликовано 24 работы, из них 10 журнальных статей. Полный список публикаций автора по теме диссертационной работы приведен в конце диссертации.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 116 страниц. Диссертация содержит 48 рисунков и 1 таблицу. Список литературы включает 139 наименований.

## Содержание работы

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 ТМС, а также гигантского ТМР эффекта в эпитаксиальных структурах Fe(001)/MgO(001)/Fe(001).

Особое внимание уделено технологии изготовления ТМК с аморфным барьером Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и текстурированным барьером MgO (001), получаемых в ИФМ РАН [A1, A2]. Описаны особенности получения различных типов распределения намагниченности в свободном слое ТМКCoFeB/MgO/CoFeB [A3, A4].

Глава 2 посвящена описанию результатов проведенных исследований по управлению магнитным состоянием ТМКCoFeB/MgO/CoFeB с помощью электрического поля за счет изменения МОВ ферромагнитных слоев через диэлектрическую прослойку при приложении к ней напряжения [A2, A5].

Одной из наиболее актуальных практически значимых задач спиновой электроники является управление магнитным состоянием наносистем электрическим полем (магнитоэлектрический эффект), т. е. без протекания токов больших плотностей.

Промышленно выпускаемая на сегодняшний день STT-MRAM, а также следующее поколение – SOT-MRAM, объединены общим недостатком – высокая плотность тока записи ( $10^6 - 10^7$  А/см<sup>2</sup>), что обуславливает проблемы, связанные с высоким энергопотреблением и масштабированием.

Одним из возможных вариантов решения проблемы энергоэффективности MRAM – это использование эффекта VCSMA [43]. Однако процесс детерминированного переключения предъявляет жесткие требования к форме и длительности импульсов напряжения. Кроме того, слабая зависимость энергии поверхностной магнитной анизотропии от электрического поля приводит к необходимости формирования свободного слоя со слабой ПМА, что сказывается на термической стабильности VCSMA-MRAM.

В рамках диссертационного исследования предложен альтернативный способ переключения магнитного состояния ТМКCoFeB/MgO/CoFeB, который заключается в управлении МОВ между магнитными слоями электрическим полем. Идея основана на том

факте, что в эпитаксиальных системах Fe/MgO/Fe, константа МОВ сильно зависит от толщины туннельного барьера MgO [18]. Приложение к ТМК электрического напряжения должно приводить к изменению формы потенциального барьера и, следовательно, его эффективной ширины. Пользуясь таким простым предположением, можно рассчитывать на изменение МОВ под действием электрического поля.

Исследованные образцы представляли собой цепочки из 50 последовательно соединенных ТМК размером  $2 \times 3$  мкм<sup>2</sup> с общей структурой Ta(20)/Pt(10)/Ta(20)/CoFeB(2)/MgO(1.5–2.5)/CoFeB(4)/IrMn(10)/Ta(3)/Pt(10) (толщины указаны в нм). Для исследования зависимости МОВ от электрического поля измерялись кривые магнетосопротивления при различных напряжениях, приложенных к барьеру ТМК.

Увеличение приложенного к ТМК напряжения с 50 мВ до 1 В на один элемент приводило к двум основным эффектам. Первый эффект заключается в падении величины ТМР эффекта (рис. 1, а). Данное явление хорошо известно и связано с возникновением возможности туннелирования электронов из неосновной спиновой подзоны в основную при достаточно больших значениях напряжения, приложенного к барьеру [72].

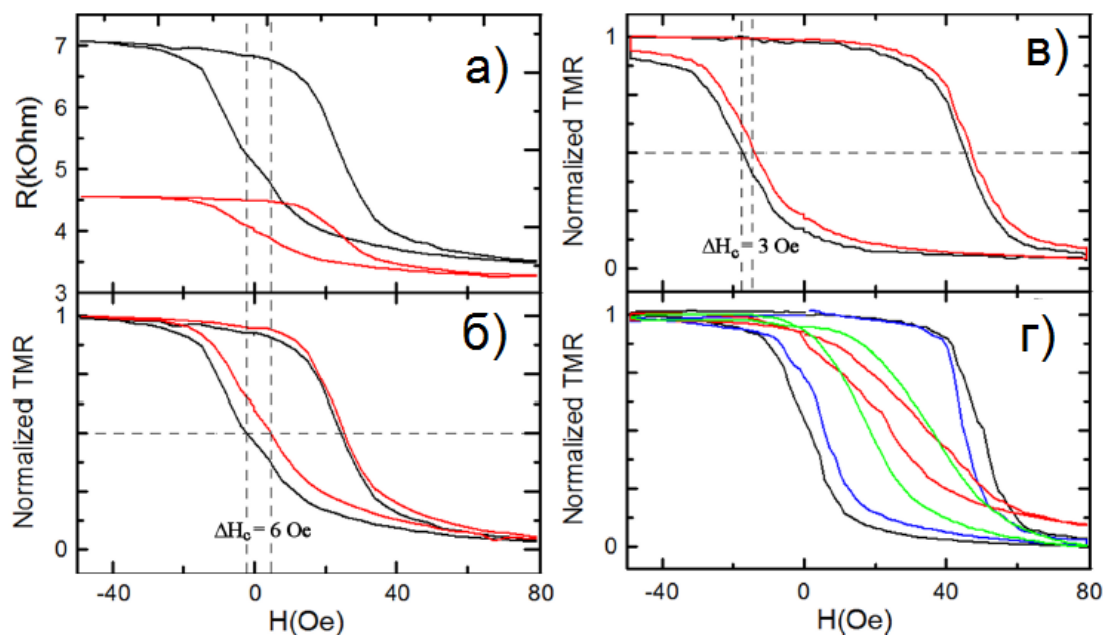


Рис. 1. Кривые магнетосопротивления цепочек ТМК. Черная, синяя, зеленая и красная кривые соответствуют напряжению 0.05, 0.2, 0.8 и 1 В на 1 ТМК. а) – кривые магнетосопротивления образца с сопротивлением 3.4 кОм на контакт; б) – те же кривые, нормированные на единицу; в) и г) – нормированные кривые магнетосопротивления образцов с сопротивлением 10 кОм и 200 Ом на контакт соответственно [A2, A5]

