

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Шевцов Владислав Сергеевич

**Развитие теории коллективной самоорганизации и
взаимодействий в системах многих магнитных диполей и ее
приложение к элементам спинтроники**

Специальность 1.3.3. — «Теоретическая физика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

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

Научный руководитель: **Поляков Петр Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты: **Иноземцева Наталья Германовна**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры распределенных информационно-вычислительных систем института системного анализа и управления Университета «Дубна».

Пятаков Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики колебаний физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Ягола Анатолий Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Защита диссертации состоится «17-го» ноября 2022 г. в 16-30 на заседании диссертационного совета МГУ.011.2 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, Физический факультет МГУ, физическая аудитория им. Р.В. Хохлова.

E-mail: ff.dissovet@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/498743632/>

Автореферат разослан «____» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.011.2,
доктор физико-математических наук,
профессор

П.А. Поляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

На сегодняшний день спинтроника является одной из наиболее активно развивающихся областей научных исследований. Открытые эффекты, связанные с управлением электрическими токами и сопротивлением элементов проложили путь к созданию и повсеместному распространению технологий, без которых сложно представить современную жизнь [1].

Анизотропный магниторезистивный (АМР) эффект, обнаруженный экспериментально еще Уильямом Томсоном в 1857 г. для железа и никеля [2], получил широкое распространение и используется в настоящее время для детектирования магнитного поля. Однако теоретические аспекты этого явления, связанные с механизмами рассеяния спин-поляризованных носителей заряда в проводнике при протекании тока, были открыты существенно позже [3]. Таким образом, удельное сопротивление в произвольной точке магниторезистивного элемента зависит от ориентации вектора намагниченности относительно вектора плотности тока.

Развитие спинтроники получило новый скачок в 1988 г., когда Альберт Ферт и Петер Грюнберг открыли эффект гигантского магниторезистивного (ГМР) эффекта в сверхрешетках Fe/Cr [4]. Это открытие принесло им Нобелевскую премию по физике в 2007 г. В более поздних работах было обнаружено, что при комнатных температурах величина ГМР эффекта может достигать 400 % в спиновых клапанах Fe/MgO/Fe [5], а сопротивление элемента зависит от взаимной ориентации векторов намагниченности в слоях сверхрешетки.

В связи с этим чрезвычайно важными оказались теоретические задачи определения магнитной структуры среды, по которой протекает электрический ток, а также особенности протекания электрического тока в таких средах.

Актуальность темы и степень ее разработанности. Одной из актуальных проблем современной спинтроники является задача о вычислении коллективной самоорганизующейся спиновой структуры в ферромагнитных пленках с толщинами порядка десятков нанометров [6]. В частности, большие усилия исследователей направлены на изучение эффективных с точки зрения устройств спинтроники структур, таких как скирмионы [7]. Отметим, что несмотря на большое количество

экспериментальных и теоретических работ, посвященных описанной выше проблеме [8], не удастся разработать общую теоретическую модель, позволяющую однозначно определить распределение микромагнитных структур в ферромагнитных нанополосках. В зависимости от внешних магнитных полей, материалов и геометрических размеров, микромагнитные структуры могут быть самыми разнообразными [9], в том числе весьма нежелательными с точки зрения получения максимальной чувствительности элементов спинтроники.

На сегодняшний день задачи о распределении намагниченности в тонких пленках решаются в основном численно с использованием готовых программных пакетов [10], среди которых можно выделить как свободно распространяемые, так и коммерческие. Несмотря на очевидные достоинства, такие пакеты обладают и рядом недостатков. Численное решение, полученное с помощью программного пакета, дает информацию, ограниченную набором исходных данных. В то же время аналитическое решение описывает ситуацию более цельно и относительно свободно от задания конкретных параметров исследуемой системы. Это делает его более доступным для анализа и оценки достоверности. Таким образом аналитические решения, в том числе полученные в диссертации, по-прежнему ценны, несмотря на удобство готовых пакетов.

Современные направления развития спинтроники включают в себя также эффекты, связанные с управлением и воздействием на спиновые токи в различных структурах, таких как АМР сенсоры [11], многослойные спин-туннельные элементы [12] и т.д. В том числе интерес представляют задачи, связанные с исследованием самоорганизации токовых структур в магниторезистивных средах в зависимости от их геометрической формы и анизотропных электрорезистивных свойств вещества. Электрическое сопротивление элементов, входящих в состав элементов спинтроники, существенно определяется их формой. Если особенности формы элемента приводят к неоднородному распределению плотности тока в нем, как например в элементах со структурой “barber-pole” [13], то задача определения сопротивления перестает быть тривиальной.

Большинство известных теоретических методов справедливы только для изотропных сред и не позволяют точно рассчитать сопротивление магниторезистивного элемента. В случае со средой с АМР эффектом ситуация усложняется, так как сопротивление элемента не постоянно и зависит от ориентации намагниченности в элементе относительно тока. Пренебрежение влиянием анизотропии на распределение тока, используемое в работах [14, 15], позволяет упростить вычисления, однако учет АМР свойств может давать существенную поправку в итоговое распределение тока и сопротивление элемента, что и продемонстрировано в диссертации.

