

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Андрианов Тимофей Андреевич**

**Спиновый транспорт в магнитных многослойных  
наноструктурах сложной конфигурации**

Специальность 01.04.11 — «Физика магнитных явлений»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена на кафедре магнетизма  
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Научный руководитель**      **Ведяев Анатолий Владимирович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор

**Официальные оппоненты**    **Аржников Анатолий Константинович,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий отделом  
теоретической физики Удмуртского  
федерального исследовательского центра  
Уральского отделения РАН

**Журавлёв Михаил Евгеньевич,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры проблем  
конвергенции естественных и  
гуманитарных наук факультета свободных  
наук и искусств СПбГУ

**Панина Лариса Владимировна,**  
доктор физико-математических наук,  
в.н.с., профессор кафедры технологии  
материалов электроники Института  
новых материалов и нанотехнологий  
НИТУ «МИСиС»

Защита состоится «23» мая 2019 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета МГУ.01.18 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

Email: perov@magn.ru, shapaeva@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/182961978/>

Автореферат разослан «1» апреля 2019 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических  
наук

Т.Б. Шапаева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Спинтроника — сравнительно молодая и динамично развивающаяся область науки, которую многие называют будущим классической электроники. Основная идея спинтроники заключается в том, что помимо такой фундаментальной характеристики как заряд электрона учитывается ещё и его спин. Эффект гигантского магнитосопротивления (ГМС), открытый в 1988 году [1; 2], принято считать отправной точкой, с которой началась спинтроника. Полученные результаты были настолько впечатляющими, что смогли восстановить интерес и к туннельному магнитосопротивлению (ТМС), который был открыт даже раньше [3], но в виду того, что не удавалось получить значительного эффекта при комнатных температурах интерес к нему быстро пропал. Следующим важным шагом в развитии спинтроники является открытие эффекта переноса спина [4; 5]. При протекании спин-поляризованного тока через ферромагнетик помимо переноса заряда также происходит и перенос спиновой поляризации. Это, в свою очередь, можно интерпретировать как действие вращательного момента со стороны спин-поляризованных зарядов на намагниченность ферромагнетика, который называют спиновым вращательным моментом. Стоит отметить, что под спином подразумевается момент количества движения, а под вращательным моментом — момент силы. Действие спинового вращательного момента может привести, в том числе, к магнитному переключению ферромагнетика. Данный эффект стал активно использоваться для перемagnetизации ячеек магнитной памяти MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory), так как имеет ряд преимуществ перед перемagnetизацией ячеек MRAM внешним полем. MRAM — это принципиально новый тип оперативной памяти, которая в отличие от своего полупроводникового предшественника является энергонезависимой. Кроме того, в процессе записи-считывания информации потребляет существенно меньше энергии, что является очень важным для устройств, постоянно работающих от аккумуляторов. В последующем, также была установлена возможность генерации напряжения в ферромагнетиках с нестационарной намагниченностью, где важным условием возникновения подобного напряжения является неколлинеарность распределения намагниченности в структуре [6]. И, наконец, активные исследования спинового эффекта Холла (СЭХ) в последние 10 лет открыли дополнительные возможности развития спинтроники [7—11]. В частности, влияние СЭХ можно использовать для увеличения нелокального спинового сигнала, то есть падения напряжения, пропорционального неравновесной спиновой аккумуляции, снимаемого в той части системы, где отсутствует электрический ток, а также спинового вращательного момента [12—14].

Одной из важных задач спинтроники последних десятилетий было получение и детектирование, так называемого, чистого спинового сигнала. Эту задачу удалось решить с помощью изменения геометрии исследуемых многослойных магнитных систем. В частности, путём перехода от квази-одномерных многослойных структур, в которых наблюдаемые величины зависят только от одной координаты, к структурам более сложной конфигурации. Одни из таких структур получили название латеральных [15]. Латеральные спин-вентильные структуры впервые позволили получить спиновый ток отдельно от электрического, то есть чистый спиновый ток. Важность такой конверсии трудно переоценить, ведь в отсутствие переноса заряда также не выделяется джоулевское тепло, что очень критично для наноразмерных спинтронных устройств. Всё это свидетельствует о том, что геометрия играет одну из ключевых ролей в спин-зависящем транспорте.

Для теоретического описания эффекта ГМС в магнитных многослойных наноструктурах используется как квазиклассический (диффузный) подход, основанный на решении кинетического уравнения Больцмана [16], так и баллистический (квантовый), позволяющий выявить квазиклассический предел и учесть квантовые размерные эффекты [17]. Физической основой эффекта ГМС является спин-зависящее рассеяние электронов проводимости в объёме ферромагнитных материалов и на интерфейсах (поверхностях раздела) слоёв. Несмотря на то, что квантовый подход даёт более аккуратный результат и позволяет учесть размерные квантовые эффекты, в исследуемых в настоящей работе структурах, достаточно квазиклассического подхода для описания спинового транспорта и определения его ключевых параметров.

Такие исследования способны дать достаточно полную информацию о спиновом транспорте той или иной системы, а также провести хорошую качественную и количественную оценку наблюдаемых эффектов.

### **Цель работы.**

Теоретическое изучение спинового транспорта в магнитных многослойных наноструктурах сложной конфигурации в рамках квазиклассической спин-диффузионной модели как при наличии, так и в отсутствие спинового эффекта Холла в системе.

**Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:**

1. Аналитическое исследование влияния ширины спинового канала двумерной латеральной спин-вентильной структуры на спиновый транспорт в этой структуре.
2. Проведение как численного, так и аналитического исследования спинового транспорта в латеральной спин-вентильной структуре с учётом наличия в ней спинового эффекта Холла.
3. Численный расчёт спинового вращательного момента, наведённого спиновым эффектом Холла и действующего на

ферромагнитный металл, в двухслойной магнитной структуре парамагнетик/ферромагнетик.

4. Проведение численного анализа уравнений спинового транспорта в спин-вентильной структуре при наличии проводящих наноканалов в разделительном диэлектрическом слое.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Величина нелокального падения напряжения, получаемого в латеральной спин-вентильной структуре зависит не только от длины спин-проводящего канала, но и от его ширины в масштабе длин порядка спин-диффузионной длины  $l_{sf}$ , при этом затухание спинового тока происходит быстрее при параллельной ориентации намагниченностей слоёв спин-вентилья, чем при их антипараллельной ориентации.
2. Холловская разность потенциалов, возникающая за счёт обратного спинового эффекта Холла в спин-проводящем канале латеральной спин-вентильной структуры, зависит от направления намагниченности в ферромагнетике-анализаторе, что позволяет использовать подобную структуру в качестве датчика магнитного поля.
3. Наличие спинового эффекта Холла в парамагнитном слое магнитной двухслойной структуры парамагнетик/ферромагнетик приводит к возникновению наведённого спинового вращательного момента способного изменить направление намагниченности ферромагнетика, в том числе полностью перемагнитить его.
4. Наличие проводящих наноканалов в разделительном диэлектрическом слое спин-вентильной структуры приводит к неоднородности распределения спиновых токов, проявляющейся в возникновении вихревых спиновых токов, и к изменению величины магнитосопротивления в структуре.