Второй эффект заключается в смещении кривой намагничивания свободного слоя по магнитному полю на 6 Э (рис. 1, б) для цепочки с сопротивлением 3.4 кОм на контакт и

толщиной барьера  $t_b \sim 2$  нм. При увеличении толщины MgO и, соответственно, сопротивления ТМК величина этого смещения уменьшается (рис. 1, в). Так, в образце с сопротивлением 10 кОм на контакт ( $t_b \sim 2.2$  нм), сдвиг кривой гистерезиса свободного слоя составляет 3 Э при напряжении 1 В на контакт. Важно отметить, что величина и направление наблюдаемого смещения не зависят от полярности приложенного напряжения. В образцах с сопротивлением 200 Ом на контакт наблюдается сужение кривых намагничивания (рис. 1, г), что связано с разогревом структуры.

Предполагаемый механизм возникновения сдвига кривой гистерезиса свободного слоя на зависимости  $R(H)$  при приложении напряжения к ТМК состоит в изменении МОВ между ферромагнитными электродами через туннельную прослойку.

Чтобы исключить эффекты разогрева и перераспределения тока, которые могут иметь место при проведении транспортных измерений при постоянном токе и большом напряжении, было проведено исследование влияния коротких импульсов электрического напряжения на магнитное состояние ТМК. Было обнаружено, что приложение к одиночному контакту коротких импульсов 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/см<sup>2</sup>.

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) [A6, A7].

Широко известные транспортные спин-орбитальные эффекты, такие как анизотропное и туннельное анизотропное магнетосопротивление, а также прямой и обратный СЭХ, обусловлены спин-орбитальным рассеянием электронов на атомарных или встроенных электрических полях. Известно, что электрическое поле, которое может быть создано внутри диэлектрической прослойки ТМК, может достигать  $10^9$  В/м (всего на 1 – 2 порядка меньше атомарных). В связи с этим возникает вопрос о возможных спин-орбитальных эффектах непосредственно в туннельном зазоре.

В рамках диссертационной работы был экспериментально исследован ТЭХ в структурах CoFeB/MgO/NM (NM = Pt, Ta), возникающий при пропускании электрического поля через туннельный контакт. Идея состоит в том, что сильное электрическое поле внутри диэлектрика будет приводить к возникновению Холловской разности потенциалов в нормальном электроре, квадратичной по напряжению, приложенному к барьеру. Возможность такого эффекта ранее была теоретически предсказана в [32].

Исследованные образцы представляли собой туннельные контакты Ta(20)/CoFeB(10)/MgO(1.5)/Pt(t) ( $t = 1, 2, 10$ ) и Ta(20)/CoFeB(10)/MgO(1.5)/Ta(2) (толщины указаны в нм) с NM-электродом T-образной формы микронного латерального размера (рис. 2).

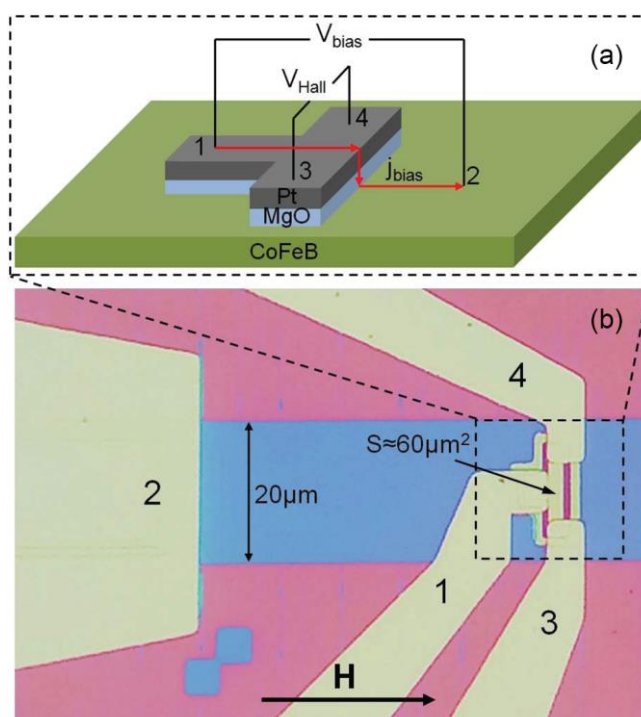


Рис. 2. (а) Схема образца и геометрия измерений. (б) Изображение образца, полученное в оптическом микроскопе. Номера электродов соответствуют схеме (а). “S” обозначает площадь туннельного контакта, стрелка указывает направление приложенного магнитного поля.

Транспортные измерения проводились в геометрии обратного СЭХ. Постоянное напряжение прикладывалось к контактам 1 и 2 ( $V_{bias} = V_{12}$ ), а Холловская разность потенциалов измерялась между контактами 3 и 4 ( $V_{34}$ ) в зависимости от внешнего магнитного поля в плоскости образца, как показано на рис. 2.

На рис. 3 приведены характерные зависимости Холловского напряжения от магнитного поля для положительного (а) и отрицательного (б) напряжения  $V_{bias} = \pm 2$  В, приложенного к туннельному барьеру. Измеренный сигнал можно разделить на четную и нечетную части по приложенному электрическому полю (рис. 3, в). Четная часть представляет собой искомое проявление спин-орбитального эффекта, связанного с сильным внешним электрическим полем, приложенным к туннельному барьеру. Нечетная часть включает остальные возможные эффекты Холла, линейные по приложенному напряжению, такие как аномальный эффект Холла в магнитном электроде или обратный спиновый эффект

Холла в Pt-электроре.