Спектр применения современных датчиков магнитного поля, основанных на АМР и ГМР эффектах, очень широк и не ограничивается только прямым измерением магнитного поля в заданной точке пространства, где непосредственно располагается сам датчик и его чувствительных элемент. В последние годы, в связи с развитием микроэлектроники и появлением новых измерительных и вычислительных комплексов, появилась возможность решать недоступные ранее научно-технические задачи. Одним из таких примеров является развитие теории магнитной локации на основе использования набора тонкопленочных АМР преобразователей магнитного поля для определения пространственных и угловых координат магнитного диполя [16].

Магнитная локация относится к классу обратных задач магнитостатики. Имеется источник магнитной неоднородности, который может иметь разнообразную форму и природу. В частности, таким источником может быть трещина или ржавчина на поверхности трубопроводов или рельса, по которым течет тестовый ток, а также намагниченное тело произвольной формы. По результатам измерения компонент магнитного поля в некоторых точках пространства требуется установить положение источника, его природу, форму, величину и т.д.

Магнитная локация находит применение во многих актуальных задачах: определение положения и ориентации капсулы эндоскопа [17], раннее обнаружение коррозионных разрушений на поверхности магистральных трубопроводов [18], обнаружение скрытых ферромагнитных предметов, потенциально представляющих

террористическую угрозу [19] и т.д. В диссертации был достигнут существенный прогресс как в математическом алгоритме, так и в экспериментальной реализации метода магнитной локации.

Цель работы. Отметим, что работа магниторезистивных элементов спинтроники была бы практически невозможна и теоретически непредсказуема, если бы не удавалось найти такие параметры и режимы работы, при которых их магнитная структура имеет относительно простой вид. Поэтому одной из целей диссертации являлось выявить и исследовать такие структуры при различных параметрах элементов в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля.

Помимо этого, работа была направлена на исследование явления протекания тока в среде с анизотропным магниторезистивным эффектом с целью выявления ключевых особенностей в зависимости от геометрических параметров среды и величины эффекта.

К целям диссертации можно также отнести исследование возможности точного решения задачи магнитной локации с применением анизотропных датчиков магнитного поля в качестве измерительных приборов, разработку алгоритма для ее решения и поиск оптимальных параметров для его устойчивой работы.

Указанные цели достигаются путем решения следующих задач:

- Выполнение анализа экспериментальных зависимостей сопротивления образца в виде длинной полосы FeNiCo нанотолщины с ОЛН вдоль полосы в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля и выявление основных закономерностей в этих зависимостях. Создание эффективной теоретической модели, описывающей основные процессы перемагничивания указанной полосы под воздействием внешнего магнитного поля в зависимости от физических и геометрических параметров материала образца;
- Определение доменной магнитной структуры длинной полосы FeNiCo с ОЛН вдоль короткой стороны в зависимости от ее толщины и ширины с помощью магнитно-силового микроскопа. Разработка теоретической модели для эффективного описания обнаруженной доменной структуры;

- Применение моделей с целью расчета характеристик АМР и ГМР элементов спинтроники. Проверка корректности моделей с учетом влияния анизотропного магниторезистивного эффекта на неоднородность распределения тока. Сравнение теоретических зависимостей выходных характеристик датчиков с экспериментом.
- Создание эффективного алгоритма решения задачи магнитной локации с использованием датчиков магнитного поля. Изготовление макета магнитного локатора и экспериментальная проверка алгоритма на примере реальных источников магнитных неоднородностей. Разработка способа измерения магнитного поля с помощью метода магнитной локации.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработана теория коллективной самоорганизации системы магнитных диполей в случае нанополосок FeNiCo с одноосной анизотропией. Показано, что магнитная микроструктура длинной полоски FeNiCo с ОЛН вдоль длинной стороны при наличии внешнего магнитного поля может быть описана в рамках модели одномерной неоднородности. В случае образцов FeNiCo с ОЛН вдоль короткой стороны в плоскости пленки рассчитаны периоды доменной структуры Ландау-Лифшица. Оба результата хорошо согласуются с экспериментальными данными.
2. Получено аналитическое решение для двумерного распределения электрического потенциала и плотности тока в косоугольном магниторезистивном элементе при помощи метода сопряжённых функций и конформных преобразований. Представлено обобщенное уравнение Лапласа для электрического потенциала в случае сред с анизотропией сопротивления, вызванной анизотропным АМР эффектом, и получено решение данного уравнения в случае косоугольной пластины наноразмерной толщины. Теоретические результаты демонстрируют хорошее совпадение с экспериментом.

3. Представлена аналитическая формула для решения обратной задачи магнитостатики по определению положения магнитного диполя в пространстве. Разработан и изготовлен макет магнитного локатора, с помощью которого возможно точное определение положения и ориентации магнитного диполя в объеме $1 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$ с точностью до 1 см. Предложен метод измерения магнитного поля, основанный на методе магнитной локации, с использованием ферромагнитного шарика в качестве зонда.

Научная новизна. В представленной диссертации впервые была разработана и применена для магниторезистивных элементов спинтроники модель одномерной неоднородности, основанная на минимизации функционала полной магнитной энергии. Также удалось реализовать оригинальный эффективный алгоритм решения микромагнитной равновесной задачи для длинных тонких пленок с одноосной анизотропией.