**Научная новизна:**

В работе показано, что в магнитных многослойных наноструктурах с особой геометрией появляются уникальные свойства, имеющие как фундаментальную, так и практическую ценность.

Впервые проведён анализ спинового транспорта в двумерной латеральной спин-вентильной структуре в рамках квазиклассической спин-диффузионной модели. Выявлено влияние ширины спин-проводящего канала на величину нелокального падения напряжения, снимаемого вдоль ферромагнитного слоя анализатора. Установлено, что при антипараллельной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоёв спин-вентилья затухание спинового тока происходит медленнее, чем при их параллельной ориентации, что приводит к большей величине выходного нелокального сигнала.

Впервые проведён аналитический и численный анализ спинового транспорта в латеральной спин-вентильной структуре при наличии

спинового эффекта Холла (СЭХ) в спин-проводящем канале в рамках расширенной квазиклассической спин-диффузионной модели, позволяющей учесть СЭХ. Было установлено, что наличие СЭХ в спин-проводящем канале приводит к возникновению поперечной холловской разности потенциалов, зависящей от направления намагниченности ферромагнитного электрода-анализатора. Показана хорошая согласованность численных и аналитических результатов, на основе которых сделан вывод, что получаемая модуляция выходного сигнала может служить фундаментом для создания нового магнитного сенсора. На основе полученных данных была предложена структура, обладающая схожими свойствами, которую впоследствии можно реально изготовить и использовать в качестве чувствительной части головок чтения и записи жёстких дисков компьютеров.

В рамках расширенной квазиклассической спин-диффузионной модели, позволяющей учесть СЭХ, впервые численно показано, что при прохождении электрического тока через двухслойную магнитную структуру парамагнетик/ ферромагнетик, в которой парамагнетик обладает СЭХ, появляется спиновый вращательный момент, наведённый СЭХ. Величины спинового вращательного момента достаточно для того, чтобы изменить направление намагниченности ферромагнетика и даже полностью перемагнитить его. Полученные данные согласуются с экспериментальными.

Впервые выполнено сравнение численных исследований спинового транспорта в рамках квазиклассических спин-диффузионных моделей Вайнтала и Леви-Ферта. Было установлено, что обе модели дают одинаковое значение эффекта ГМС в структуре, однако модель Вайнтала даёт более точное описание угловой зависимости эффекта ГМС. Установлено, что наличие проводящих наноканалов в виде тонких спин-вентилей в магнитной многослойной наноструктуре приводит к неоднородным распределениям спиновых токов в системе. В частности, возможно появление вихревых спиновых токов. Была выявлена геометрия, при которой наблюдается значительное увеличение эффекта ГМС.

### **Достоверность**

Достоверность полученных результатов обеспечивается согласованностью численных и аналитических расчётов, а также экспериментальных результатов. Численное моделирование проводилось с помощью метода конечных элементов, реализованного на базе лицензионного пакета программ Comsol Multiphysics 3.5a ®. Результаты исследований опубликованы в индексируемых журналах и апробированы на специализированных международных конференциях.

### **Практическая значимость**

По результатам исследований был предложен новый тип датчика магнитного поля. Были описаны основные характеристики, которыми он должен обладать, а также его принципиальная схема пригодная для

изготовления. Было обсуждено какие дополнительные исследования необходимо сделать, чтобы подтвердить эффективность подобного датчика.

С помощью численных расчётов показана возможность управления магнитной конфигурацией двухслойной структуры за счёт возникающего спинового вращательного момента при прохождении электрического тока, если в парамагнитной части двухслойной структуры присутствует СЭХ. Полученные результаты подтверждают представленные ранее экспериментальные данные.

Результаты проведённых исследований имеют также и фундаментальный интерес. В частности, результат сравнения и анализа численного исследования спинового транспорта в спин-вентильных структурах с проводящими наноканалами показал, что модели Леви-Ферта и Вайнталя дают одинаковую величину эффекта ГМС, однако по-разному описывают его угловую зависимость. Наличие нескольких проводящих наноканалов в виде спин-вентильных контактов малого диаметра в магнитной многослойной наноструктуре приводит к существенному увеличению ГМС относительно структуры, в которой используется один спин-вентильный контакт эквивалентного суммарного диаметра.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались в виде стендовых докладов на следующих международных российских конференциях: Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2014), Moscow, Russia; XXII Международный симпозиум «Нанозифика и наноэлектроника», Нижний Новгород, Россия, 2017; Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2017), Moscow, Russia.

#### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в международных журналах, рецензируемых по базе данных Scopus, 2 из которых также индексируются в Web of Science. Помимо этого, также были опубликованы 4 тезисов докладов в сборниках конференций. Список публикаций приведён в конце автореферата.

#### **Личный вклад.**

Все представленные в диссертации результаты были получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Постановка цели исследования и формулировка задач были проведены автором совместно с научным руководителем. Все аналитические и численные расчёты были проведены автором лично. Разработка и обсуждение датчика магнитного поля, предложенного в одной из работ, проведено автором работы совместно с соавторами публикаций. 4 статьи написаны, в основном, автором работы с учётом дополнений и правок соавторов публикаций.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость, представлена степень апробации работы, указан личный вклад автора, обозначены объём и структура диссертации.

**В первой главе** проведён обзор литературы, посвящённой теоретическим и экспериментальным исследованиям по теме диссертационной работы.

Параграф 1.1 посвящён эффектам гигантского магнитосопротивления (ГМС) и переноса спинового вращательного момента, подходам к их теоретическому описанию, включая угловую зависимость. В частности, подробно изложен квазиклассический подход к описанию ГМС в геометрии «ток перпендикулярен плоскости», описана концепция переноса спинового вращательного момента и подходы к изучению неколлинеарного спинового транспорта.

Параграф 1.2 посвящён экспериментальному измерению спиновой аккумуляции и получению чистого спинового тока. В частности, подробно описан нелокальный способ измерения спиновых сигналов с помощью латеральных спин-вентильных структур.

В параграфе 1.3 дан обзор экспериментальных и теоретических работ, посвящённых исследованию спинового эффекта Холла. Были подробно рассмотрены экспериментальные работы, которые привели к открытию эффекта, а затем изложены основные механизмы, приводящие к возникновению эффекта. В конце параграфа приведены описания работ по исследованию спинового эффекта Холла с помощью латеральных спин-вентильных структур.

