

На правах рукописи

МЕШКОВ Георгий Александрович

**ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
МИКРОМАГНИТНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ
КАК НОВЫЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТРОЙСТВ
МАГНИТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальности 01.04.03 – радиофизика
и 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре физики колебаний физического факультета
МГУ.

Научный руководитель: к.ф.-м.н.,
доцент,
Пятаков Александр Павлович

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н.,
профессор,
Лисовский Федор Викторович
к.ф.-м.н.,
доцент,
Лукашева Екатерина Викентьевна

Ведущая организация: Московский государственный техниче-
ский университет радиотехники, элек-
троники и автоматики

Защита состоится *22 декабря 2011 г.* в 16 часов на заседании диссертацион-
ного совета Д 501.001.67 при физическом факультете Московского Государ-
ственного Университета им. М. В. Ломоносова, по адресу: 119991, Москва,
Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, ЦФА
им. Р. В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан 21 ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент

Королев А.Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Потребность в энергонезависимой компьютерной памяти, которая бы позволяла хранить информацию в отсутствие источников питания и характеризовалась бы низким энергопотреблением при работе, явилась главным стимулом развития магнитной памяти и одной из предпосылок рождения новой области электроники — спиновой электроники (спинтроники), которая оперирует не с электрическим зарядом электрона, а с его механическим моментом — спином, и, как следствие, с магнитным моментом электрона.

В 2007 году Альберу Ферту и Петеру Грюнбергу была вручена Нобелевская премия за открытие эффекта гигантского магнитосопротивления, заключавшегося в значительном изменении сопротивления структуры из нескольких магнитных и немагнитных слоев в зависимости от взаимной ориентации намагниченностей в магнитных слоях. Это достижение, явившееся одним из важнейших успехов спинтроники, позволило на протяжении последнего десятилетия поддерживать устойчивый рост плотности записи информации на жестких дисках [1].

В настоящее время дальнейшее развитие магнитной памяти и спинтроники связывают [2] с MRAM — магниторезистивной памятью произвольного доступа (Magnetoresistive Random Access Memory), которая будет сочетать быстродействие оперативной памяти и энергонезависимость постоянной памяти. Однако традиционный способ записи информации на магнитные носители, основанный на создании магнитного поля электрическим током, является существенным препятствием увеличению плотности записи в MRAM: при уменьшении размеров элементов и токовых шин возрастает плотность протекающего через них тока вплоть до значений 10^7 – 10^8 А/см², что влечет за собой увеличение омических потерь, а также электромиграцию (явление переноса вещества в проводнике за счет постепенного дрейфа ионов), приводящих к деградации устройств. Существует альтернативный механизм магнитной записи — перенос спина, индуцированный спин-поляризованным током, однако перенос спина также требует высокой плотности тока, порядка

10^6 – 10^7 А/см² [2].

Возникает необходимость разработки стабильного метода записи магнитной информации при комнатной температуре с помощью только статического электрического поля без использования токов¹. Открытие и применение такого метода в устройствах магнитной памяти позволило бы кардинально уменьшить плотности токов — основное препятствие на пути к повышению плотности записи информации.

В этой связи большие надежды возлагаются на использование магнитоэлектрических (МЭ) эффектов. Они являются следствием взаимодействия электрической и магнитной подсистем в твердом теле и проявляются в виде воздействия статического, т.е. не изменяющегося со временем, электрического поля на намагниченность и — обратно — магнитного поля на электрическую поляризацию вещества.

Одной из разновидностей этих эффектов является неоднородный МЭ эффект. Он проявляется при наличии пространственной модуляции намагниченности в веществе. Например, в спиральных мультиферроиках с пространственно модулированными спиновыми структурами (ПМСС) неоднородный МЭ эффект вызывает электрическую поляризацию [3]. В связи с этим возникает вопрос, порождают ли электрическую поляризацию *микромагнитные* структуры [4] (например, доменные стенки, линии Блоха, магнитные вихри в наночастицах и др.) и можно ли воздействовать на них электрическим полем. Действительно, в них, как и в ПМСС, существует пространственная модуляция намагниченности (хотя она и обусловлена другими причинами), и в 1983 году В. Г. Барьяхтаром и др. было теоретически показано, что доменные стенки могут обладать магнитоэлектрическими свойствами [5]. При этом электрическая поляризация отлична от нуля только для стенок типа Нееля, где разворот намагниченности происходит в плоскости, перпендикулярной доменной стенке, в отличие от стенок Блоха, где разворот намагниченности

¹ Здесь и далее под фразой «без использования токов» понимается отсутствие в системе больших постоянных токов, которые приводят к сильному тепловыделению, т.е. полевой принцип управления. Токи, возникающие при включении или переключении полярности статического электрического поля гораздо меньше токов, необходимых для традиционной записи, вплоть до частот в десятки/сотни ГГц.

происходит в плоскости доменной стенки.

Позднее появились другие теоретические работы, посвященные МЭ свойствам доменных границ [3, 6–9], но экспериментальные свидетельства их МЭ свойств носили косвенный характер [10, 11]. В данной работе впервые демонстрируется прямое наблюдение поведения доменных границ в электрическом поле.

Неоднородный магнитоэлектрический эффект может применяться не только в ячейках памяти, но и в других устройствах магнитной электроники, таких как спиновые клапаны (устройства, позволяющие управлять спиновой поляризацией протекающего через них тока). Он перспективен также для записи состояний элементов программируемой логики — логических элементов, функциональность которых можно изменять в режиме реального времени, используя одни и те же физические устройства для выполнения разных логических операций.

К настоящему времени был сделан ряд попыток разработать электрические методы контроля намагниченности [12–14], но, как правило, они предполагают работу при низких температурах. Использование композитных материалов, состоящих из магнитострикционной и пьезоэлектрической компонент, позволяет осуществлять магнитоэлектрическое преобразование при комнатной температуре [15, 16], однако приготовление наноструктурированных композитов методами гетероэпитаксии пока не позволяет решить проблему надежного контроля границ раздела фаз [17].

Миниатюризацию устройств памяти также связывают со структурированными магнитными средами, состоящими из наноточек, в которых основным состоянием намагниченности зачастую является вихревое. Управление свойствами вихря при помощи спин-поляризованного тока позволяет записывать информацию в такой частице. Неожиданным развитием идей спинтроники оказались явления, связанные с динамикой движения вихрей. Например, импульсами спин-поляризованного тока в частице могут быть возбуждены осцилляции вихря с частотами порядка 1 ГГц [18], что позволяет рассматривать ее как миниатюрный источник СВЧ излучения большой для устройств такого размера мощности [19]. Однако возможность управления магнитным

вихрем при помощи электрического поля ранее не исследовалась.

Целью данной диссертационной работы являлось разработка метода электрического управления микромагнитными структурами, на котором могли бы быть основаны новые устройства магнитной электроники.