Найден новый класс аналитических решений задачи о распределении плотности тока в проводнике косоугольной формы с произвольным углом. Получены картины распределения эквипотенциалей и линий тока в таком проводнике.

Новое обобщенное уравнение Лапласа получено для среды с АМР эффектом и решено численно для различных параметров среды в области косоугольной пластины магниторезистивного элемента. Впервые обнаружен эффект асимметричности графиков зависимости сопротивления пластины от величины внешнего магнитного поля для случаев прямого и обратного направления внешнего магнитного поля, что не может быть получено в рамках упрощенных моделей протекания токов в средах с АМР-эффектом.

Впервые предложено решение задачи магнитной локации в аналитическом виде и сконструирован оригинальный макет магнитного локатора на основе четырех 3-хосевых датчиков магнитного поля. Данный макет позволил подтвердить эффективность нового бесконтактного метода измерения внешнего магнитного поля путем определения магнитного момента стального шарика, намагниченного этим полем.

Теоретическая и практическая значимость работы. Как отмечалось выше, невозможно разработать общую теоретическую модель, позволяющую однозначно определить распределение микромагнитных структур в ферромагнитных нанополосках, учитывая все многообразие исследуемых образцов и их параметров. Данная диссертация предлагает эффективные теоретические алгоритмы расчета магнитных структур тонких пленок с одноосной анизотропией, которые вносят вклад в область исследования процессов перемагничивания элементов спинтроники.

Результаты диссертации могут быть использованы для описания основных факторов, влияющих на характеристики АМР и ГМР преобразователей магнитного поля. В частности, теоретические модели могут использоваться для подбора оптимальных характеристик устройств спинтроники с целью получения наилучших характеристик, таких как чувствительность и линейность.

Практическая реализация метода магнитной локации открывает широкий спектр практических применений в области детектирования магнитных диполей в пространстве, а также дистанционного определения магнитного поля. Данные возможности позволяют измерять поля в труднодоступных местах и агрессивных средах.

Достоверность результатов. Результаты расчета магнитных структур на основе разработанных методов проверялись в сравнении с известным свободно распространяемым пакетом OOMMF, а также сравнивались с наблюдаемыми экспериментально картинками, полученными на современном высокоточном магнитно-силовом микроскопе. При этом экспериментальные результаты получены в неоднократно воспроизводимых экспериментах. Достоверность результатов подтверждается также хорошим совпадением рассчитанных теоретически зависимостей с экспериментами, выполненными с применением современных методов цифровой обработки.

Обоснованность теоретических результатов подтверждается также использованием классических физических теорий и использованием строгих аналитических методов решения. Результаты, описанные в диссертации,

опубликованы в ведущих тематических журналах и неоднократно докладывались на престижных международных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы представлены автором на следующих 11 конференциях:

- XXIV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах». Москва, Россия. 2021.
- XXIV, XXV, XXVI, XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов». Москва, Россия. 2017, 2018, 2019, 2021.
- XXIV, XXV, XXVI, XXII, XXIII, XXIX Международная конференция "Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)". Москва, Россия. 2016, 2017, 2018, 2019, 2021.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 12 статьях в рецензируемых журналах из баз данных Scopus и Web of Science.

Личный вклад. Цели и задачи исследований, отраженных в диссертации, сформулированы автором совместно с научным руководителем. Все основные результаты получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 57 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 111 наименований. Полный объем диссертации составляет 122 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** проводится обзор литературы по проблемам, затрагиваемым в диссертации, обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цель работы и задачи, а также положения, выносимые на защиту, указывается новизна полученных результатов, обосновывается теоретическая и практическая значимость работы, приводятся сведения об апробации.

Первая глава посвящена развитию теории коллективной самоорганизации в системах многих магнитных диполей. Основные положения данной теории были сформулированы, основываясь на большом количестве экспериментальных данных, полученных для тонких прямоугольных полосок состава FeNiCo_{20} и FeNiCo_6 с одноосной анизотропией наноразмерной толщины. В экспериментах с ОЛН вдоль длинной стороны полосок было обнаружено, что при квазистатическом перемагничивании полоски зависимости магнитосопротивления при прямом и обратном изменениях напряженности магнитного поля \vec{H} , направленного перпендикулярно ОЛН, очень близки, что говорит об отсутствии коэрцитивности. Таким образом был сделан вывод о том, что в данном образце практически отсутствуют сложная доменная и субдоменная магнитные микроструктуры. В соответствии с этим экспериментальным выводом была разработана одномерная теория неоднородности распределения вектора намагниченности \vec{M} , которая, в свою очередь, обусловлена влиянием неоднородного размагничивающего поля.

Равновесное распределение вектора намагниченности \vec{M} находилось как решение вариационной задачи на нахождение минимума полной магнитной энергии W ферромагнетика, занимающего объем V , относительно вариации $\delta\vec{M}$:

$$W = \int_V (w_a + w_m + w_H) dV = \min, \quad (1)$$

где w_a — плотность энергии магнитной анизотропии, w_m — плотность магнитостатической энергии, w_H — плотность зеемановской энергии.