**Во второй главе** приведены результаты аналитического исследования зависимости спинового транспорта в двумерной латеральной спин-вентильной структуре (Рис. 1) от ширины спинового канала в рамках квазиклассической спин-диффузионной модели спинового транспорта:

$$\vec{J}_e = -\sigma \vec{\nabla} \varphi - \beta \frac{\sigma}{e\nu} (\vec{M}, \text{grad } \vec{m}), \quad (1)$$

$$J_{ij}^m = -\sigma \beta (\nabla_i \varphi, M_j) - \frac{\sigma}{e\nu} \nabla_{ji} m_j, \quad (2)$$

$$\text{div } \vec{J}_e = 0, \quad (3)$$

$$\text{div } \vec{J}_m = -\frac{\sigma}{e\nu l_{sf}^2} \vec{m} - \frac{\sigma}{e\nu l_J^2} (\vec{m} \times \vec{M}), \quad (4)$$

где  $\sigma$  – проводимость слоя,  $\varphi$  – потенциал,  $\nu$  – плотность состояний электрона на уровне Ферми,  $\vec{M}$  – единичный вектор намагниченности слоя,  $\vec{m}$  – вектор спиновой аккумуляции,  $\beta$  – параметр спиновой асимметрии проводимости,  $e$  – заряд электрона,  $l_{sf}$  – спин-диффузионная длина,  $l_J$  – длина прецессии. Первый член уравнения (1) описывает вклад в общий ток электрического поля, второй член описывает вклад в ток за счёт диффузии. Спиновый ток представляет собой тензор  $3 \times 3$  (2), где первый член описывает вклад, благодаря асимметрии проводимости каналов со спином «вверх» и спином «вниз» в ФМ металле, а второй член описывает диффузию спинового тока пропорциональную градиенту спиновой аккумуляции. Уравнение (3) отражает закон сохранения заряда, в то время как пространственная эволюция спинового тока (4) определяется процессами спиновой релаксации и эффектом спинового торка (появлением спинового вращательного момента). В ранее опубликованных экспериментальных работах [18–20] использовалась такая геометрия латеральной спин-вентильной структуры, при которой все экспериментальные результаты можно было интерпретировать в рамках одномерной спин-диффузионной модели. Геометрия латеральной структуры, исследуемая в данной главе, также позволяет осуществлять эффективную конверсию между зарядовыми и спиновыми токами, однако приводит к тому, что получаемые результаты можно интерпретировать только в рамках двумерной модели спин-диффузионного транспорта.

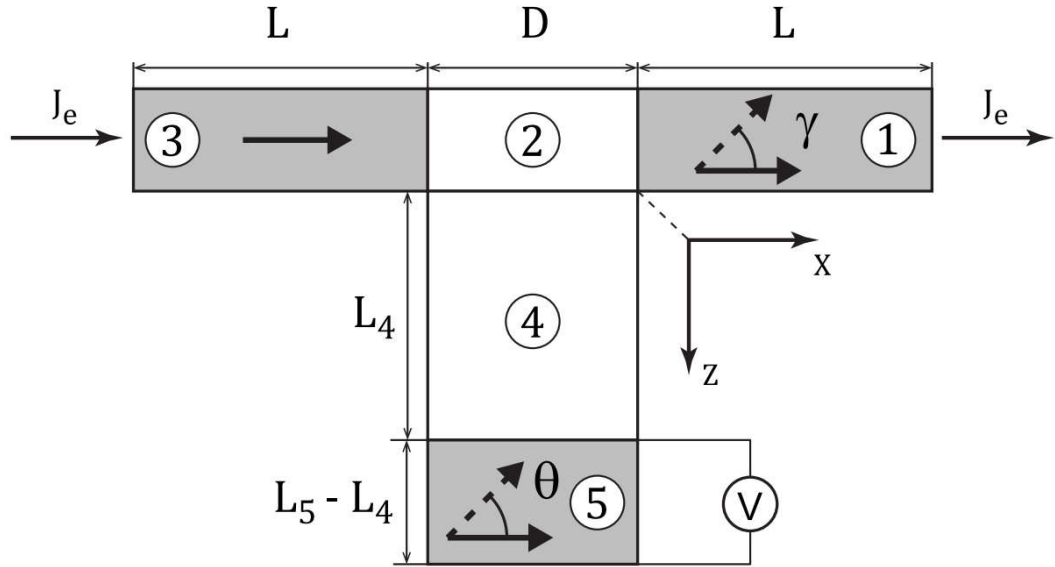


Рис. 1 — Схема латеральной спин-вентильной структуры, исследуемой в главе 2. 1, 3 и 5 – ферромагнитные слои. 2 и 4 – парамагнитные слои. Намагниченность слоя 1 может быть сонаправлена с осью  $x$  ( $\gamma = 0$ ) или противоположнонаправлена ей ( $\gamma = \pi$ ). Электрический ток течёт вдоль оси  $x$ . Выходное нелокальное напряжение измеряется вдоль границы слоя 5.

В результате аналитического решения уравнений (1-4) получены зависимости наведённого падения напряжения и распределения спиновой аккумуляции от ширины спинового канала латеральной структуры, а также от ключевых параметров, влияющих на спиновый транспорт (подробное изложение аналитического расчёта представлено в приложении А):

$$\tilde{m}_2^n = \frac{2}{D} \int_{-D}^0 m_2(x) \cos \frac{\pi n}{D} dx, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varphi_5 = \sum_n \frac{\tilde{m}_2^n}{\mathfrak{D}} & \left[ \frac{\cosh \frac{\pi n}{D} (L_5 - z)}{\sinh \frac{\pi n}{D} (L_5 - L_4)} \frac{\sigma_4^2 k_4 \beta_5}{\nu_4 \nu_5 \sigma_5} \cosh \frac{\pi n}{D} L_4 - \right. \\ & - \frac{\cosh k_5 (L_5 - z)}{\cosh k_5 (L_5 - L_4)} \frac{\sigma_4 k_4 \beta_5}{\nu_4 \nu_5} \left( \sinh \frac{\pi n}{D} L_4 + \frac{\sigma_4}{\sigma_5} \times \right. \\ & \left. \left. \times \coth \frac{\pi n}{D} (L_5 - L_4) \cosh \frac{\pi n}{D} L_4 \right) \right] \cos \frac{\pi n}{D} x, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{D} = \cosh \frac{\pi n}{D} L_4 & \left[ \frac{\beta_5^2 \sigma_4}{\nu_5} \frac{\pi n}{D} \sinh k_4 L_4 + \frac{\sigma_4^2 k_4}{\sigma_5 \nu_4} \times \right. \\ & \times \cosh k_4 L_4 \coth \frac{\pi n}{D} (L_5 - L_4) + \frac{1 - \beta_5^2}{\nu_5} \times \\ & \times k_5 \sigma_4 \sinh k_4 L_4 \coth \frac{\pi n}{D} (L_5 - L_4) \times \\ & \left. \times \tanh k_5 (L_5 - L_4) \right] + \sinh \frac{\pi n}{D} L_4 \left[ \frac{1 - \beta_5^2}{\nu_5} \times \right. \\ & \left. \times k_5 \sigma_5 \sinh k_4 L_4 \tanh k_5 (L_5 - L_4) + \frac{\sigma_4 k_4}{\nu_4} \cosh k_4 L_4 \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где  $m_2(x)$  – профиль спиновой аккумуляции в слое 2. В выражениях (6-7) все члены зависят от взаимной ориентации намагниченностей в ферромагнитных электродах 1 и 3: если знак всех  $\beta_i$  одинаковый, то намагниченности всех электродов параллельны. Если знак одного  $\beta_i$  отличается от двух других, то значит намагниченность в этом слое антипараллельна двум другим. Нижние индексы указывают на слой структуры, согласно Рис.1.