Для достижения поставленных целей было проведено исследование наиболее часто встречающихся видов микромагнитных структур в двух основных типах магнитных материалов: с анизотропией типа легкая ось и легкая плоскость. Были решены следующие задачи.

- Исследовать проявления неоднородного магнитоэлектрического эффекта в легкоосных магнетиках, а именно:
 - рассчитать электрические свойства доменных границ блоховского типа с магнитными неоднородностями — вертикальными линиями Блоха (ВБЛ);
 - экспериментально исследовать действие статического электрического поля на доменные границы блоховского и неелевского типа, а также вертикальные линии Блоха в пленках ферритов гранатов, в том числе установить факт влияния электрического поля на эти структуры, определить величины управляющего напряжения,
 - Разработать метод исследования динамики движения микромагнитных структур в импульсе электрического поля.
- Исследовать возможность переключения состояния вихря намагниченности в субмикронной частице легкоплоскостного магнитного диэлектрика:
 - разработать способ учета неоднородного магнитоэлектрического эффекта в программах микромагнитного моделирования;
 - рассчитать влияние радиально направленного электрического поля на намагниченность в частице, изучить процессы зарождения и уничтожения различных микромагнитных конфигураций в частице.

- Оценить важные для спинтроники параметры устройств, основанных на неоднородном МЭ эффекте.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Рассчитано распределение поверхностной и объемной плотности электрических зарядов в типичных микромагнитных структурах, наблюдаемых в легкоосных ферромагнетиках: доменных стенках Блоха с ВБЛ.
- Впервые проведено экспериментальное наблюдение смещения доменных стенок и ВБЛ под действием статического поля заряженной иглы, определены управляющие поля и напряжения.
- Исследована динамика движения доменных границ в статическом электрическом поле: зависимость скорости и конечного положения доменной границы от величины приложенного напряжения, исходя из которой рассчитан магнитоэлектрический коэффициент в пленках феррита граната.
- Разработан метод учета неоднородного МЭ взаимодействия в программе микромагнитного моделирования.
- Впервые показана возможность зарождения, стабилизации и уничтожения вихревого и антивихревого распределения намагниченности в субмикронной частице магнитного диэлектрика электрическим полем, а также возможность переключения из антивихревого в вихревое состояние и обратно.
- По результатам микромагнитного моделирования построена гистерезисная зависимость топологического заряда частицы от напряжения на управляющем электроде и показана возможность существования метастабильного состояния при нулевом электрическом поле, позволяющая создать переключаемую электрическим полем ячейку памяти на основе такой частицы.

- Оценены характеристики устройств, основанных на неоднородном МЭ эффекте.

Практическая значимость. Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы как базис для построения устройств магнитной электроники (ячеек памяти, спиновых клапанов, элементов программируемой логики), работающих при комнатной температуре и непосредственно переключаемых электрическим полем без использования токов.

В более широком смысле применение неоднородного магнитоэлектрического эффекта в магнитной электронике может привести к отказу от электрических токов большой плотности, что позволит значительно ослабить ограничения миниатюризации устройств.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- В магнитоэлектрическом веществе вертикальные линии Блоха, помимо поверхностного электрического заряда, присущего стенкам Нееля, обладают объемным зарядом и подвержены действию электрического поля.
- В пленках ферритов гранатов с кристаллографической ориентацией подложки (210) и (110) наблюдаются обратимые смещения доменных стенок (до 5 мкм) под действием электрического поля от металлического электрода диаметром 20 мкм при управляющих напряжениях от 100 В до 1.5 кВ. Направление смещения сменяется на противоположное при изменении полярности электрической напряженности. Возможны также необратимые смещения на расстояния >5 мкм. Эффект не наблюдается в пленках с подложкой (111).
- Разработан метод исследования наносекундной динамики движения доменных границ в поле прямоугольного электрического импульса с коротким фронтом. Динамические исследования движения доменной границы в поле импульса с шириной переднего фронта в 20 нс при различных амплитудах импульса в диапазоне 200–400 В позволили оценить

константу неоднородного МЭ взаимодействия для пленок феррита граната в $10^{-6} \sqrt{\text{эрг/см}}$.

- При помощи компьютерного моделирования показана возможность переключения состояния намагниченности в субмикронной частице магнитного диэлектрика статическим электрическим полем. В зависимости от величины и полярности приложенного поля частица может переключаться в однородное, вихревое и антивихревое состояние.
- Зависимость топологического заряда частицы от электрического напряжения на электроде имеет гистерезисный характер. Расчетные управляющие напряжения для зарождения вихревого (антивихревого) состояния из однородного состояния намагниченности составили 100–150 В при диаметре электрода в 5 нм и намагниченности насыщения материала в 5–50 Гс.
- При изменении намагниченности в частице под действием прямоугольного электрического импульса возникают осцилляторные движения ядра вихря, спектр излучения которых лежит в диапазоне 1–10 ГГц. Частота зависит от величины и полярности импульса. При изменении величины электрического поля от положительных к отрицательным значениям частота осцилляций вихря монотонно возрастает.
- При увеличении намагниченности насыщения материала частицы гистерезисная зависимость становится асимметричной (вихревое состояние становится более выгодным), и при большой намагниченности насыщения однородное и вихревое состояния могут быть метастабильны в отсутствие электрического поля, при этом приложением импульсов электрического поля частицу можно переключать между этими состояниями.
- На базе эффектов движения доменных границ в электрическом поле и переключения субмикронной частицы электрическим полем между двумя метастабильными состояниями возможно построение электриче-

ски управляемых элементов магнитной электроники: элементов памяти, генератора СВЧ-излучения, электромагнитооптического модулятора. Оценки их основных радиофизических характеристик следующие: быстродействие — единицы ГГц, управляющие напряжения — от 0.1 до 150 В, энергия переключения — от 10^{-9} до 5×10^{-16} Дж (собственная энергия переключения, т.е. без учета емкости подводящих проводов — до 10^{-17} Дж), плотности токов — от 10 до 10^4 А/см².