Другим мощным методом численного моделирования результирующей магнитной микроструктуры является метод динамического установления, с помощью

которого было учтено влияние обменного взаимодействия, а также двумерная неоднородность распределения вектора намагниченности \vec{M} в среде. Данный метод основан на решении динамического микромагнитного уравнения Ландау—Лифшица—Гильберта [20]

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma[\vec{M} \times \vec{H}_{ef}] + \frac{\alpha}{M} \left[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \right], \quad (2)$$

где γ — гиромагнитное отношение, α — параметр затухания, \vec{M} — вектор намагниченности, \vec{H}_{ef} — эффективное магнитное поле. Для реализации описанного выше метода динамического установления был использован широко распространенный программный пакет для микромагнитного моделирования ООММФ [21].

Получив решение задач (1) и (2), можно вычислить изменение сопротивления в каждой полоске, обусловленное АМР эффектом [3] и вызванное внешним магнитным полем \vec{H} , которое приложено перпендикулярно ОЛН. Вычисленные в соответствии с изложенной теорией зависимости сопротивления R полоски от проекции внешнего магнитного поля на перпендикулярное к ОЛН направление показали, что теоретические зависимости практически совпадают с экспериментальными, что свидетельствует о хорошем условии однородности распределения намагниченности в таких ячейках.

Следует отметить, что расчет задачи с помощью пакета ООММФ потребовал более суток на персональном компьютере и становится проблематичным при уменьшении размера ячейки. Аналогичный расчет при помощи модели одномерной неоднородности занимает не более минуты, что позволяет при прочих равных использовать гораздо более точную сетку без ущерба времени.

Также в этой главе рассматривается ситуации с ОЛН вдоль короткой стороны. При экспериментальном исследовании образцов различной толщины и ширины с помощью магнитно-силового микроскопа были получены схожие периодические доменные структуры, соответствующие модели замыкающих доменов Ландау—Лифшица [22]. Теоретический расчет периода данной доменной структуры был

выполнен на основе расчета и минимизации полной магнитной энергии пленки W , доменная структура которой совпадает с обнаруженной экспериментально:

$$W = \int_V (w_a + w_m + w_H + w_e) dV + \int_S (\sigma_N + \sigma_{N90^\circ}) dS, \quad (3)$$

где V – полный объем исследуемой пленки, S – полная площадь поверхности доменных границ Нееля, w_e – объемная плотность энергии обменного взаимодействия, σ_N и σ_{N90° – поверхностные плотности энергий 180° -ной и 90° -ной доменных границ Нееля. Варьируя энергию пленки по величине периода доменной структуры, был найден период D , при котором энергия пленки минимальна.

$$D = \sqrt{\frac{2\sigma_N b}{K}}, \quad (4)$$

где b – ширина пленки и K – константа одноосной анизотропии. Результаты сравнения рассчитанных по формуле (4) значений периода и экспериментальных результатов показали хорошее сходство.

Во **второй главе** были успешно применены теоретические модели из первой главы для различных актуальных анизотропных магниторезистивных элементов спинтроники. Указанные модели были доработаны с учетом особенностей конструкции таких элементов и использованы с целью исследования их важнейших характеристик, а также было выполнено сравнение с экспериментальными данными на примере реальных устройств и их образцов.

Датчики магнитного поля с токовой неоднородностью “barber-pole” состоят из системы магниторезистивных нанополосок, соединенных в мостовую схему, с одноосной анизотропией, причем ОЛН направлена вдоль длинной стороны полосок. На каждую магниторезистивную нанополоску нанесены низкорезистивные шунты под углом 45° к ОЛН.

В первом приближении будем считать, что при отсутствии внешнего магнитного поля ток в магниторезистивной среде течет перпендикулярно границам шунтов, т.е. под углом 45° к ОЛН. Были получены теоретические графики зависимости относительного выходного напряжения от величины внешнего магнитного поля H

для такого приближения, которые достаточно точно описывали ход экспериментальной зависимости при малых магнитных полях (до 20 Э). Но при высоких полях наблюдались отклонения. Было выдвинуто предположение, что это может быть обусловлено грубым учетом распределения токов вдоль краев магниторезистивной полоски.

Реальное распределение тока было рассчитано с помощью метода конформных преобразований. В случае постоянного тока в предположении, что среда однородна и изотропна, а проводник таков, что можно считать плотность объемных зарядов равной нулю, уравнение скалярного потенциала U примет вид уравнения Лапласа

$$\Delta U = 0. \quad (5)$$

Для исследуемых образцов в первом приближении уравнение (5) выполняется, так как величина АМР эффекта не превышает 2 %. Ключевым моментом, позволяющим успешно применять конформные преобразования к подобным задачам является то, что вид уравнения (5) в двумерном случае не меняется при конформном преобразовании координат:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = 0, \quad (6)$$

где W – комплексный потенциал. Уравнение (7) рассматривается в той области, в которой его решение не представляет труда, после чего конформно отображается на интересующую область. Таким образом, задача сводится к поиску соответствующего конформного преобразования. К сожалению, конформные преобразования позволяющие легко осуществлять дальнейшие расчеты, удается построить лишь для ограниченного числа областей. В подавляющем же большинстве случаев преобразование записывается лишь в виде интеграла от функции комплексного переменного.