Показано, что в подобной геометрии нелокальный выходной сигнал зависит не только от длины спин-проводящего канала, но также и от его ширины (Рис. 2) в масштабе длин порядка спин-диффузионной длины  $l_{sf}$ . Установлено, что результатом подобного двумерного характера зависимости является то, что затухание спинового тока, по мере его распространения вдоль канала, происходит быстрее в случае параллельного

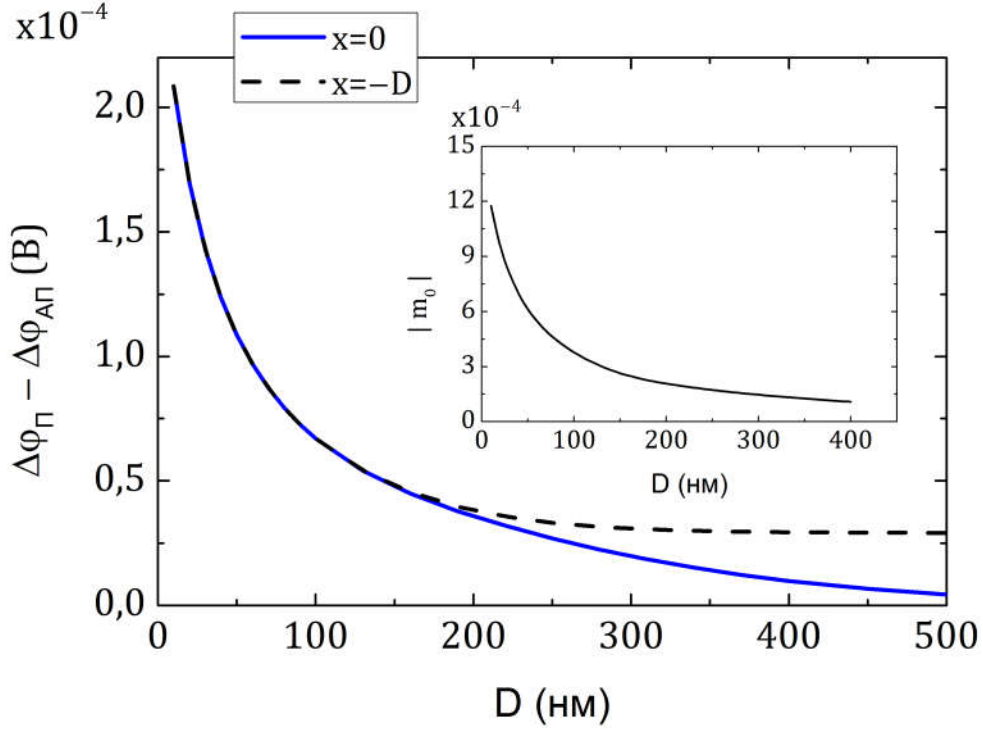


Рис. 2 — Зависимость амплитуды сигнала  $\Delta\varphi_{\text{П}} - \Delta\varphi_{\text{АП}}$  на разных краях спинового канала ( $x = 0$  и  $x = -D$ ) от ширины спинового канала  $D$ ,  $l_{sf}^{2,4} = 100$  нм. На дополнительной вставке показана зависимость  $m_2^0$  от ширины  $D$ .

направления намагниченностей слоёв спин-вентилья, чем при их антипараллельном направлении.

**Третья глава** посвящена аналитическому и численному исследованию спинового транспорта в трёхмерной латеральной спин-вентильной структуре в рамках квазиклассической спин-диффузионной модели спинового транспорта, с учётом наличия в системе спинового эффекта Холла:

$$\vec{J}_e = -\sigma \vec{\nabla} \varphi - \beta \frac{\sigma}{e\nu} (\vec{M}, \text{grad } \vec{m}) - \frac{\sigma_{SH}}{e\nu} (\vec{\nabla} \times \vec{m}), \quad (8)$$

$$J_{ij}^m = -\sigma \beta (\nabla_i \varphi, M_j) - \frac{\sigma}{e\nu} \nabla_{ji} m_j - \sigma_{SH} \varepsilon_{ijk} \nabla_k \varphi, \quad (9)$$

$$\text{div } \vec{J}_e = 0, \quad (10)$$

$$\text{div } \vec{J}_m = -\frac{\sigma}{e\nu l_{sf}^2} \vec{m} - \frac{\sigma}{e\nu l_J^2} (\vec{m} \times \vec{M}), \quad (11)$$

где  $\sigma_{SH}$  — проводимость СЭХ,  $\varepsilon_{ijk}$  — асимметричный тензор Леви-Чивиты. Принципиальная схема латеральной спин-вентильной структуры идентична той, что исследуется в главе 2, однако здесь в спин-проводящем канале имеется отличная от нуля проводимость СЭХ (Рис. 3).