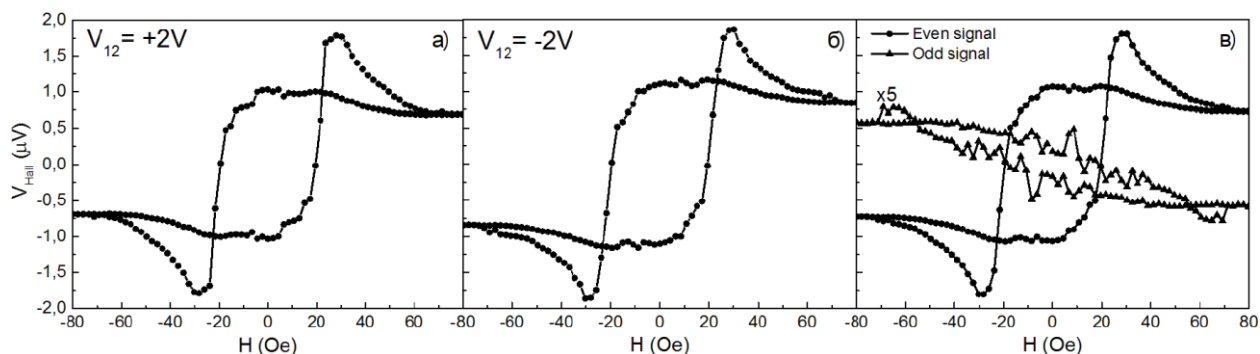


Рис. 3. Типичные зависимости Холловского напряжения от магнитного поля для положительного (а) и отрицательного (б) напряжения  $V_{bias} = \pm 2$  В, приложенного к туннельному барьеру. Толщина верхнего Pt-электрода составляет 1 нм. (в) – сумма (круги) и разность (треугольники) кривых (а) и (б), которые соответствуют четной и нечетной частям исходного Холловского сигнала по электрическому полю соответственно. Приведенные графики являются результатом усреднения 70 измерений [А6, А7].

Зависимость амплитуды четной части Холловского сигнала от  $V_{bias}$ , измеренная в магнитном поле насыщения инжекторного слоя, точно аппроксимируется параболой (рис. 4, а). Нечетный Холловский сигнал хорошо описывается линейной зависимостью.

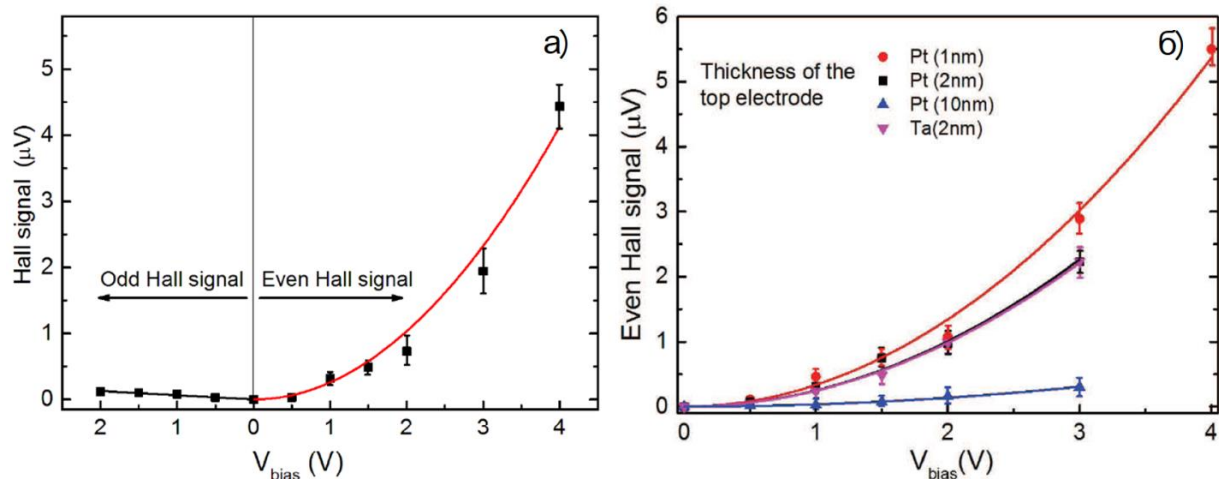


Рис. 4. а) – зависимость напряжения четной (правая сторона) и нечетной (левая сторона) частей исходного Холловского сигнала в образце с Pt-электродом толщиной 1 нм от электрического поля, измеренного в режиме насыщения; б) – зависимость четной части Холловского сигнала от напряжения при нулевом внешнем магнитном поле для образцов с различными NM-электродами [А6, А7].

Измерения образца с верхним Ta-электродом толщиной 2 нм показали наличие аналогичного нелинейного эффекта Холла. Кроме того, его величина практически такая

же, как и в образце с Pt-электродом той же толщины (рис. 4, б). Линейная часть при этом оказывается в три раза меньше и имеет другой знак. Таким образом наблюдаемый эффект не зависит от материала немагнитного металлического электрода и связан с рассеянием электронов в барьере MgO. Поскольку константа COB в Ta на порядок меньше, чем в Pt, наблюдаемый квадратичный эффект не может быть обусловлен спин-холловским рассеянием на верхнем NM-электроде.

**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.

Обычно достаточно большой (до 10 градусов) МКЭ достигается в магнитном поле величиной в несколько Тл вблизи температуры Кюри ( $T_C$ ) магнитного материала. Необходимость создания таких сильных полей сдерживает разработку и применение систем магнитного охлаждения.