В данной главе предложен способ, позволяющий избежать таких трудностей для областей, в которых есть участки с однородным распределением тока по всей ширине проводника. При этом распределение потенциала построено с помощью конформного преобразования, выраженного в элементарных функциях, и оценена возникающая

погрешность для случая косоугольных пластин в форме параллелепипеда, основанием которого является параллелограмм с произвольным острым углом.

Полученное решение имеет очень важное значение с точки зрения контроля точности, так как при численном решении аналогичной задачи в рассматриваемом элементе возникают сингулярности. Наличие точного аналитического решения позволяет выполнить правильную регуляризацию таких особых областей и получить корректное численное решение задачи.

В общем случае магниторезистивный элемент представляет собой анизотропную среду, в которой уравнение Лапласа (5) не выполняется. Было показано, что в такой среде с АМР эффектом распределение электрического потенциала U удовлетворяет обобщенному уравнению Лапласа, вывод и анализ которого представлен в диссертации:

$$\begin{aligned} (1 - \beta m_x^2) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - 2\beta m_x m_y \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + (1 - \beta m_y^2) \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \\ - \beta \left(2m_x \frac{\partial m_x}{\partial x} + m_x \frac{\partial m_y}{\partial y} + m_y \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) \frac{\partial U}{\partial x} - \\ - \beta \left(2m_y \frac{\partial m_y}{\partial y} + m_y \frac{\partial m_x}{\partial x} + m_x \frac{\partial m_y}{\partial x} \right) \frac{\partial U}{\partial y} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где β – относительная величина АМР эффекта, \vec{m} – единичный вектор, совпадающий по направлению с вектором намагниченности \vec{M} в среде, m_x и m_y – проекции вектора \vec{m} на координатные оси x и y соответственно.

В общем случае уравнение (7) является нелинейным, так как \vec{m} является функцией $\vec{m}(U, \vec{H}, x, y)$, где \vec{H} – вектор напряженности внешнего магнитного поля, наличие которого приводит к изменению распределения намагниченности в пленке. Изменение распределения вектора \vec{M} в пленке в свою очередь влияет на распределение потенциала, которое удовлетворяет уравнению (7). Результатом такого влияния является также и изменение распределения плотности тока в исследуемой косоугольной пластине и полного сопротивления образца. Таким образом достигается возможность управления протеканием тока в образце внешним магнитным полем \vec{H} . В данной главе были рассмотрены зависимости распределений

линий тока и эквипотенциальных линий от внешнего магнитного поля при различных параметрах.

Описанная теория неоднородного протекания тока показала более точное сходство теоретических графиков зависимости относительного выходного напряжения датчика “barber-pole” от величины внешнего магнитного поля в сравнении с упрощенной моделью протекания тока. Это говорит о важности учета особенностей протекания тока в таких структурах и влияния АМР эффекта.

Третья глава посвящена развитию теории и ее приложению к спин-туннельным магниторезистивным элементам. Объектом исследования являлся спин-туннельный переход в форме эллипса. В его состав входит синтетическая антиферромагнитная структура, состоящая из двух противоположно намагниченных слоев CoFe и CoFeV. Ось обменной (однонаправленной) анизотропии (ООА) между антиферромагнитным слоем FeMn и ферромагнитным слоем CoFe и ось легкого намагничивания (ОЛН) свободного слоя CoFeV направлены вдоль большей полуоси эллипсов. Вдоль оси трудного намагничивания прикладывалось постоянное магнитное поле \vec{H}_\perp . Вдоль ОЛН прикладывается переменное перемангничивающее поле \vec{H}_0 , которое изменяет ориентацию вектора намагниченности \vec{M} свободного слоя, т.е. угол φ между вектором \vec{M} и направлением ОЛН. Это в свою очередь ведет к изменению сопротивления спин-туннельной магниторезистивной наноструктуры R_m .

В рамках модели когерентного вращения намагниченности \vec{M} свободного слоя спин-туннельного перехода объемная плотность магнитной энергии w равна:

$$w = \frac{1}{2} H_a M \sin^2 \varphi - \vec{M} \cdot \vec{H}_0 - \vec{M} \cdot \vec{H}_\perp + w_m + w_c, \quad (8)$$

где $H_a = 2K / M$ – эффективное поле анизотропии, K – константа одноосной анизотропии, w_m – объемная плотность магнитостатической энергии, w_c – объемная плотность магнитостатической энергии связи с фиксирующим слоем. Угол φ локальной равновесной ориентации вектора намагниченности свободного слоя определялся минимумом функции (8).

Магнитная энергия (8) может иметь два локальных минимума, соответствующих двум устойчивым ориентациям вектора намагниченности \vec{M} . При определенных

значениях напряженностей внешнего магнитного поля H_{\perp} и H_0 функция (8) будет иметь только один минимум. Таким образом, при прямом и обратном перемагничивании свободного слоя происходит скачок ориентации вектора намагниченности \vec{M} от одной равновесной кривой к другой. Это приводит к гистерезису ГМР сопротивления.

В рамках рассмотренной теории были построены кривые зависимости сопротивления R_m спин-туннельного перехода от внешнего магнитного поля. Рассмотренная теория приближенно соответствует экспериментальным результатам. Величины теоретического и экспериментального гистерезиса близки. Однако, перемагничивание свободного слоя происходит не так резко, как предсказывает теория. Не исключено, что этот факт может свидетельствовать о наличии неоднородного механизма перемагничивания свободного слоя.