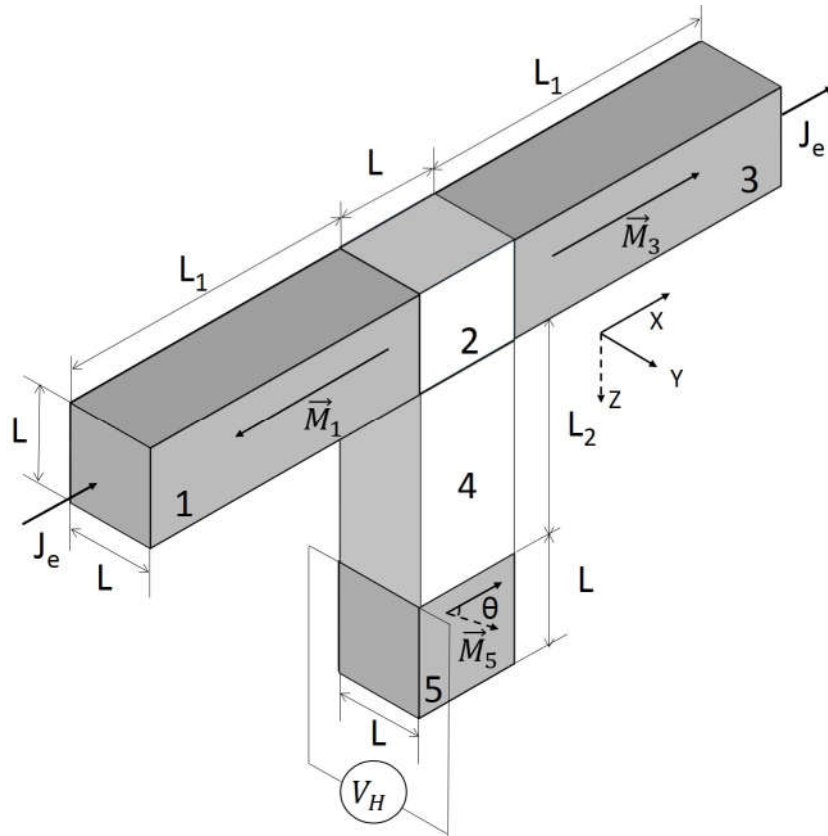


Рис. 3 — Модель исследуемой латеральной спин-вентильной структуры.  $L = 100$  нм,  $L_1 = 400$  нм,  $L_2 = 200$  нм. 1, 3 — ферромагнитные электроды с антипараллельной конфигурацией намагниченностей. 2 — парамагнитный слой спин-вентилья 1-3. 4 — парамагнитный спин-проводящий канал, имеющий спин-орбитальное рассеивание в  $z$  направлении. 5 — магнитномягкий электрод с незакреплённой намагниченностью.  $\theta$  — угол между намагниченностями в слоях 3 и 5.  $J_e$  — электрический ток вдоль оси  $x$ .  $V_H$  — холловское напряжение, вызванное ОСЭХ, измеряемое вдоль оси  $y$ .

Благодаря обратному спиновому эффекту Холла, на краях спин-проводящего канала возникает холловская разность потенциалов. Величина этой разности потенциалов непосредственно зависит от направления намагниченности в ферромагнетике-анализаторе. Таким образом, за счёт изменения направления намагниченности в ферромагнетике-анализаторе происходит модуляция выходного сигнала (Рис. 4).

Этот эффект предлагается использовать в качестве основы для датчика магнитного поля. Зависимость падения напряжения, вызванного обратным спиновым эффектом Холла, была рассчитана как аналитически (подробное изложение аналитического расчёта в двух разных геометриях представлено в Приложении Б), так и численно. В результате аналитического расчёта было установлено, что в геометрии, когда намагниченности спин-вентилья латеральной структуры противоположно направлены перпендикулярно направлению распространения спинового тока холловская разность потенциалов изменяется как:

$$\Delta\varphi = C_0 - C_1 \cos 2\theta, \quad (12)$$

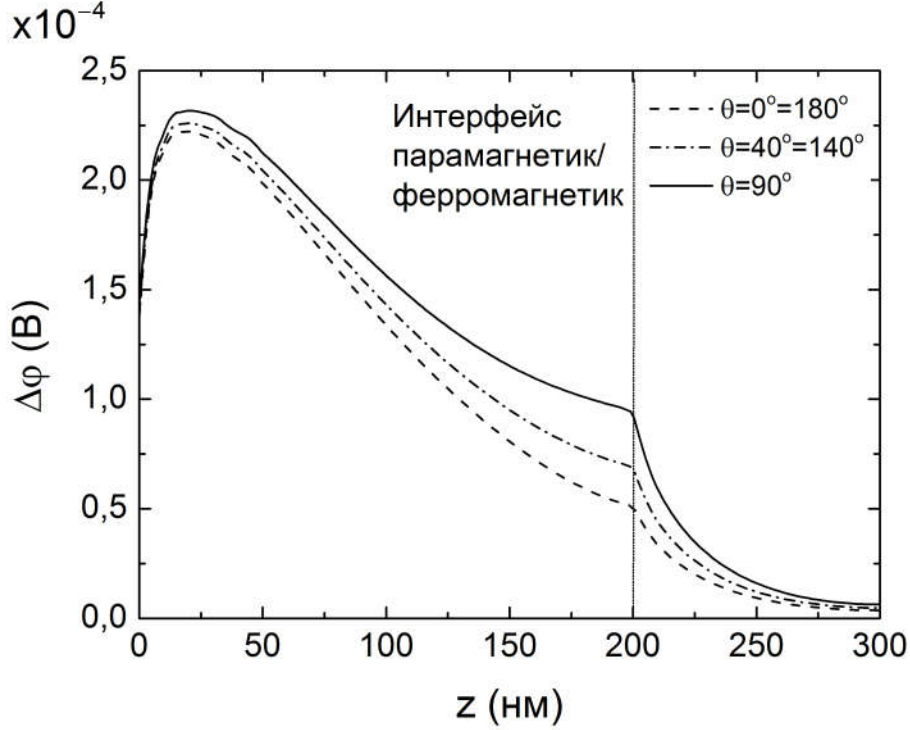


Рис. 4 — Численный расчёт зависимости напряжения, возникающего за счёт ОСЭХ в направлении оси  $y$ , от координаты  $z$  для различных углов поворота намагниченности ферромагнетика-анализатора 5. Намагниченности электродов спин-вентили 1 и 3 имеют антипараллельную конфигурацию вдоль оси  $x$ . Вертикальная линия при  $z = 200$  нм является линией интерфейса спин-проводящего канала и ферромагнетика-анализатора.

Когда намагниченности спин-вентили латеральной структуры противоположно направлены вдоль направления распространения спинового тока, то холловская разность потенциалов изменяется как:

$$\Delta\varphi = C_2 \sin 2\theta, \quad (13)$$

Полученные аналитические данные полностью удовлетворяют результатам, полученным численно (Рис. 5, 6).

В заключение, был проведён численный расчёт в латеральной структуре более сложной геометрии, но более удобной для изготовления. Расчёты показали наличие описанного выше эффекта, что делает её перспективной для использования в качестве чувствительной части головок чтения/записи магнитных жёстких дисков. Также приведено обсуждение дополнительных исследований необходимых для того, чтобы подтвердить возможность использования такой структуры в качестве подобного датчика.

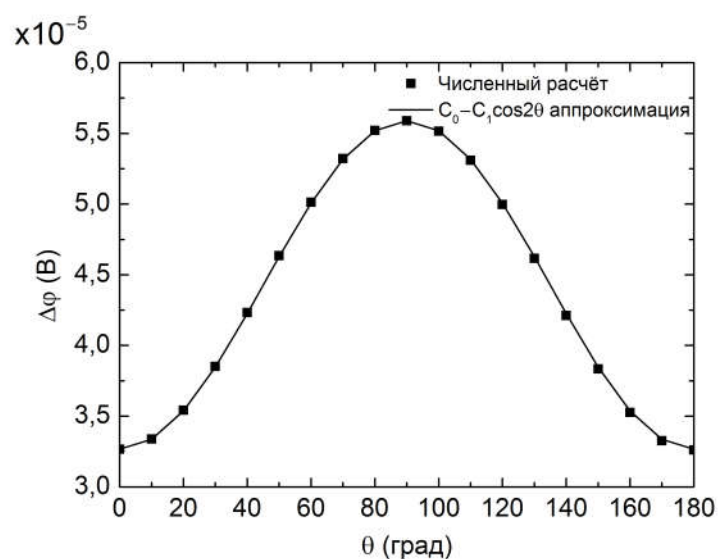


Рис. 5 — Численный расчёт напряжения, возникшего за счёт ОСЭХ, в направлении оси  $y$  на интерфейсе спин-проводящего канала и ферромагнетика-анализатора 5 в зависимости от угла поворота намагниченности в ферромагнетике-анализаторе 5 относительно намагниченностей электродов спин-клапана 1 и 3 при антипараллельной конфигурации намагниченностей электродов спин-клапана 1 и 3 вдоль оси  $x$ . Сплошная линия отражает предсказанный аналитически закон изменения напряжения в виде  $\cos 2\theta$ .