Апробация результатов. Основные результаты, изложенные в диссертации, доложены на следующих конференциях:

1. XX международная школа-семинар «Новые магнитные материалы микроэлектроники», 12–16 июня, 2006, Москва
2. International conference on Magnetism, 20–25 августа, 2006, Япония, Киото
3. Международная конференция студентов, аспирантов, и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов–2007», секция «Физика», 2007, Москва
4. EASTMAG–2007 «Magnetism on a nanoscale», 23–26 августа, 2007, Казань
5. International Conference «Functional Materials», 1–6 октября, 2007, Украина, Крым, Партенит
6. Всероссийская научная конференция студентов-физиков, ВНКСФ-14, 27 марта – 3 апреля, 2008, Уфа
7. Moscow International Symposium on Magnetism, 20–25 июня, 2008, Москва
8. Ломоносовские чтения, секция Физики, 16–25 апреля, 2009, Москва
9. Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах», 28 июня–4 июля 2009, Москва
10. The International Conference on Magnetism, 26–31 июля, 2009, Германия, Карлсруэ
11. Summer School of IEEE Magnetic Society, 20–25 сентября, Китай, Нанкин
12. Научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты инновационных проектов Физического факультета МГУ», 18–19

ноября, 2009, Москва

13. EASTMAG–2010 «Nanospintronics», 28 июля – 2 августа, 2010, Екатеринбург
14. Magnetism and Optics Research International Symposium, 21–24 июня, 2011, Нидерланды, Неймеген
15. Moscow International Symposium on Magnetism, 21–25 августа, 2011, Москва

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах в реферируемых журналах.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 113 страниц, из них 101 страница текста, включая 50 рисунков. Библиография содержит 88 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель и описана структура диссертации, изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

За введением следует **обзор литературы**, в котором рассмотрены теоретические и экспериментальные работы, посвященные неоднородному магнитоэлектрическому (МЭ) эффекту, веществам, проявляющим магнитоэлектрические свойства, эпитаксиальным пленкам ферритов гранатов как перспективным материалам для исследования неоднородного МЭ эффекта. Также в обзоре литературы рассмотрены принципы, лежащие в основе построения устройств магнитной памяти, и вихри намагниченности, возникающие в субмикронных магнитных частицах.

Первая глава посвящена компьютерному моделированию неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия.

Неоднородный магнитоэлектрический эффект характеризуется вкладом в свободную энергию следующего вида (инвариант Лифшица) [20]:

$$F_L = \gamma(\mathbf{E} \cdot [\mathbf{m}(\nabla \cdot \mathbf{m}) - (\mathbf{m} \cdot \nabla)\mathbf{m}]). \quad (1)$$

где m — вектор намагниченности, нормированный на намагниченность насыщения M_s , E — вектор напряженности электрического поля, а γ — константа неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия. Как видно из этой формулы, $F_L \neq 0$ только в области магнитных неоднородностей (например, доменных стенок) и не проявляется в однородно намагниченных областях (например, доменах).

По объемной плотности свободной энергии (1) можно найти распределение электрической поляризации, и, соответственно, объемную плотность электрических зарядов, связанную с магнитной неоднородностью. С помощью расчета зарядовой плотности показано, что вертикальные блоховские линии в доменных стенках должны обладать объемным электрическим зарядом. Следовательно, они, как и доменные стенки Нееля, могут быть подвержены действию электрического поля, и этот факт следует учитывать при планировании эксперимента.

Для анализа динамики поведения магнитоэлектрических систем необходимо проводить микромагнитное моделирование. При этом неоднородный МЭ эффект можно учесть, прибавив его вклад к эффективному магнитному полю при решении уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта. Этот вклад описывается следующим выражением:

$$H_i^{ME} = \frac{\gamma}{M_s} \left[2 \left(E_i \frac{\partial m_j}{\partial x_j} - E_j \frac{\partial m_j}{\partial x_i} \right) - m_j \left(\frac{\partial E_j}{\partial x_i} - \frac{\partial E_i}{\partial x_j} \right) \right]. \quad (2)$$

Основываясь на этом, автор провел микромагнитное моделирование жизненного цикла (зарождения, стабилизации и уничтожения) магнитных вихрей в субмикронной частице в статическом электрическом поле. Расчет проводился в микромагнитном пакете SpinPM [21]. Автор разработал дополнительный модуль, учитывающий вклад неоднородного МЭ взаимодействия (2).

В качестве объекта была выбрана цилиндрическая частица магнитного диэлектрика диаметром около 100 нм с анизотропией типа «легкая плос-

кость». Намагниченность насыщения в частицы варьировалась в пределах 5×50 Э, обменная константа — $3 \cdot 10^{-7}$ эрг/см, а константа анизотропии $K_1 = -10^5$ эрг/см³. Эти параметры типичны для магнитных диэлектриков с высокой температурой магнитного упорядочения, к примеру, феррита висмута.

Геометрия численного эксперимента показана на рис. 1. К частице прикладывалось электрическое поле, моделирующее поле заряженной нити, проходящей перпендикулярно частице через ее центр. Радиус частицы R составлял 120 нм, высота $H = 10$ нм, диаметр нити $d = 5$ нм. Шаг расчетной схемы по осям x и y составлял 2 нм, по оси z разбиение на элементарные интервалы не производилось.

Отметим, что, как видно из формулы 2, при полностью однородном состоянии намагниченности в частице H_{ME} будет равно нулю: первый член в скобках будет равен нулю из-за однородности \mathbf{m} , а второй член в потенциальном электрическом поле также будет равен нулю. Поэтому в частицу была введена небольшая область с дефектом намагниченности, чтобы избавиться от такой «патовой» ситуации. Этот прием физически оправдан из-за наличия большого числа дефектов в кристаллической решетке магнетиков.

Моделирование показало, что напряжения в 150 В позволяют зарождать вихри в частице, в свободном состоянии имеющей квазиоднородное распределение намагниченности. При приложении напряжения противоположного знака в частице зарождается антивихрь — топологический антипод вихря (рис. 2). Он имеет противоположный топологический заряд S : полное изменение полярного угла наклона намагниченности по контуру, окружающему центр вихря (для однородного состояния $S = 0$).

Зависимость топологического заряда частицы от электрического поля имеет гистерезисный вид (рис. 3), причем зависимость асимметрична тем больше, чем больше влияние полей размагничивания. В материале с большой намагниченностью насыщения можно добиться существования двух метастабильных состояний при нулевом электрическом поле, что может служить основой для устройств энергонезависимой магнитной памяти.