Неоднородное перемагничивание моделировалось в рамках микромагнитной двумерной теории с использованием метода динамического установления. Как и ранее, для реализации описанного выше численного метода использовался программный пакет ООММФ. В результате расчетов действительно было зафиксировано возникновение неоднородных магнитных структур (доменов) в свободном слое. Учет данного эффекта позволил получить теоретические расчеты изменения сопротивления при некогерентном перемагничивании свободного слоя спин-туннельного элемента, которые значительно лучше приближались к экспериментальной кривой.

В четвертой главе рассмотрена теория детектирования магнитных диполей в пространстве и выполнена экспериментальная реализация устройства магнитной локации. Задача магнитной локации поддается решению, когда источник магнитной неоднородности находится на достаточно большом (по сравнению с размерами источника) расстоянии для того, чтобы его эффективно можно было заменить одним диполем. В таком случае возможно определить радиус-вектор \vec{r} и ориентацию диполя с магнитным моментом \vec{p}_m в среде по известным значениям проекций напряженности магнитного поля H^i в определенных точках пространства. Здесь $i = 1, 2, \dots, N$, где N – количество точек измерения. В диссертации рассматриваются случаи с $N = 12$ и

$N = 16$, причем датчики, измеряющие проекции магнитного поля, расположены в вершинах куба со стороной $a = 10$ см. Записав проекции магнитного поля $H^i = H^i(\vec{p}_m; \vec{r})$, получаем систему из $N = 12$ и $N = 16$ уравнений. Данная система не имеет точного решения и можно говорить только о множестве решений, соответствующих погрешности измерения магнитного поля. В качестве меры отклонения полученного решения от наиболее вероятного был использован функционал квадратичного отклонения экспериментально измеренных величин $H_{\text{эксп}}^i$ от теоретически рассчитанных $H_{\text{теор}}^i$:

$$\sum_{i=1}^N (H_{\text{эксп}}^i - H_{\text{теор}}^i)^2. \quad (9)$$

Задача сводится к поиску таких значений координат и проекций магнитного момента диполя, при которых данный функционал минимален.

Экспериментальная реализация задачи магнитной локации осложнена рядом обстоятельств. Во-первых, быстрое убывание магнитного поля от расстояния как r^{-3} требует даже на относительно небольших расстояниях измерения очень слабых магнитных полей. Во-вторых, определение координат диполя представляет собой некорректную задачу в том смысле, что погрешность прямых измерений магнитного поля приводит к значительно большей погрешности определения координат диполя. Тем не менее, в рамках эксперимента удалось определять положение магнита в форме цилиндра высотой 1 см и радиусом 1 см с минимальными ошибками, не превышающими 1 см. Данная величина определяется шагом сетки при численном решении и выбрана таковой для достижения приемлемого времени вычисления.

Существенным прорывом в решении любой обратной задачи можно считать получение результата в виде аналитического выражения. В данной главе впервые удалось получить приближенную аналитическую формулу для нахождения координат магнитного диполя в пространстве, которая в эксперименте дает ошибки по координатам не более 10 %. Данный успех был обусловлен использованием большего количества точек измерения, расположенных в разных плоскостях.

Также в данной главе разработан и экспериментально подтвержден новый метод изменения магнитного поля посредством магнитной локации. Ферромагнитный шарик, помещенный в однородное внешнее магнитное поле напряженностью \vec{H}_0 , намагничивается, приобретая магнитный момент \vec{p}_m . По значениям проекций магнитного момента шарика, полученным при помощи метода магнитной локации, можно определить величину внешнего магнитного поля \vec{H}_0 в области расположения ферромагнитного шарика. Основным преимуществом данного метода является возможность дистанционного измерения магнитного поля в агрессивных средах. В эксперименте измерялось поле, создаваемое магнитом в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами $4 \times 4 \times 1,5$ см³, при помощи стального шарика радиусом 13,5 мм. Сравнение экспериментальных и теоретических значений показали хорошее совпадение.

В **заключении** приведены основные результаты диссертации. Разработанная в первой главе модель одномерной неоднородности позволила существенным образом упростить задачу о нахождении распределения намагниченности в нанополоске FeNiCo. Рассчитанные на основе представленной модели зависимости изменения магнитосопротивления от величины внешнего магнитного поля продемонстрировали хорошее совпадение с экспериментом. Также была разработана теоретическая модель для расчета АМР характеристик образца с перпендикулярной анизотропией и получено хорошее согласование с экспериментальными результатами. Развитие представленной теории позволит существенно продвинуться в задачах, связанных с проектированием датчиков магнитного поля и повышением эффективности их работы.

Теоретические расчеты зависимостей выходного напряжения датчика “barber-*pole*” во второй главе точно описывают ход экспериментальной кривой. Полученное аналитическое решение двумерного уравнение Лапласа в области косоугольного магниторезистивного элемента позволяет контролировать точность численного решения аналогичной задачи с целью правильной регуляризации решения в особых областях. Учет АМР эффекта привел к обобщенному уравнению Лапласа, численное решение которого позволило обнаружить асимметрию в графиках зависимостей

сопротивления элемента от внешнего магнитного поля и получить лучшее сходство с экспериментом по сравнению с упрощенной моделью.