Авторами работ [11, 12] сделаны теоретические оценки и предложен новый подход к повышению эффективности магнитного охлаждения, основанный на использовании эффекта магнитной близости парамагнетика (ферромагнетика при температуре выше его точки Кюри) (PM) с ферромагнетиками (FM) в наноструктурах FM/PM/FM. Вследствие наличия обменного взаимодействия на границах PM и FM, средний квадрат намагниченности PM прослойки будет зависеть от взаимной ориентации намагниченности FM берегов, которой можно управлять приложением относительно небольшого магнитного поля порядка  $10^{-2}$  Тл.

В рамках диссертационной работы было проведено экспериментальное исследование магнитокалорического эффекта в двух типах многослойных наноструктур:  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(20)/\text{Ni}_{72}\text{Cu}_{28}(5 - 15)/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}(15)$  и  $\text{CoSm}(30)/\text{Fe}(1)/\text{Gd}(2.5-5)/\text{Fe}(1)/\text{CoFeB}(2)$ . Слои  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(20)$  и  $\text{CoSm}(30)/\text{Fe}(1)$  являются закрепленными и обладают более высокой коэрцитивностью по сравнению со слоями  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}(15)$  и  $\text{Fe}(1)/\text{CoFeB}(2)$ , которые перемагничиваются в относительно небольших полях.

Магнитокалорический потенциал  $\Delta S$  исследованных образцов определялся с использованием соотношения Максвелла по температурной зависимости кривых их намагничивания, полученных методами СКВИД-магнитометрии, вибромагнитометрии и Керровской магнитометрии. Во всех исследованных образцах увеличение температуры приводит к уменьшению поля перемагничивания свободного слоя, что соответствует падению величины эффективного поля межслоевого обменного взаимодействия через прослойку PM, характеризующего степень ее подмагниченности.

На рис. 5 приведены зависимости  $\Delta S$  от  $T$  для образца с толщиной прослойки  $\text{Ni}_{72}\text{Cu}_{28}$



равной 15 нм. Также показаны результаты измерения  $\Delta S$  для образцов  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ni}_{67}\text{Cu}_{33}/(3)\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/(25)\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$ , полученные в [22]. Максимальный магнитокалорический потенциал составляет  $\Delta S \approx 3.3 \cdot 10^3$  эрг/см<sup>3</sup>/К при  $T = T_c$ . На том же графике приведена температурная зависимость  $\Delta S$  отдельной пленки  $\text{Ni}_{67}\text{Cu}_{33}$  в области полей от  $H = 0$  Э до  $H = 30$  Э, полученная экстраполяцией данных из работы [21] в область малых  $H$ .

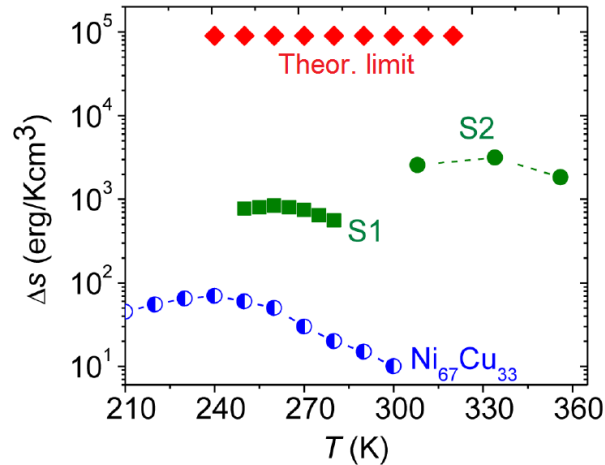


Рис. 5. Экспериментальные зависимости  $\Delta S(T)$  для многослойных систем  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ni}_{67}\text{Cu}_{33}/(3)\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/(25)\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$  [22]  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(20)/\text{Ni}_{72}\text{Cu}_{28}(15)/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}(15)$  [A8] и для отдельной пленки  $\text{Ni}_{67}\text{Cu}_{33}$  в диапазоне полей 0 – 30 Э. Зависимость  $\Delta S(T)$  для отдельной пленки  $\text{Ni}_{67}\text{Cu}_{33}$  была найдена путем экстраполяции данных, полученных из работы [34].

Изменение энтропии прослойки  $\text{Ni}_{72}\text{Cu}_{28}$  толщиной 15 нм, которое происходит при смене взаимной ориентации намагниченности ферромагнетиков, в 50 раз превосходит магнитокалорический потенциал отдельной пленки  $\text{Ni}_{68}\text{Cu}_{32}$  при приложении к ней магнитного поля величиной 30 Э. При этом магнитокалорическая эффективность  $\Delta S/\Delta H$  прослойки между слоями  $\text{CoFe}$  и  $\text{CoFeB}$  выросла примерно в 10 раз.

На рис. 6 показаны температурные зависимости магнитокалорического потенциала  $\Delta S$  (а) и эффективности  $\Delta S/\Delta H$  (б) в структурах  $\text{CoSm}(30)/\text{Fe}(1)/\text{Gd}(2.5-5)/\text{Fe}(1)/\text{CoFeB}(2)$ .

Максимальное полученное значение изменения энтропии составило  $2.3 \cdot 10^4$  эрг/см<sup>3</sup>/К для структуры с толщиной  $\text{Gd}$  2.5 нм. При увеличении толщины слоя  $\text{Gd}$  до 5 нм изменение энтропии практически отсутствует, что, вероятно, связано с тем, что корреляционная длина в  $\text{Gd}$  меньше 5 нм. Наибольшее значение магнитокалорической эффективности составляет около 25 эрг/см<sup>3</sup>/К·Э (по данным, полученным на вибромагнитометре), что в 5 раз больше, чем для отдельного слоя  $\text{Gd}$  толщиной 30 нм, полученного при схожих технологических условиях [35].