В процессе переключения намагниченности в частице наблюдаются ос-

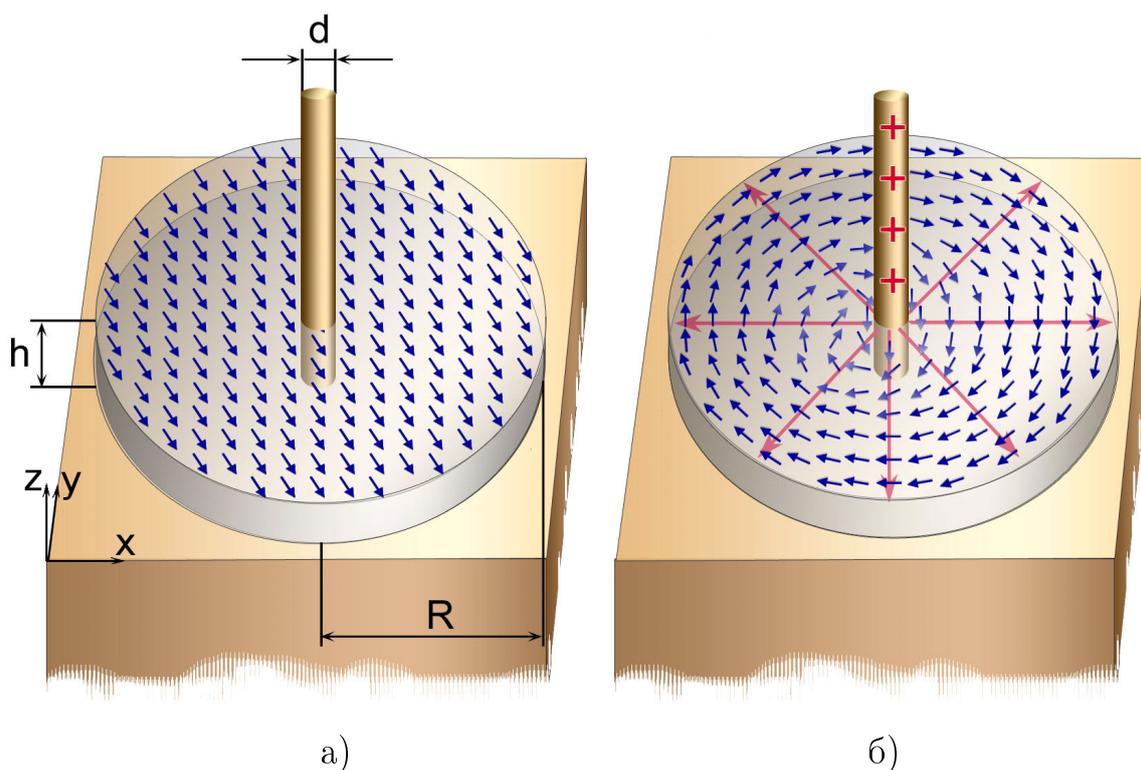


Рис. 1. Геометрия численного эксперимента по электрическому управлению вихрем в магнитной частице. R и h — радиус и высота частицы, d — диаметр электрода, подводящего напряжение (нити). (а) Геометрия эксперимента, состояние частицы в отсутствие потенциала на игле. (б) Зарождение вихревого состояния частицы при положительном потенциале на электроде. Радиальными стрелками показано направление электрического поля.

цилляторные движения ядра вихря в частотах порядка 1–10 ГГц, частота которых зависит от напряженности приложенного электрического поля, что делает возможным электрическую модуляцию частоты генераторов СВЧ-излучения, основанных на движении магнитных вихрей.

Во второй главе содержится описание и результаты экспериментов по перемещению доменных границ и вертикальных блоховских линий статическим электрическим полем в эпитаксиальных пленках ферритов гранатов.

Как показано в первой главе, эти структуры в веществе с неоднородным МЭ взаимодействием должны обладать электрической поляризацией и быть подвержены действию электрического поля. В качестве образцов были выбраны эпитаксиальные пленки феррита граната $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ (толщина порядка 10 мкм), выращенные на подложках из гадолиний-галлиевого грана-

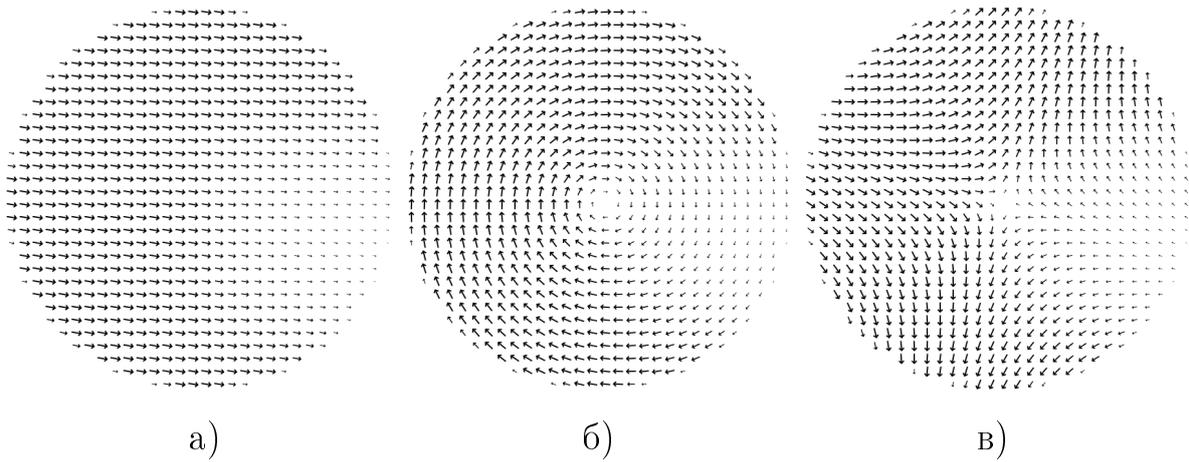


Рис. 2. Состояние намагниченности в частице: (а) при отсутствии напряжения на электроде, (б) при положительном напряжении, (в) при отрицательном напряжении. Стрелками показаны направления намагниченности, усредненные по четырем соседним расчетным ячейкам. В правой части частицы видны искажения, вызванные дефектом.

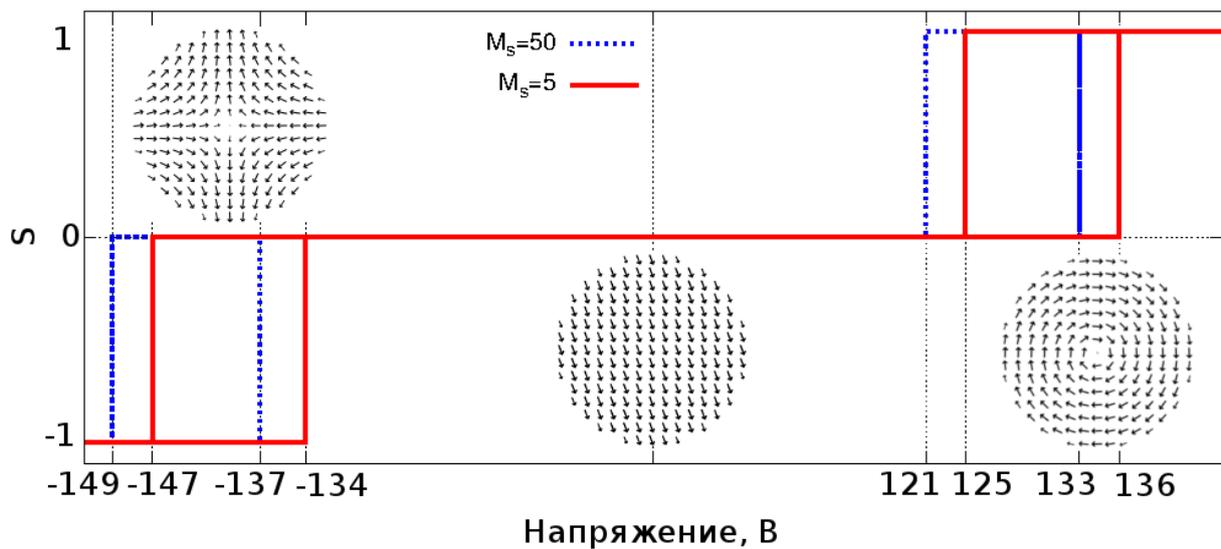


Рис. 3. Гистерезисная зависимость топологического заряда частицы S от электрического напряжения, приложенного к электроду, при двух значениях намагниченности насыщения материала.