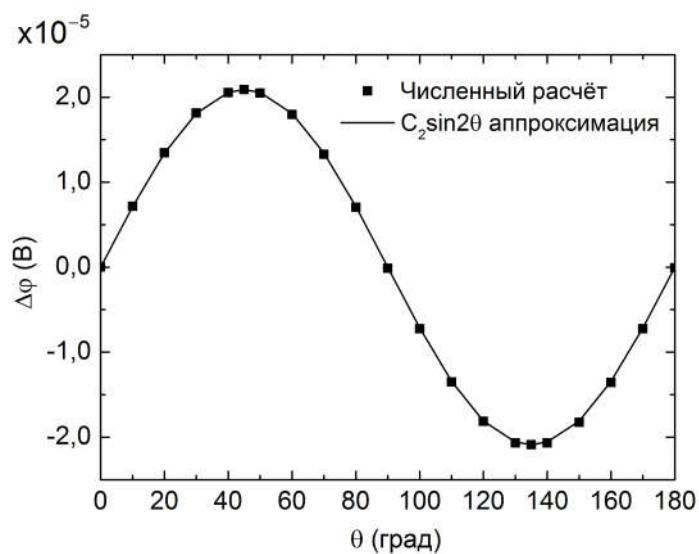


Рис. 6 — Численный расчёт напряжения, возникшего за счёт ОСЭХ, в направлении оси  $y$  на интерфейсе спин-проводящего канала и ферромагнетика-анализатора 5 в зависимости от угла поворота намагниченности в ферромагнетике-анализаторе 5 относительно намагниченностей электродов спин-клапана 1 и 3 при антипараллельной конфигурации намагниченностей электродов спин-клапана 1 и 3 вдоль оси  $z$ . Сплошная линия отражает предсказанный аналитически закон изменения напряжения в виде  $\sin 2\theta$ .

**Четвёртая глава** посвящена численному исследованию возможности перемагничивания ферромагнитного слоя двухслойной наноструктуры парамагнетик/ферромагнетик (Рис. 7), где парамагнетик обладает спиновым эффектом Холла в рамках квазиклассической спин-диффузионной модели спинового транспорта с учётом наличия в системе спинового эффекта Холла (8-11).

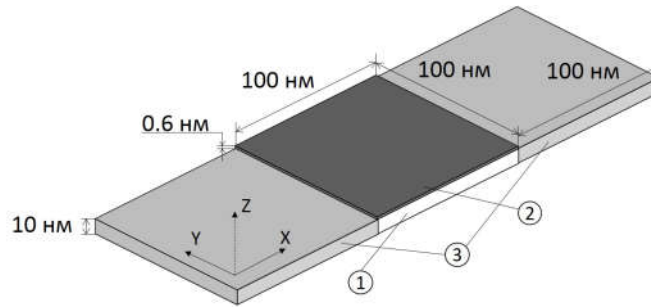


Рис. 7 — Теоретическая модель исследуемой структуры. 1 – слой CuPt с наличием СЭХ; 2 – ферромагнитная пластина из Fe; 3 – электроды из Cu. Электрический ток  $J_e$  направлен вдоль оси  $x$ .

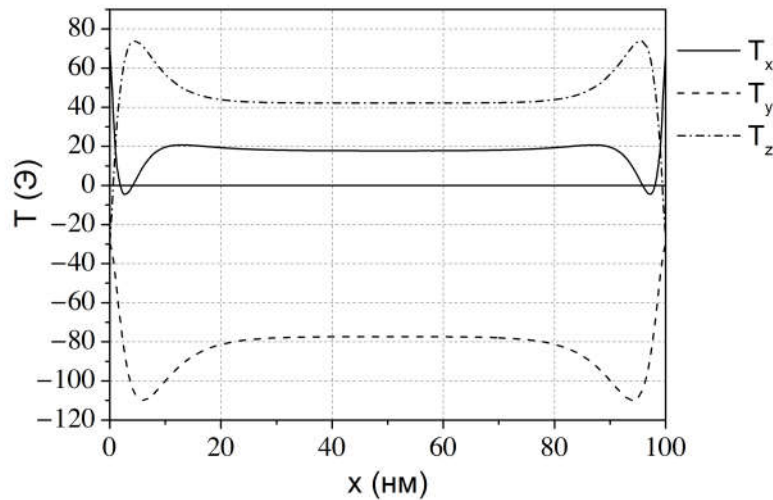


Рис. 8 — Численный расчёт зависимости компонент спинового вращающего момента, возникающего благодаря СЭХ от координаты  $x$  вдоль парамагнитного слоя бислоя возле интерфейса.

В подобной системе спиновый ток возникает как за счёт спиновой поляризации, вызванной ферромагнитным слоем двухслойной структуры, так и за счёт спинового эффекта Холла, которым обладает парамагнитный слой. Результирующий спиновый ток приводит к появлению спинового вращающего момента, достаточного для изменения направления намагниченности ферромагнитного слоя двухслойной структуры, в том числе, и

для его перемагничивания. Численно исследованы зависимости эффективного магнитного поля, наведённого спиновым эффектом Холла, от угла поворота намагниченности ферромагнитного слоя двухслойной структуры в различных плоскостях. Также были рассчитаны и построены компоненты спинового вращательного момента в зависимости от координаты (Рис. 8).

Полученные значения позволяют сделать вывод о том, что управление намагниченностью ферромагнитного слоя исследуемой двухслойной структуры осуществляется именно за счёт наличия спинового эффекта Холла в парамагнитном слое и создаваемого им вращательного момента, а не просто за счёт магнитного поля, создаваемого током, проходящим через двухслойную наноструктуру, что подтверждает полученные экспериментальные данные [12—14; 21].

**В пятой главе** проведено численное исследование спинового транспорта в спин-вентильной структуре, имеющей проводящие наноканалы в диэлектрическом слое в рамках двух квазиклассических диффузионных моделей спинового транспорта Леви-Ферта и Вайнтала. Исследование проводилось в структуре, представляющей собой два парамагнитных электрода толщиной 100 нм каждый, которые соединены между собой спин-вентильными, состоящими из двух ферромагнитных слоёв, разделённых парамагнетиком. То есть в данной структуре роль проводящих наноканалов играет набор тонких спин-вентильных контактов одинакового размера диаметром порядка нескольких нанометров (Рис. 9).