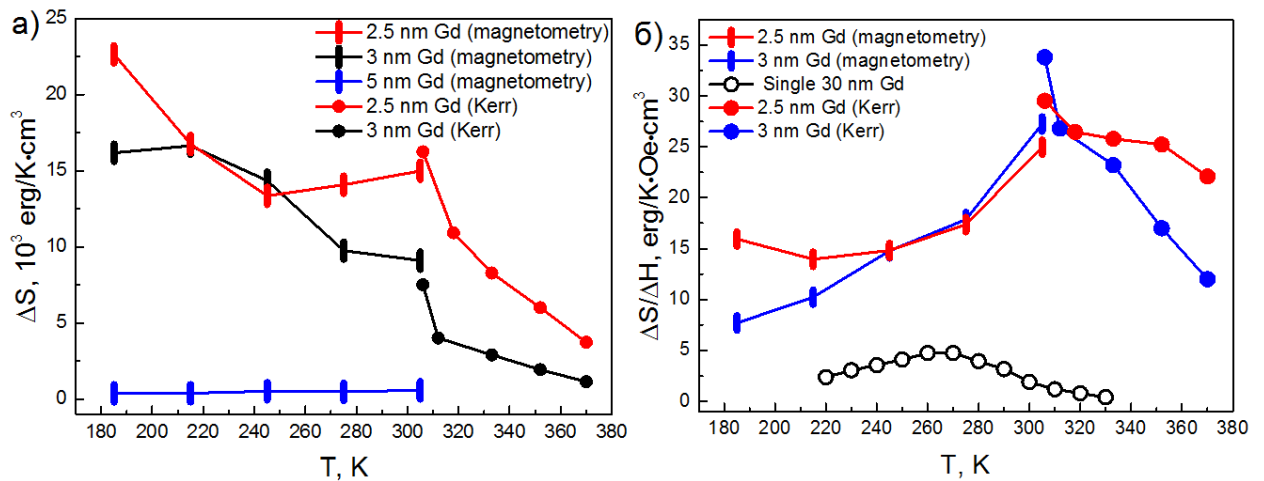


Рис. 4.12. Температурные зависимости  $\Delta S$  (а) и  $\Delta S/\Delta H$  (б) в структурах FM/Gd/FM [A9]. Значения  $\Delta S$  показаны для образцов с толщиной прослойки 5 и 3 и 2.5 нм, тогда как  $\Delta S/\Delta H$  приводится для образцов с прослойкой Gd толщиной 3 и 2.5 нм (A10) и сравнивается с той же величиной в отдельном более толстом (толщиной 30 нм) слое Gd [35].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что теоретически предсказанное в [11, 12] обменное усиление магнитокалорического эффекта в трехслойных системах с прослойкой Gd действительно подтверждается в эксперименте.

В **заключении** отражены основные выводы диссертационного исследования, которые состоят в следующем.

1. Отработана технология изготовления ТМКCoFeB/MgO/CoFeB микронного и субмикронного латерального размера, демонстрирующие ТМР эффект величиной 200 % при комнатной температуре. В зависимости от геометрических параметров ТМК и структуры свободного слоя в нем реализуется квазиоднородное или вихревое распределение намагниченности. Обнаружен эффект, заключающийся в сдвиге по магнитному полю на 6 – 10 Э кривой намагничивания свободного слоя ТМКCoFeB/MgO/CoFeB при приложении к нему электрического напряжения величиной 1 В. Наблюдаемое явление может быть обусловлено изменением межслоевого взаимодействия между ферромагнитными слоями структуры через туннельный барьер, связанным с зависимостью его формы и эффективной толщины от приложенного к нему электрического поля. При приложении к ТМК импульса напряжения величиной 2 В длительностью 100 нс происходит изменение его резистивного состояния на 50 % от амплитуды магнетосопротивления, что соответствует изменению проекции средней намагниченности свободного слоя на ось однонаправленной анизотропии на величину, равную его намагниченности насыщения.

2. Обнаружен новый эффект, заключающийся в квадратичной зависимости поперечной разности потенциалов в NM-электроре, от напряжения, приложенного к туннельному контакту CoFeB/MgO/NM (NM = Ta, Pt). Также в Холловском сигнале присутствуют линейные вклады от аномального и спинового эффектов Холла. Квадратичный вклад в сигнал обусловлен спин-орбитальным рассеянием туннелирующих электронов во внешнем электрическом поле, приложенном к барьеру туннельного контакта. Приложение к туннельному контакту переменного напряжения приводит к возникновению постоянного Холловского сигнала, величина которого квадратично зависит от амплитуды этого напряжения.

3. Экспериментально продемонстрировано усиление магнитокалорического эффекта прослоек «слабых» ферромагнетиков NiCu и Gd, помещенных между «сильными» ферромагнетиками в многослойных наноструктурах типа FM/PM/FM. Магнитокалорический потенциал прослойки Ni<sub>72</sub>Cu<sub>28</sub> в структуре CoFeB(15)/Ni<sub>72</sub>Cu<sub>28</sub>(15)/CoFe(20) составил  $\Delta S \approx 3.3 \cdot 10^3$  эрг/см<sup>3</sup>К, что в 50 раз больше, чем изменение энтропии отдельной пленки Ni<sub>68</sub>Cu<sub>32</sub> при приложении к ней магнитного поля 30 Э. Магнитокалорическая эффективность  $\Delta S/\Delta H$  прослойки Ni<sub>72</sub>Cu<sub>28</sub> при этом выросла в 10 раз. Магнитокалорическая эффективность слоя Gd, помещенного между слоями Fe в структуре CoSm(30)/Fe(1)/Gd(3)/Fe(1)/CoFeB(2) составляет 25 эрг/см<sup>3</sup>К·Э, что в 5 раз больше, чем для отдельного слоя Gd толщиной 30 нм, полученного при схожих технологических условиях. Таким образом, проведенные исследования подтверждают теоретически предсказанное обменное усиление магнитокалорического эффекта.