В третьей главе получены теоретические зависимости перемагничивания спин-туннельного элемента во внешнем магнитном поле в рамках классической модели Стонера–Вольфарта. На основе полученных моделей перемагничивания свободного слоя при воздействии постоянного магнитного поля, направленного ортогонально измерительному полю, представляется возможным спрогнозировать ширину гистерезиса, наклон характеристики в области малых магнитных полей и подобрать оптимальное значение ортогонального магнитного поля. Применение модели некогерентного перемагничивания демонстрирует лучшее сходство с экспериментальными данными.

Разработанное в четвертой главе новое эффективное устройство для магнитной локации существенно превосходит известные аналогичные разработки. На основе созданного устройства для магнитной локации был разработан новый метод измерения магнитного поля, принципиальным отличием которого от других способов измерения является отсутствие каких-либо держателей и подводящих проводов к измерительному инструменту (шарику) и возможность измерения магнитного поля в широком диапазоне температур и давлений, а также в присутствии агрессивной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ферг А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // Успехи физических наук. 2008. Т. 178. № 12. С. 1336-1348.
2. Thomson W. XIX. On the electro-dynamic qualities of metals: — Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and of iron // Proceedings of the Royal Society of London. 1857. Vol. 8. P. 546-550
3. McGuire T., Potter R. Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys // IEEE Transactions on Magnetics. 1975. Vol. MAG-11. No. 4. P. 1018-1038.
4. Baibich M.N., Broto J.M., Fert A. et al. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices // Physical Review Letters. 1988. Vol. 61. No. 21. P. 2472-2475.
5. Scheike T., Xiang Q., Wen Z. et al. Exceeding 400 % tunnel magnetoresistance at room temperature in epitaxial Fe/MgO/Fe(001) spin-valve-type magnetic tunnel junctions // Applied Physics Letters. 2021. Vol. 118. Art. No. 042411.
6. Bhatti S., Sbiaa R., Hirohata A. et al. Spintronics based random access memory: a review // Materials Today. 2017. Vol. 20. Iss. 9. P. 530-548.
7. Jiang W., Chen G., Liu K. et al. Skyrmions in magnetic multilayers // Physics Reports. 2017. Vol. 704. P. 1-49.
8. Волков В.В., Боков В.А. Динамика доменной стенки в ферромагнетиках // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. Вып. 2. С. 193-221.
9. de Abril O., Sánchez M., Aroca C. The effect of the in-plane demagnetizing field on films with weak perpendicular magnetic anisotropy // Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 100. Iss. 6. Art. No. 063904.
10. Mahalingam S., Manikandan B., Arockiaraj S. Review – Micromagnetic Simulation Using OOMMF and Experimental Investigations on Nano Composite Magnets // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1172. Art. No. 012070.
11. Ripka P. Magnetic Sensors and Magnetometers // Measurement Science and Technology. 2002. Vol. 13. No. 4. P. 645.

12. Maciel N., Marques E., Naviner L. et al. Magnetic Tunnel Junction Applications // Sensors. 2019. Vol. 20. Iss. 1. Art. No. 121.
13. Wang C., Su W., Hu Z. et al. Highly Sensitive Magnetic Sensor Based on Anisotropic Magnetoresistance Effect // IEEE Transactions on Magnetics. 2018. Vol. 54. Iss. 11. Art. No. 2301103.
14. Tumański S., Stabrowski M. The optimization and design of magnetoresistive barber-pole sensors // Sensors and Actuators. 1985. Vol. 7. Iss. 4. P. 285-295.
15. Kuijk K.E., van Gestel W.J., Gorter F.W. The barber pole, a linear magnetoresistive head // IEEE Transactions on Magnetics. 1975. Vol. Mag-11. No. 5. P. 1215-1217.
16. Kasatkin S.I., Polyakov O.P., Rusakova N.E., Rusakov A.E. On uniqueness of solution of a reverse problem of magnetic location // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2006. Vol. 305. Iss. 2. P. 361-364.
17. Aziz S.M., Grcic M., Vaithianathan T. A Real-Time Tracking System for an Endoscopic Capsule using Multiple Magnetic Sensors // Smart Sensors and Sensing Technology, Springer. 2008. P. 201–218.
18. Григорашвили Ю.Е., Притула В.В., Стицей Ю.В. Альтернативный метод оценки состояния защитных покрытий законченных строительством трубопроводов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2013. № 6. С. 34-39.
19. Карпов Р.Г. Алгоритмическая, программная и аппаратная реализация системы магнитной локации скрытых объектов // Известия вузов. Электроника. 2009. № 3(77). С. 53-60.
20. Heinrich B., Cochran J.F. Ultrathin metallic magnetic films: magnetic anisotropies and exchange interactions // Advances in Physics. 1993. Vol. 42. No. 5. P. 523-639.
21. «The Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF)». URL: <https://math.nist.gov/oommf/> (дата обращения: 21.05.2022).
22. Landau L., Lifshits E. On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies // Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion. 1935. Vol. 8. P. 153-169.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