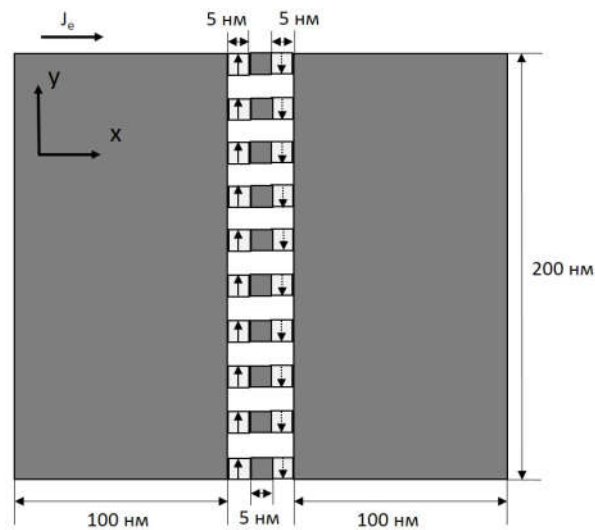


Рис. 9 — Модель исследуемой структуры с проводящими наноканалами в виде тонких спин-вентильных контактов. При расчёте в 2D модели все величины рассчитываются на 1 нм глубины.

Установлено, что наличие нескольких идентичных спин-вентильных контактов маленького диаметра приводят к существенному увеличению эффекта ГМС, по сравнению с величиной эффекта в структуре, где

присутствует один спин-вентильный контакт эквивалентного суммарного диаметра (Рис. 10).

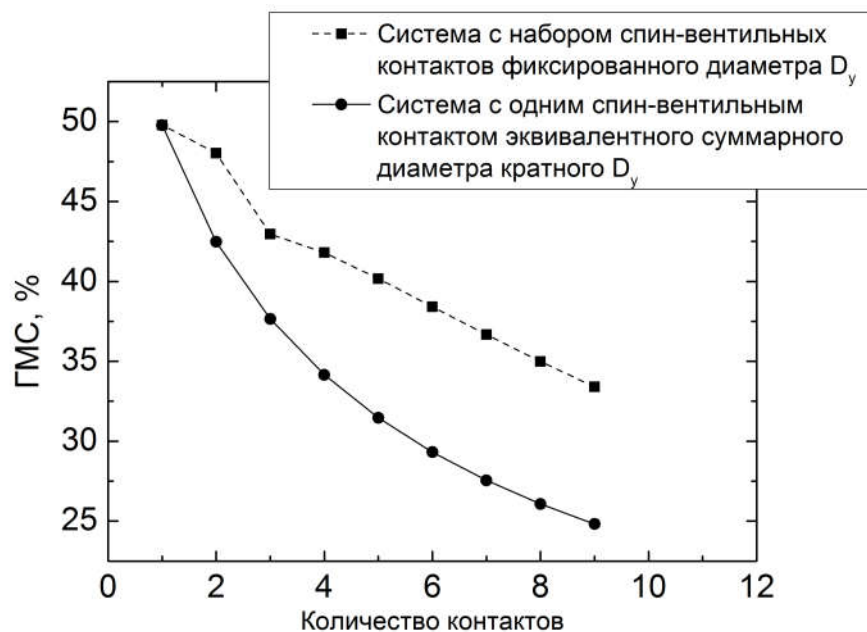


Рис. 10 — Сравнение зависимостей эффекта ГМС от количества спин-вентильных контактов фиксированного диаметра ( $D_y = 5$  нм) и от одного спин-вентильного контакта эквивалентного суммарного диаметра кратного  $D_y$ .

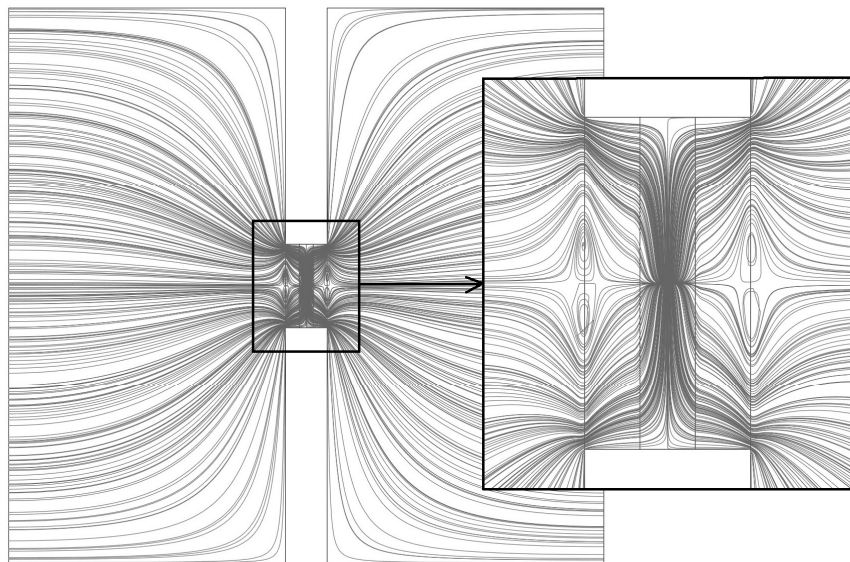


Рис. 11 — Линии спинового тока в структуре с проводящим спин-вентильным контактом диаметра  $D_y = 30$  нм.

Обнаружено, что подобная геометрия приводит к неоднородностям в распределении спиновых токов, а также может привести к возникновению вихревых спиновых токов (Рис. 11). Результат сравнения численных расчётов в рамках моделей спин-диффузионного транспорта Леви-Ферта и Вайнталя показал, что обе модели дают одинаковое значение эффекта ГМС в исследуемых структурах, однако, при исследовании угловой зависимости эффекта ГМС модель Вайнталя даёт результат наиболее близкий к экспериментальным данным, так как более детально учитывает параметры, имеющие непосредственное влияние на угловую зависимость ГМС.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Показано, что ширина спин-проводящего канала в масштабе длин порядка спин-диффузионной длины  $l_{sf}$  влияет на величину нелокального падения напряжения, снимаемого вдоль анализатора латеральной спин-вентильной структуры. Установлено, что при достаточно малых ширинах спин-проводящего канала и антипараллельной конфигурации намагниченностей в ферромагнитных слоях спин-вентильная спиновая аккумуляция принимает достаточно большое значение и не меняется вдоль ширины спин-проводящего канала. При достаточно больших ширинах спин-проводящего канала величина спиновой аккумуляции и нелокального напряжения уменьшается и заметно меняется в поперечном сечении для обеих конфигураций намагниченностей.
2. Установлено, что величина холловского напряжения в спин-проводящем канале латеральной спин-вентильной структуры, в котором присутствует спиновый эффект Холла, зависит от угла  $\theta$  между намагниченностью анализатора и ферромагнитного электрода спин-вентильной структуры. Обнаружено как численно, так и аналитически, что эта зависимость имеет вид  $\sin 2\theta$  или  $\cos 2\theta$  при ориентации намагниченностей электродов спин-вентильной структуры параллельно или перпендикулярно направлению распространения спинового тока соответственно. Показано, что данный эффект имеет место и в латеральных структурах более сложной геометрии, но удобных для изготовления, что делает их перспективными для использования в качестве датчиков магнитного поля.
3. Показано, что при прохождении электрического тока в двухслойной структуре парамагнетик/ферромагнетик, в которой парамагнетик обладает спиновым эффектом Холла, в ферромагнитном слое возникает достаточно большой вращательный момент, наведённый спиновым эффектом Холла, который способен изменить направление намагниченности ферромагнетика, в том числе привести к его полному перемагничиванию. Результаты численных расчётов подтверждают полученные ранее экспериментальные данные.