та $Gd_3Ga_5O_{12}$ с различной кристаллографической ориентацией [22]. Толщина подложки составляла $\sim 0,5$ мм. Для создания электрического поля большой напряженности в диэлектрической пленке феррита граната использовалась медная проволока толщиной ~ 50 мкм с заостренным концом, касающаяся

поверхности образца (рис. 4). Диаметр острия получаемой «иглы» составлял ~ 20 мкм.

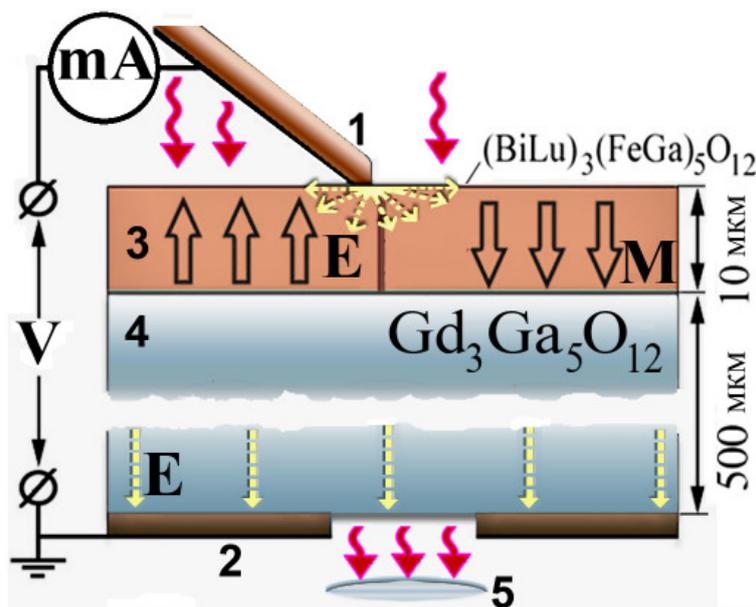


Рис. 4. Схематическое изображение геометрии эксперимента, конфигураций электрического поля и намагниченности. Электрическое поле (силовые линии показаны штриховыми стрелками) формируется в диэлектрической среде образца между иглой (1) и диафрагмой из металлической фольги (2), выполняющей роль заземляющего электрода; максимальной напряженности (свыше 1 МВ/см) поле достигает в магнитной пленке (3) вблизи иглы, быстро спадая в толще подложки (4), и у заземленного электрода (2) не превышает 600 В/см. Широкими стрелками показано распределение намагниченности в пленке: доменная стенка разделяет два домена с противоположным направлением намагниченности. Острие иглы касается поверхности феррит-граната вблизи места расположения доменной границы. Волнистыми стрелками показана лазерная подсветка, 5 — объектив микроскопа.

Для наблюдения доменной структуры был использован магнитооптический поляризационный метод, основанный на эффекте Фарадея. Для наблюдения в проходящем свете в заземляющем электроде было сделано отверстие диаметром ~ 0.3 мм. Изображение магнитной структуры через микроскоп фокусировалось на фотокатод электронно-оптического усилителя яркости и считывалось с его экрана ПЗС-камерой, соединенной с персональным компьютером.

В эксперименте фиксировалось статическое распределение намагниченности до и после включения электрического поля. В результате измерений

были получены пары изображений (кадров), снятые при различной полярности электрического напряжения и положении иглы. При подаче постоянного напряжения величиной в 100–1500 В между иглой и подложкой наблюдалось локальное смещение доменной стенки в месте расположения иглы (рис. 5). Наблюдались обратимые (исчезающие при снятии напряжения) смещения стенки на расстояния вплоть до 5 мкм, а также необратимые смещения.

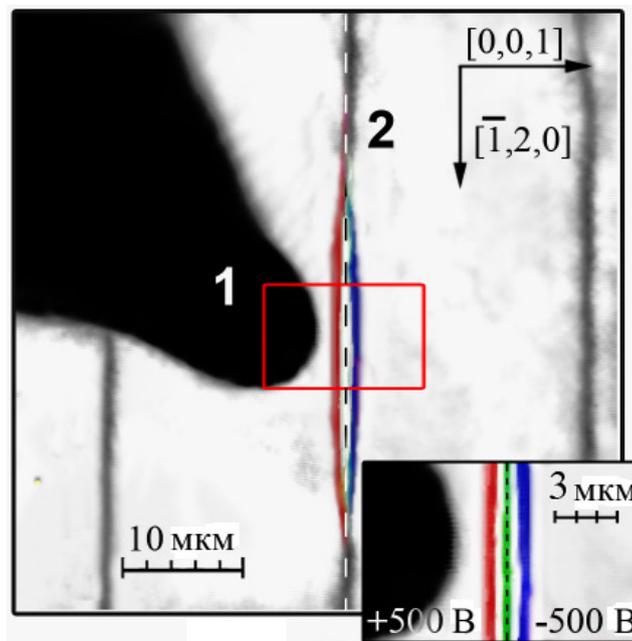


Рис. 5. Смещение доменной стенки под действием электрического поля. 1 — игла, 2 — доменная стенка, светлые области — однородно намагниченные домены. Штриховой линией (зеленой в цветной версии) показано исходное положение стенки (при напряжении $U = 0$). Левое положение (красным в цветной версии) — положение при $U = +500$ В, правое положение (синим) — при $U = -500$ В.

Было проведено исследование динамики движения доменных границ в поле электрического импульса с коротким фронтом при помощи метода высокоскоростной фотографии с синхронизованной лазерной подсветкой, которое позволило определить скорость движения доменных границ: 14 ± 3 , 29 ± 5 и 44 ± 4 м/с при напряжениях в 200, 300 и 400 вольт соответственно (рис. 6). Константа неоднородного МЭ взаимодействия для пленок феррита граната (210), рассчитанная на основе полученных данных, составила $10^{-6} \sqrt{\text{эрг/см}}$.