- R1. Шевцов В.С., Поляков О.П., Амеличев В.В. и др. Особенности магниторезистивного сопротивления длинной нанополоски FeNiCo // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2019. № 5. С. 40-44; Shevtsov V.S., Polyakov O.P., Amelichev V.V. et al. Magnetoresistive Features of a Long FeNiCo Nanostrip // Moscow University Physics Bulletin. 2019. V. 74. No. 5. P. 459-463. (WoS Impact factor: 0.672);
- R2. Шевцов В.С., Поляков О.П., Амеличев В.В. и др. Особенности АМР эффекта в магнитных полосках с перпендикулярной анизотропией // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 5. С. 726-729; Shevtsov V.S., Polyakov O.P., Amelichev V.V. et al. Features of the AMR Effect in Magnetic Strips with Perpendicular Anisotropy // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. V. 84. No. 5. P. 599-601. (Scopus SJR: 0.238);
- R3. Шевцов В.С., Каминская Т.П., Поляков П.А. и др. Доменная структура в тонких пленках FeNiCo с плоскостной анизотропией // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 11. С. 1564-1567; Shevtsov V.S., Kaminskaya T.P., Polyakov P.A. et al. Domain Structure in Thin FeNiCo Films with In-Plane Anisotropy // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. V. 85. No. 11. P. 1226-1229. (Scopus SJR: 0.238);
- R4. Амеличев В.В., Жуков Д.А., Касаткин С.И. и др. Особенности расчета и исследования вольт-эрстедной характеристики анизотропного магниторезистивного датчика // Письма в журнал технической физики. 2021, Т. 47. Вып. 10. С. 19-21; Amelichev V.V., Zhukov D.A., Kasatkin S.I. et al. Features of Calculation and Investigation of Volt–Oersted Characteristics of an Anisotropic Magnetoresistive Sensor // Technical Physics Letters. 2021. V. 47. No. 6. P. 482-484. (WoS Impact factor: 0.714);

- R5. Поляков П.А., Шевцов В.С. Решение двумерной электростатической задачи для косоугольного магниторезистивного элемента // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 9. С. 1292-1296; Polyakov P.A., Shevtsov V.S. Solution to a Two-Dimensional Electrostatic Problem for an Oblique Magnetoresistive Element // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. V. 86. No. 9. P. 1070-1073. (Scopus SJR: 0.238);
- R6. Shevtsov V.S., Polyakov P.A. Electric current and magnetization distributions self-organization features in a magnetoresistive film nanoelement under the influence of an external magnetic field // International Journal of Modern Physics B. 2022. Vol. 38. No. 25. Art. No. 2250167. (WoS Impact factor: 1.219);
- R7. Амеличев В.В., Васильев Д.В., Костюк Д.В. и др. Исследование процесса перемагничивания спин-туннельного перехода с использованием модели когерентного вращения намагниченности свободного слоя // Микроэлектроника. 2021. Т. 50. № 6. С. 461-466; Amelichev V.V., Vasiliev D.V., Kostyuk D.V. et al. Study of Spin-Tunnel Junction Magnetization Using Coherent Rotation of the Free Layer Magnetization Model // Russian Microelectronics. 2021. V. 50. No. 6. P. 420-425. (Scopus SJR: 0.188);
- R8. Шевцов В.С., Амеличев В.В., Васильев Д.В. и др. Изменение магнитосопротивления спин-туннельного элемента при неоднородном перемагничивании с образованием доменов // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 9. С. 1247-1250; Shevtsov V.S., Amelichev V.V., Vasilyev D.V. et al. Change in the Magnetoresistance of a Spin Tunnel Element upon Inhomogeneous Magnetization Reversal with the Formation of Domains // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. V. 86. No. 9. P. 1033-1036. (Scopus SJR: 0.238);
- R9. Кулезнев Н.Е., Поляков П.А., Шевцов В.С. Теоретическое и экспериментальное исследование особенностей магнитного поля сильно намагниченного постоянного магнита // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 8. С. 1076-1079; Kuleznev N.E., Polyakov P.A., Shevtsov V.S. Theoretical and Experimental Investigation of the Magnetic Field of a Strongly

- Magnetized Permanent Magnet // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2018. V. 82. No. 8. P. 974-977. (Scopus SJR: 0.238);
- R10. Касаткин С.И., Плотникова Н.В., Поляков О.П. и др. Магнитная локация на базе магниторезистивного компаса // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 8. С. 1085-1089; Kasatkin S.I., Plotnikova N.V., Polyakov O.P. et al. Magnetic Location Based on a Magnetoresistive Compass // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2018. V. 82. No. 8. P. 983-987. (Scopus SJR: 0.238);
- R11. Касаткин С.И., Поляков П.А., Поляков О.П. и др. Макет магнитной локации на базе магниторезистивного компаса // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 2. С. 204-206; Kasatkin S.I., Polyakov P.A., Polyakov O.P. et al. Prototype of a Magnetic Locator Based on a Magnetoresistive Compass // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. V. 84. No. 2. P. 163-165. (Scopus SJR: 0.238);
- R12. Шевцов В.С., Кулезнев Н.Е., Поляков П.А. Измерение магнитного поля методом магнитной локации // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 2. С. 201-203; Shevtsov V.S., Kuleznev N.E., Polyakov P.A. Measuring a Magnetic Field via Magnetic Location // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. V. 84. No. 2. P. 160-162. (Scopus SJR: 0.238).