4. Выявлено, что наличие проводящих наноканалов в виде спин-вентильных контактов малого диаметра приводит к неоднородности распределения спинового тока в спин-вентильной структуре, а также может приводить к возникновению вихревых спиновых токов. Показано, что структура с большим количеством контактов малого диаметра приводит к значительному увеличению магнитосопротивления по сравнению со структурой с одним контактом эквивалентного суммарного диаметра. Результаты расчётов угловой зависимости эффекта ГМС в рамках модели Вайнталья показали лучшую согласованность с экспериментальными данными.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи**

- A1. Nonlocal Signal and Noise in T-shaped Lateral Spin-Valve Structures / A. Vedyayev, N. Ryzhanova, N. Strelkov, T. Andrianov, A. Lobachev, and B. Dieny. // Phys. Rev. Applied – 2018. – Vol. 10. – P. 064047.
- A2. Magnetic modulation of inverse spin Hall effect in lateral spin-valves / T.Andrianov, A.Vedyayev, B.Dieny. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2018. – Vol. 51. – P. 205003.
- A3. Numerical Simulation of Spin Torque Induced by Spin Hall Effect in CuPt/Fe Heterostructure / T.Andrianov, Y.Gritsenko, N.Strelkov, N.Ryzhanova, A.Vedyayev. // Solid State Phenomena. – 2014. – Vols. 233-234. – P. 407-410.
- A4. Numerical simulation of spin transport in systems with complex geometry / T.Andrianov, A.Vedyayev // EPJ Web of Conferences. – 2018. – Vol. 185. – P. 01021.

### **Тезисы докладов**

- T1. Non-local Signal and Noise in Lateral Spin-Valve Structures / Vedyayev A., Ryzhanova N., Strelkov N., Andrianov T., Lobachev A., Dieny B. // Book of Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2017). – 2017. – P. 132.
- T2. Спиновый транспорт в латеральной спин-вентильной наноструктуре с учетом спинового эффекта Холла / Андрианов Т.А., Ведяев А.В. // Материалы XX Международного симпозиума нанофизика и нанoeлектроника (Нижний Новгород). – 2016. – P. 151-152.
- T3. Numerical Simulation of Spin Hall Effect in CuPt/Fe Heterostructure / Andrianov T., Gritsenko Y., Strelkov N., Ryzhanova N., Vedyayev A. // Book of Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2014). – 2014. – P. 243.

- T4. Numerical Simulation of Spin Transport in Systems with Complex Geometry / Andrianov T., Vedyayev A. // Book of Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2017). — 2017. — P. 164.

## Список литературы

1. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices / M. N. Baibich [et al.] // Physical Review Letters. — 1988. — Vol. 61, no. 21. — P. 2472—2475.
2. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch [et al.] // Physical Review B. — 1989. — Vol. 39, no. 7. — P. 4828—4830.
3. *Julliere, M.* Tunneling between two ferromagnetic films / M. Julliere // Physics Letters A. — 1975. — Vol. 54, no. 3. — P. 225—226.
4. *Slonczewski, J.* Current-driven excitation of magnetic multilayers / J. Slonczewski // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 1996. — Vol. 159, no. 1/2. — P. L1—L7.
5. *Slonczewski, J.* Currents and torques in metallic magnetic multilayers / J. Slonczewski // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2002. — Vol. 247, no. 3. — P. 324—338.
6. *Tserkovnyak, Y.* Electron transport driven by nonequilibrium magnetic textures / Y. Tserkovnyak, M. Mecklenburg // Phys. Rev. B. — 2008. — Vol. 77. — P. 134407.
7. *Дьяконов, М. И.* О возможности ориентации электронных спинов током / М. И. Дьяконов, В. И. Перель // Письма в ЖЭТФ. — 1971. — Т. 13, № 1. — С. 657—660.
8. *Dyakonov, M.* Current-induced spin orientation of electrons in semiconductors / M. Dyakonov, V. Perel // Physics Letters A. — 1971. — Vol. 35, no. 6. — P. 459—460.
9. *Kato, Y. K.* Observation of the Spin Hall Effect in Semiconductors / Y. K. Kato // Science. — 2004. — Vol. 306, no. 5703. — P. 1910—1913.
10. Experimental Observation of the Spin-Hall Effect in a Two-Dimensional Spin-Orbit Coupled Semiconductor System / J. Wunderlich [et al.] // Physical Review Letters. — 2005. — Vol. 94, no. 4. — P. 7204.
11. Evidence for the ballistic intrinsic spin Hall effect in HgTe nanostructures / C. Brune [et al.] // Nature Physics. — 2010. — Vol. 6, no. 6. — P. 448—454.
12. Perpendicular switching of a single ferromagnetic layer induced by in-plane current injection / I. M. Miron [et al.] // Nature. — 2011. — Vol. 476, no. 7359. — P. 189—193.

13. Spin-Torque Switching with the Giant Spin Hall Effect of Tantalum / L. Liu [et al.] // Science. — 2012. — Vol. 336, no. 6081. — P. 555—558.
14. Symmetry and magnitude of spin-orbit torques in ferromagnetic heterostructures / K. Garello [et al.] // Nature Nanotechnology. — 2013. — Vol. 8, no. 8. — P. 587—593.
15. Room-Temperature Reversible Spin Hall Effect / T. Kimura [et al.] // Physical Review Letters. — 2007. — Vol. 98, no. 15. — P. 6601.
16. *Valet, T.* Theory of the perpendicular magnetoresistance in magnetic multilayers / T. Valet, A. Fert // Physical Review B. — 1993. — Vol. 48, no. 10. — P. 7099—7113.
17. *Levy, P. M.* Electrical conductivity of magnetic multilayered structures / P. M. Levy, S. Zhang, A. Fert // Physical Review Letters. — 1990. — Vol. 65, no. 13. — P. 1643—1646.
18. Giant enhancement of spin accumulation and long-distance spin precession in metallic lateral spin valves / Y. Fukuma [et al.] // Nature Materials. — 2011. — Vol. 10, no. 7. — P. 527—531.
19. *Nonoguchi, S.* Nonlocal spin transports in nanopillar-based lateral spin valve / S. Nonoguchi, T. Nomura, T. Kimura // Applied Physics Letters. — 2012. — Vol. 100, no. 13. — P. 2401.
20. Magneto-transport and microstructure of  $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})/\text{Cu}$  lateral spin valves prepared by top-down microfabrication process / Ikhtiar [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2014. — Vol. 115, no. 17. — P. 3912.
21. Current-induced spin-orbit torques in ferromagnetic and antiferromagnetic systems / A. Manchon [et al.] // arXiv:1801.09636v1. — 2018.