### Список публикаций по теме диссертационной работы

A1. Пашенькин И. Ю. Туннельные магниторезистивные элементы для датчиков магнитного поля / И. Ю. Пашенькин, М. В. Сапожников, Н. С. Гусев, В. В. Рогов, Д. А. Татарский, А. А. Фраерман // Журнал технической физики. — 2019. — т. 89, вып. 11. — С. 1732–1735.

A2. Пашенькин И. Ю. Магнитоэлектрический эффект в туннельных магниторезистивных контактах CoFeB/MgO/CoFeB / И. Ю. Пашенькин, М. В. Сапожников, Н. С. Гусев, В. В. Рогов, Д. А. Татарский, А. А. Фраерман, М. Н. Волочаев // Письма в ЖЭТФ. — 2020. — т. 111, вып. 12, С. 815.

A3. Fedotov, I. A. Creation of Submicrometer Magneto-resistive Tunnel Junction CoFeB/MgO/CoFeB Using an HSQ/PMMA Resistive Mask [Text] / I. A. Fedotov, I. Yu. Pashen'kin, E. V. Skorokhodov, N. S. Gusev // Phys. Met. Metall. — 2024. — Vol.

125, no. 2. — P. 124–128.

A4. Пашенькин, И.Ю. Вихревые туннельные магнитные контакты с композитным свободным слоем / И.Ю. Пашенькин, Е.В. Скороходов, М.В. Сапожников и др. // Журнал технической физики. — 2023. — т. 93, вып. 11. — С. 1616 – 1621.

A5. Pashen'kin, I. Yu. Magnetization Reversal of Magnetic Tunnel Junctions by Low-Current Pulses [Text] / I. Yu. Pashen'kin, N. S. Gusev, D. A. Tatarskiy, M. V. Sapozhnikov // IEEE Trans. Electron Devices. — 2024. — Vol. 71, no. 4. — P. 2755–2759.

A6. Pashenkin, I. Yu. Extrinsic tunnel Hall effect in MgO-based tunnel junctions [Text] / I. Yu. Pashenkin, M. V. Sapozhnikov, N. S. Gusev, E. A. Karashtin, A. A. Fraerman // Phys. Rev. B. — 2022. — Vol. 106, no. 22. — P. L220408.

A7. Караштин, Е. А. Эффект Холла в туннельных магнитных контактах / Е. А. Караштин, Н. С. Гусев, И. Ю. Пашенькин, М. В. Сапожников, А. А. Фраерман // ЖЭТФ. — 2023. — т. 163, вып. 1. — С. 5–13.

A8. Kuznetsov, M. A. Magnetocaloric effect in exchange-coupled strong/weak/strong ferromagnet stacks / M. A. Kuznetsov, I. Y. Pashenkin, N. I. Polushkin, M. V. Sapozhnikov, A. A. Fraerman // J. Appl. Phys. — 2020. — Vol. 127, no. 18.

A9. Polushkin, N. I. Magnetic and magnetocaloric properties of Py/Gd/CoFe/IrMn stacks / N. I. Polushkin, I. Y. Pashenkin, E. Fadeev, E. Lähderanta, A. A. Fraerman // J. Magn. Magn. Mater. — 2019. — Vol. 491. — P. 165601.

A10. Пашенькин, И. Ю. Увеличение магнитокалорической эффективности прослойки Gd между сильными ферромагнетиками / И.Ю. Пашенькин, Н.И. Полушкин, М.В. Сапожников, Е.С. Демидов, Е.А. Кравцов, А.А. Фраерман // Физика твердого тела. — 2022. — т. 64, вып. 10. — С. 1357 – 1364.

#### **Материалы конференций и тезисы докладов с участием автора**

B1. Н.С. Гусев, В. В. Рогов, И. Ю. Пашенькин, Д.А. Татарский, М. В. Сапожников, А. А. Фраерман / Туннельные магнитные контакты с пиннингом на антиферромагнитном подслое // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанозлектроника и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 10–13 марта 2020 г.) в 2 т. Том 1, 2020, с. 128 -129.

B2. 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 магнитоэлектрических контактах на основе слоев CoFeB/MgO/CoFeB // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанозлектроника и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 10–13 марта 2020 г.) в 2 т. Том 1, 2020, с. 251-252.

В3. М. А. Кузнецов, И. Ю. Пашенькин, Н. И. Полушкин, М. В. Сапожников, А. А. Фраерман / Усиление магнитокалорического эффекта в многослойных структурах парамагнетик/ ферромагнетик // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижеий Новгород, 10–13 марта 2020 г.) в 2 т. Том 1, 2020, с. 219-220.

В4. 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 на основе слоев CoFeB/MgO/CoFeB // Сборник трудов XXIV Международной научной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Москва, 1 – 8 июля 2021 года), 2021, с. 919 - 922.

В5. И.Ю. Пашенькин, М.А. Кузнецов, Н.И. Полушкин, М.В. Сапожников, Е.С. Демидов, Е.А. Кравцов, А.А. Фраерман / Увеличение магнитокалорической эффективности ультратонкой прослойки Gd между сильными ферромагнетиками // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижеий Новгород, 14 – 17 марта 2022 г.) в 2 т. Том 1, 2022, с. 327-328.

В6. И.Ю. Пашенькин, М.В. Сапожников, Е.В. Скороходов, Н.С. Гусев, Д. А. Татарский, А.А. Фраерман / Влияние механизма перемагничивания на магнитоэлектрический эффект в туннельных магниторезистивных контактах CoFeB/MgO // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижеий Новгород, 14 – 17 марта 2022 г.) в 2 т. Том 1, 2022, с. 332-333.