Качественные особенности эффекта дают дополнительные сведения об

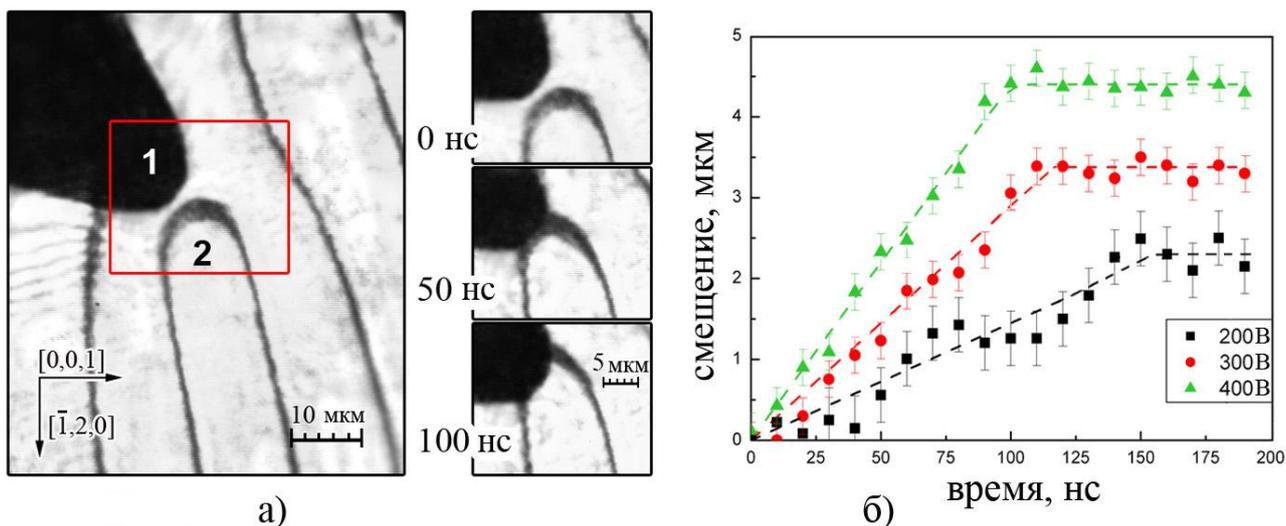


Рис. 6. Зависимость положения доменной границы, движущейся под действием импульса электрического поля, от времени. а) Фотографии положения доменной границы (2) в момент включения электрического импульса, через 50 и 100 нс после включения импульса. 1 — игла. б) Графики движения стенок (зависимости смещения от времени) при трех значениях амплитуды электрического импульса: 200, 300 и 400 В.

исследуемой системе. Наличие эффекта в пленках с ориентацией подложки (210) и (110) при отсутствии в пленках (111) подтверждает влияние анизотропии на доменные стенки в пленках ферритов гранатов: они не являются ни чисто блоховскими, ни чисто неелевскими, поскольку намагниченность в доменах наклонена под углом к нормали пленки [23]. Четность эффекта по намагниченности и нечетность по электрическому полю позволяет отличить неоднородный МЭ эффект от других эффектов, которые могли бы вызывать смещения доменных границ.

Также было продемонстрировано влияние электрического поля на ВБЛ.

В главах 1 и 2 были описаны эффекты, дающие возможность изменять намагниченность в веществе статическим электрическим полем. Такая возможность привлекательна для создания устройств магнитной электроники, таких как ячейки MRAM (магнитной памяти произвольного доступа). Однако к подобным устройствам предъявляются такие требования, как быстродействие, малая диссипация энергии, малые размеры, низкие управляющие напряжения. Для прогноза успешности и пригодности устройств, основанных

на неоднородном магнитоэлектрическом эффекте, для задач магнитной электроники, необходимо оценить их соответствие этим требованиям.

В третьей главе были представлены схемы работы устройств, которые могут быть основаны на эффектах, описанных в главах 1 и 2, и сделаны оценки их свойств.

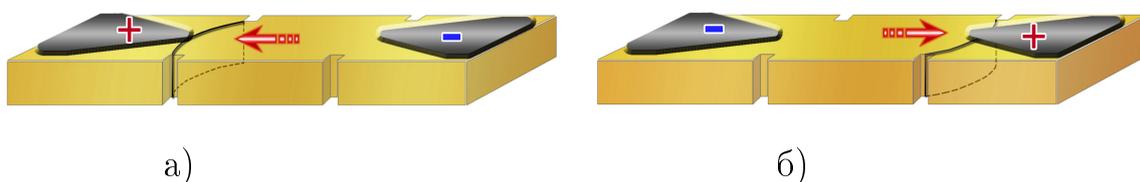


Рис. 7. Ячейка памяти, управляемая электрическим полем. В слое магнитного диэлектрика с большим неоднородным МЭ эффектом созданы 2 дефекта, задающие два метастабильных положения доменной стенки, между которыми ее можно перемещать электрическим полем. Рис. а) и б) — два состояния устройства, соответствующие логическому «0» и «1».

Эффект зарождения и уничтожения вихревого состояния в цилиндрической частице может быть использован для записи информации. При этом метастабильные однородное и вихревое состояния могут представлять значения «1» и «0». Различение этих состояний при считывании обеспечивают существенно разные величины полей рассеяния у этих состояний.

На эффекте движения доменных границ также могут быть основаны ячейки энергонезависимой памяти, если создать в ячейке два дефекта, между которыми стенку можно будет перемещать электрическим полем (рис. 7).

Основное ограничение на быстродействие этих устройств накладывает время перемагничивания материала, а в энергию записи, в связи с большими значениями управляющего напряжения, наибольший вклад вносит энергия перезарядки электрода. Характеристики этих устройств, наряду с характеристиками устройств магнитной памяти, основанных на других эффектах [2], представлены в таблице 1.

Наряду с устройствами памяти в третьей главе рассматриваются оптические модуляторы, основанные на движении доменных стенок и импульсные генераторы СВЧ-излучения с перестраиваемой электрическим полем частотой.

Таблица 1. Сравнение неоднородного МЭ эффекта с другими технологиями построения устройств памяти

	DRAM	Flash (NOR)	Flash (NAND)	FeRAM	MRAM	STT-RAM ¹	МЭ стенки ²	МЭ вихри ²
Энергозависимость	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Размер ячейки ³	6–10	10	5	15–34	16–40	6–20	300 нм	100 нм
Время чтения (нс)	30	10	50	20–80	3–20	2–20	2–20 ⁴	2–20 ⁴
Время записи / стирания (нс)	50	1 мкс / 10 мс	1 мс / 0,1 мс	50	3–20	2–20	1	0,5
Кол-во циклов перезаписи	10 ¹⁶	10 ⁵	10 ⁵	10 ¹²	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	? ⁵	? ⁵
Энергия записи	Низкая	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая	Низкая	Высокая
Напряжение (В)	2	6–8	16–20	2–3	3	<1.5	0.1–100	150
Плотность тока, А/см ²					10 ⁷ –10 ⁸	10 ⁶ –10 ⁷	10 ¹	3×10 ⁴

¹ Находится на стадии прототипа.