В7. М.В. Сапожников, И.Ю. Пашенькин, Н.С. Гусев, А.А. Фраерман / Эффект Холла в туннельных контактах // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижеий Новгород, 14 – 17 марта 2022 г.) в 2 т. Том 1, 2022, с. 346-347.

В8. E.A. Karashtin, N.S. Gusev, I.Yu. Pashen'kin, M.V. Sapozhnikov, A.A. Fraerman / Tunneling Hall effect: Theory and experiment // Book of abstracts of VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism»: EASTMAG-2022 (Казань). Vol. 1, 2022, P. 22.

В9. Sapozhnikov M. V., Pashen'kin I. Yu., Gusev N. S., Karashtin E. A., Fraerman A. A /Extrinsic tunnel hall effect in MgO-based tunnel junctions // Book of Abstracts of Samarkand International Symposium on Magnetism (2 – 6 July 2023, Samarkand), 2023, P. 143.

В10. И. Ю. Пашенькин, М. В. Сапожников,2, Е. В. Скороходов, Н. С. Гусев, А. А. Фраерман / Вихревые туннельные магниторезистивные контакты CoFeB/MgO/ CoFeB // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижеий Новгород, 13 – 16 марта 2023 г.) в 2 т. Том 1, 2023, с. 271-272.

В11. E.A. Karashtin, N.S. Gusev, I.Yu. Pashen'kin, M.V. Sapozhnikov, A.A. Fraerman / Tunneling Hall effect: Theory and experiment // Book of abstracts of THE 8th

INTERNATIONAL CONFERENCE on SUPERCONDUCTIVITY and MAGNETISM (Ölüdeniz-Fethiye, TÜRKİYE, May 04-11 2023), 2023, P. 83.

B12. I. Pashenkin, N. Polushkin, A. Fraerman, M. Sapozhnikov, E. Kravtsov / Exchange enhancement of the magnetocaloric effect in ferromagnetic nanostructures // Book of abstracts of V International Baltic Conference on Magnetism 2023 (Kaliningrad, Aug 20 – 24 2023), 2023, P. 46.

B13. И. Ю. Пашенькин, Н.И. Полушкин, А.А. Фраерман, М. В. Сапожников, Е.А. Кравцов / Обменное усиление магнитокалорического эффекта в ферромагнитных наноструктурах // Материалы XXVIII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижний Новгород, 11 – 15 марта 2024 г.) в 2 т. Том 1, 2024, с. 332-333.

B14. И. Ю. Пашенькин, Е. В. Скороходов, М. В. Сапожников, А. А. Фраерман, И. А. Федотов, Г. А. Кичин, К. А. Звездин / Статические и динамические свойства вихревых наноконтактов // Материалы XXVIII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижний Новгород, 11 – 15 марта 2024 г.) в 2 т. Том 1, 2024, с. 359-360.

### **Список литературы**

1. Baibich, M. N. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices / M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1988. — Vol. 61, no. 21. — P. 2472–2475.

2. Binasch, G. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn // Phys. Rev. B. — 1989. — Vol. 39, no. 7. — P. 4828–4830(R).

3. Julliere, M. Tunneling between ferromagnetic films / M. Julliere // Phys. Lett. A. — 1975. — Vol. 54, no. 3. — P. 225–226.

4. Yuasa, S. Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline MgO(001) barrier / S. Yuasa, D. D. Djayaprawira // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2007. — Vol. 40, no. 21. — P. R337.

5. Parkin, S. S. P. Systematic variation of the strength and oscillation period of indirect magnetic exchange coupling through the 3d, 4d, and 5d transition metals / S. S. P. Parkin // Phys. Rev. Lett. — 1991. — Vol. 67, no. 25. — P. 3598–3601.

6. Katayama, T. Interlayer exchange coupling in Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions / T. Katayama, S. Yuasa, J. Velez [et al.] // Appl. Phys. Lett. — 2006. — Vol. 89, no. 11.