² Находятся на стадии идеи.

³ Размер ячейки указан в структурных единицах F^2 , заданных возможностями технологического процесса. F — минимальный линейный размер детали литографического изображения. Для МЭ устройств указан размер в нанометрах.

⁴ Время чтения для МЭ устройств аналогично устройствам STT-RAM, т.к. чтение основано на том же принципе.

⁵ Надежность МЭ устройств экспериментально не проверялась, однако в них отсутствует механизм износа, имеющийся в зарядовых устройствах типа Flash.

Выводы

1. Экспериментальные исследования показали, что в магнитных диэлектриках возможно управление доменными стенками и вертикальными блоховскими линиями при помощи статических электрических полей.

- В магнитоэлектрическом веществе вертикальные линии Блоха обладают поверхностным и объемным зарядом.
- В пленках ферритов гранатов с кристаллографической ориентацией подложки (210 и (110) наблюдаются обратимые смещения доменных стенок (до 5 мкм) под действием электрического поля от металлического электрода диаметров 20 мкм при управляющих напряжениях от 100 В до 1.5 кВ. Направление смещения сменяется на противоположное при изменении полярности электрической напряженности. Возможны также необратимые смещения на расстояния

>5 мкм. Эффект не наблюдается в пленках с подложкой (111).

- Исследования динамики движения доменной границы в поле прямоугольного электрического импульса с коротким фронтом методом высокоскоростной фотографии при различных амплитудах импульса в диапазоне 200–400 В позволяют оценить константу неоднородного МЭ взаимодействия для пленок феррита граната в $10^{-6} \sqrt{\text{эрг/см}}$.
- Смещение ВБЛ вдоль доменной стенки электрическим полем также возможно.

2. Численное моделирование показало, что в субмикронных частицах магнитных диэлектриков электрическим полем можно переключать состояния намагниченности между квазиоднородным, вихревым и антивихревым.

- Зависимость топологического заряда частицы от электрического напряжения на электроде имеет гистерезисный характер. Расчетные управляющие напряжения для зарождения вихревого (антивихревого) состояния из однородного состояния намагниченности составляют 100–150 В при диаметре электрода в 5 нм и намагниченности насыщения материала в 5–50 Гс.
- При увеличении намагниченности насыщения материала однородное и вихревое состояния частицы становятся метастабильными при нулевом электрическом поле, и возможно переключение электрическим полем между этими состояниями.

3. На основе продемонстрированных эффектов возможно создание устройств спинтроники, работающих на частотах порядка 1 ГГц и использующих полевой принцип управления: генератора СВЧ-излучения, электромагнитнооптического модулятора, элементов памяти.

**Основные результаты диссертации отражены в
следующих публикациях:**

1. Logginov A. S., Meshkov G. A., Nikolaev A. V. et al. Electric field control of micromagnetic structure // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. Vol. 310, no. 2. Pp. 2569–2571.
2. Логгинов А. С., Мешков Г. А., Николаев А. В., Пятаков А. П. Магнито-электрическое управление доменными границами в пленке феррита граната // *Письма в ЖЭТФ*. 2007. Т. 86, № 2. С. 124–127.
3. Звездин А. К., Логгинов А. С., Мешков Г. А., Пятаков А. П. Мультиферроики: перспективные материалы микроэлектроники, спинтроники и сенсорной техники // *Известия РАН, серия физическая*. 2007. Т. 71, № 11. С. 1604–1605.
4. Logginov A. S., Meshkov G. A., Nikolaev A. V. et al. Room temperature magnetoelectric control of micromagnetic structure in iron garnet films // *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 93. P. 182510.
5. Logginov A., Meshkov G., Nikolaev A. et al. Electric Field Driven Magnetic Domain Wall Motion in Iron Garnet Films // *Solid State Phenomena*. 2009. Vol. 152–153. Pp. 143–146.
6. Pyatakov A. P., Sergeev A. S., Sechin D. A. et al. Magnetic domain wall motion triggered by electric field // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2010. Vol. 200. P. 032059.
7. Пятаков А. П., Мешков Г. А., Логгинов А. С. О возможности зарождения в магнитных диэлектриках магнитных вихрей и антивихрей с помощью электрического поля // *Вестник Московского Университета, Серия 3 Физика и Астрономия*. 2010. Т. 4. С. 91–93.
8. Pyatakov A. P., Meshkov G. A. The Influence of Electric Field on Magnetic Vortices in Confined Magnetic Structures // *PIERS Online*. 2010. Vol. 6, no. 6. Pp. 582–584.
9. Meshkov G. A., Pyatakov A. P., Belanovsky A. D. et al. Writing vortex memory bits using electric field // *Journal of the Magnetism Society of Japan*. 2011.

doi: 10.3379/msjmag.1108M009.

10. Pyatakov A. P., Meshkov G. A., Zvezdin A. K. Electric polarization of magnetic textures: new horizons of micromagnetism // ЖММ. 2011. (in print).
11. Звездин А. К., Логгинов А. С., Мешков Г. А., Пятаков А. П. Мультиферроики: перспективные материалы микроэлектроники, спинтроники и сенсорной техники // Новые магнитные материалы микроэлектроники, сборник трудов XX международной школы-семинара. Москва: 2006. — 12–16 июня. С. 575.
12. Logginov A. S., Nikolaev A. V., Zvezdin A. K. et al. Electric field control of submicron magnetic structures // International conference on Magnetism, Abstracts. Vol. PSMo-J-441. Kyoto, Japan: 2006. — August 20–25. P. 234.
13. Мешков Г. А. Управление микромагнитными структурами при помощи электрического поля // Международная конференция студентов, аспирантов, и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2007», секция «Физика», сборник тезисов. Москва: 2007. — 11–14 апреля. С. 259.
14. Meshkov G. A., Pyatakov A. P., Nikolaev V. A., Logginov A. S. Magnetoelectric control of magnetic domain wall structure // EASTMAG-2007 «Magnetism on a nanoscale», Abstract Book. Kazan: 2007. — 23–26 August. P. 38.
15. Pyatakov A. P., Nikolaev A. V., Meshkov G. A., Logginov A. S. Electric field induced micromagnetic structure transformation in ferrite garnet films // International Conference «Functional Materials», ICFM-2007, Abstracts. Ukraine, Crimea, Partenit: 2007. — October 1–6. P. 218.
16. Мешков Г. А. Действие электрического поля на статические и динамические микромагнитные структуры // ВНКСФ-14, сборник тезисов. Уфа: 2008. — 27 марта – 3 апреля. С. 318–320.
17. Logginov A., Meshkov G., Nikolaev A. et al. Electric Field Driven Magnetic Domain Wall Motion in Ferrite Garnet Films // Moscow International Symposium on Magnetism, Books of Abstract. Moscow: 2008. — June 20–25. P. 645.
18. Пятаков А. П., Мешков Г. А., Николаева Е. П. et al. Движение магнитных

доменных границ под действием электрического поля // Ломоносовские чтения, секция Физики. Москва: 2009. — 16–25 апреля. Р. 79.

19. Мешков Г. А., Пятаков А. П., Николаева Е. П. и др. Управление микромагнитной структурой при помощи электрического поля, // Сборник трудов конференции НМММ-21. Москва: 2009. — 28 июня–4 июля. С. 312.
20. Pyatakov A. P., Nikolaeva E. P., Meshkov G. A. et al. Magnetic domain wall motion triggered by electric field // The International Conference on Magnetism — ICM 2009. Karlsruhe, Germany: 2009. — July 26–31. P. 232.
21. Meshkov G. A., Pyatakov A. P., Nikolaev A. V. et al. Magnetic domain wall motion induced by electric field // Summer School of IEEE Magnetic Society. Nanjing, China: 2009. — 20–25 Sep.
22. Пятаков А. П., Мешков Г. А., Сечин Д. А. и др. Электрическое управление микромагнитной структурой как принцип работы элементов энергосберегающей памяти // Сборник трудов Научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты инновационных проектов Физического факультета МГУ». Москва: 2009. — 18–19 ноября. С. 45.
23. Pyatakov A. P., Sechin D. A., Sergeev A. S. et al. Ferroelectricity of micro-magnetic structure // EASTMAG 2010, Book of Abstract. Ekaterinburg: 2010. — June 28 – July 2. P. 171.
24. Pyatakov A. P., Meshkov G. A., Belanovskiy A. D., Zvezdin K. A. Electric switching of vortex/antivortex state in magnetic nanodots // MORIS. Nijmegen, Netherlands: 2011. — June 21–24.
25. Meshkov G. A., Belanovsky A. D., Pyatakov A. P., Zvezdin K. A. Switching of topological charge of magnetic submicron particles in vortex state // Moscow International Symposium on Magnetism, Book of Abstracts. Moscow: 2011. — Aug 21–25. P. 364.

Список цитируемой литературы

1. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 12. С. 1336.

2. Wolf S A, Lu Jiwei, Stan M R et al. The Promise of Nanomagnetism and Spintronics for Future Logic and Universal Memory // Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 98, no. 12. Pp. 2155–2168.
3. Mostovoy M. Ferroelectricity in Spiral Magnets // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96, no. 6. P. 067601.
4. Антонов Л. И., Миронова Г. А., Лукашева Е. В. et al. Численное моделирование микромагнитных структур в ферромагнитных пленках: препринт 2/1999. Москва: Физический факультет МГУ, 1999.
5. Барьяхтар В. Г., Львов В. А., Яблонский Д. А. Теория неоднородного магнитоэлектрического эффекта // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37, № 12. С. 565–567.
6. Khalfina A. A., Shamsutdinov M. A. Long-periodic magnetic structure in magnetoelectrics // Ferroelectrics. 2002. Vol. 279. Pp. 19–31.
7. Dzyaloshinskii I. Magnetoelectricity in ferromagnets // EPL. 2008. Vol. 83, no. 6.
8. Tanygin B.M. Symmetry theory of the flexomagnetoelectric effect in the magnetic domain walls // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2010.
9. Shamsutdinov M. A., Kharisov A. T., Nikolaev Y. E. Structure and dynamics of a domain wall in a ferromagnet with an inhomogeneous magnetoelectric interaction // The Physics of Metals and Metallography. 2011. Vol. 111, no. 5. Pp. 451–457.
10. Кричевцов Б. Б., Павлов В. В., Писарев Р. В. Гигантский линейный магнитоэлектрический эффект в пленках ферритов-гранатов // Письма в ЖЭТФ. 1989. Vol. 49, no. 8. Pp. 466–469.
11. Koronovsky V. E., Ryabchenko S. M., Kovalenko V. F. Electromagneto-optical effects on local areas of a ferrite-garnet film // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. P. 72402.
12. Ghoshal U. Sh. Apparatus, system and method for writing information onto magnetic media field of the invention. US Patent Number 6535342. 2003.
13. Jia CL., Berakdar J. Multiferroic oxides-based flash memory and spin-field-effect transistor // Applied Physics Letters. 2009. Vol. 95, no. 1.

14. Stolichnov I., Riester S. W. E., Trodahl H. J. et al. Non-volatile ferroelectric control of ferromagnetism in (Ga, Mn)As // *Nature Materials*. 2008. Vol. 7, no. 6. Pp. 464–467.
15. Бичурин М. И., Петров В. М., Филиппов Д. А. и др. Магнитоэлектрические материалы. М.: Академия Естествознания, 2006.
16. Karpinsky D. V., Pullar R. C., Fetisov Y. K. et al. Local probing of magnetoelectric coupling in multiferroic composites of BaFe₁₂O₁₉–BaTiO₃ // *Journal of Applied Physics*. 2010. Vol. 108, no. 4. P. 042012.
17. Zheng H., Wang J., Lofland S. E. et al. Multiferroic BaTiO₃–CoFe₂O₄ nanostructures // *Science*. 2004. Vol. 303, no. 5658. Pp. 661–663.
18. Pribiag V. S., Krivorotov I. N., Fuchs G. D. et al. Magnetic vortex oscillator driven by d.c. spin-polarized current // *Nature Physics*. 2007. Vol. 3, no. 7. Pp. 498–503.
19. Dussaux A., Georges B., Grollier J. et al. Large microwave generation from current-driven magnetic vortex oscillators in magnetic tunnel junctions // *Nat Commun*. 2010. Vol. 1. P. 8.
20. Sosnowska I., Zvezdin A. K. Origin of the long period magnetic ordering in BiFeO₃ // *JMMM*. 1995. Vol. 167. Pp. 140–144.
21. Khvalkovskiy A. V., Grollier J., Locatelli N. et al. Nonuniformity of a planar polarizer for spin-transfer-induced vortex oscillations at zero field // *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 96, no. 21. P. 212507.
22. Балбашов А. М., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г. Свойства пленок ферритов-гранатов с (210)-ориентацией: препринт 25(500), с. 26. Москва: АН СССР, Институт радиотехники и электроники, 1988.
23. Дикштейн И. Е., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г., Чижик Е. С. Наведенная и магнитокристаллическая анизотропия эпитаксиальных магнитных пленок: препринт 17(492), с. 28. Москва: АН СССР, Институт радиотехники и электроники, 1988.