7. Gallagher, W. J. Development of the magnetic tunnel junction MRAM at IBM: From first junctions to a 16-Mb MRAM demonstrator chip / W. J. Gallagher, S. S. P. Parkin // *IBM J. Res. Dev.* — 2006. — Vol. 50, no. 1. — P. 5–23.
8. Kravets, A. F. Synthetic ferrimagnets with thermomagnetic switching / A. F. Kravets, Yu. I. Dzhezherya, A. I. Tovstolytkin [et al.] // *Phys. Rev. B.* — 2014. — Vol. 90, no. 10. — P. 104427.
9. Vdovichev, S. N. High magnetocaloric efficiency of a NiFe/NiCu/CoFe/MnIr multilayer in a small magnetic field / S. N. Vdovichev, N. I. Polushkin, I. D. Rodionov [et al.] // *Phys. Rev. B.* — 2018. — Vol. 98, no. 1. — P. 014428.
10. Schwenk, D. Ferromagnetic multilayers: Statics and dynamics / D. Schwenk, F. Fishman, F. Schwabl // *Phys. Rev. B.* — 1988. — Vol. 38, no. 16. — P. 11618–11638.
11. Fraerman, A. A. Magnetocaloric effect in ferromagnet/paramagnet multilayer structures / A. A. Fraerman, I. A. Shereshevskii // *JETP Lett.* — 2015. — Vol. 101, no. 9. — P. 618–621.
12. Kuznetsov, M. A. Magnetocaloric Effect in Nanosystems Based on Ferromagnets with Different Curie Temperatures / M. A. Kuznetsov, A. B. Drovosekov, A. A. Fraerman // *J. Exp. Theor. Phys.* — 2021. — Vol. 132, no. 1. — P. 79–93.
13. Johnson, M. T. Magnetic anisotropy in metallic multilayers / M. T. Johnson, P. J. H. Bloemen, F. J. A. den Broeder, J. J. de Vries // *Rep. Prog. Phys.* — 1996. — Vol. 59, no. 11. — P. 1409.
14. Jiang, W. Skyrmions in magnetic multilayers / W. Jiang, G. Chen, K. Liu [et al.] // *Phys. Rep.* — 2017. — Vol. 704. — P. 1–49.
15. Sinova, J. Spin Hall effects / J. Sinova, Sergio O. Valenzuela, J. Wunderlich [et al.] // *Rev. Mod. Phys.* — 2015. — Vol. 87, no. 4. — P. 1213–1260.
16. Freitas, P. P. Spintronic Sensors / P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso // *Proc. IEEE.* — 2016. — Vol. 104, no. 10. — P. 1894–1918.
17. Apalkov, D. Magnetoresistive Random Access Memory / D. Apalkov, B. Dieny, J. M. Slaughter // *Proc. IEEE.* — 2016. — Vol. 104, no. 10. — P. 1796–1830.
18. Dussaux, A. Large microwave generation from current-driven magnetic vortex oscillators in magnetic tunnel junctions / A. Dussaux, B. Georges, J. Grollier [et al.] // *Nat. Commun.* — 2010. — Vol. 1, no. 8. — P. 1–6.
19. Seifert, T. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation / T. Seifert, S. Jaiswal, U. Martens [et al.] // *Nat. Photonics.* — 2016. — Vol. 10. — P. 483 – 488.
20. Huai, Y. Spin-transfer torque MRAM (STT-MRAM): Challenges and prospects / Y. Huai // *AAPPS Bulletin.* — 2008. — Vol. 18. — P. 33.

21. Kazemi, M. All-Spin-Orbit Switching of Perpendicular Magnetization / M. Kazemi, G. E. Rowlands, S. Shi [et al.] // *IEEE Trans. Electron Devices*. — 2016. — Vol. 63, no. 11. — P. 4499–4505.
22. Zehner, J.. Nonvolatile Electric Control of Exchange Bias by a Redox Transformation of the Ferromagnetic Layer / J. Zehner, R. Huhnstock, S. Oswald [et al.] // *Adv. Electron. Mater.* — 2019. — Vol. 5, no. 6. — P. 1900296.
23. Ashida, T. Isothermal electric switching of magnetization in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co thin film system / T. Ashida, M. Oida, N. Shimomura [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 2015. — Vol. 106, no. 13.
24. Barsukov, I. Field-dependent perpendicular magnetic anisotropy in CoFeB thin films / I. Barsukov, Yu Fu, A. M. Gonçalves [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 2014. — Vol. 105, no. 15.
25. Peng, B. Deterministic Switching of Perpendicular Magnetic Anisotropy by Voltage Control of Spin Reorientation Transition in (Co/Pt)<sub>3</sub>/Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> Multiferroic Heterostructures / B. Peng, Z. Zhou, T. Nan [et al.] // *ACS Nano*. — 2017. — Vol. 11, no. 4. — P. 4337–4345.
26. Hasan, M. Z. Colloquium: Topological insulators / M. Z. Hasan, C. L. Kane // *Rev. Mod. Phys.* — 2010. — Vol. 82, no. 4. — P. 3045–3067.
27. Zhao, C.J. Research progress in anisotropic magnetoresistance / C.-J. Zhao, L. Ding, J.-S. HuangFu [et al.] // *Rare Met.* — 2013. — Vol. 32, no. 3. — P. 213–224.
28. Liu, L. Spin Hall effect tunnelling spectroscopy / L. Liu, C.-T. Chen, J. Z. Sun // *Nat. Phys.* — 2014. — Vol. 10. — P. 561–566.
29. Tarasenko, S. A. In-Plane Electric Current Is Induced by Tunneling of Spin-Polarized Carriers / S. A. Tarasenko, V. I. Perel', I. N. Yassievich // *Phys. Rev. Lett.* — 2004. — Vol. 93, no. 5. — P. 056601.
30. Vedyayev, A. Spontaneous Anomalous and Spin Hall Effects Due to Spin-Orbit Scattering of Evanescent Wave Functions in Magnetic Tunnel Junctions / A. Vedyayev, N. Ryzhanova, N. Strelkov, B. Dieny // *Phys. Rev. Lett.* — 2013. — Vol. 110, no. 24. — P. 247204.
31. Vedyayev, A. Influence of spin-orbit interaction within the insulating barrier on the electron transport in magnetic tunnel junctions / A. Vedyayev, N. Ryzhanova, N. Strelkov [et al.] // *Phys. Rev. B*. — 2017. — Vol. 95, no. 6. — P. 064420.
32. Vedyayev, A. V. Anomalous and spin Hall effects in a magnetic tunnel junction with Rashba spin-orbit coupling / A. V. Vedyayev, M. S. Titova, N. V. Ryzhanova [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* — 2013. — Vol. 103, no. 3.
33. Manna, P. K. Two interface effects: Exchange bias and magnetic proximity / P. K. Manna, S. M. Yusuf // *Phys. Rep.* — 2014. — Vol. 535, no. 2. — P. 61–99.



34. Michalski, S. Isothermal entropy changes in nanocomposite Co:Ni<sub>67</sub>Cu<sub>33</sub> [Text] / S. Michalski, R. Skomski, X.-Zh. Li [et al.] // J. Appl. Phys. — 2012. — Vol. 111, no. 7.

35. Miller, C. W. Magnetocaloric effect in nanoscale thin films and heterostructures [Text] / C. W. Miller, D. D. Belyea, B.J. Kirby // J. Vac. Sci. Technol., A. — 2014. — Vol. 32, no. 4.