

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



ШИЛИНГ Галина Сергеевна

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ АНИЗОТРОПИИ
НА ФОРМИРОВАНИЕ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР
В ОДНООСНЫХ МАГНЕТИКАХ**

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена на кафедре физики физико-математического факультета ФГБОУ ВПО «Алтайская государственная академия образования имени В.М. Шукшина»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент **Толстобров Юрий Вениаминович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Пастушенков Юрий Григорьевич**
Тверской государственной университет

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Рыжов Вячеслав Анатольевич
Петербургский институт ядерной физики,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

Ведущая организация: Оренбургский государственный университет

Защита состоится «12 » декабря 2013 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.232.44 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199004, Санкт-Петербург, Средний пр. В.О., д. 41/43, ауд. 304.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке имени М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь совета Д 212.232.44
по защите докторских и кандидатских диссертаций,
доктор физико-математических наук

 Л. В. Яснов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Одним из важных направлений физики твердого тела является исследование новых возможностей использования магнитных материалов для различных нужд техники. В связи с развитием нанотехнологий и постоянной миниатюризацией устройств на основе магнитных материалов всё большую роль играет влияние поверхностной анизотропии на их эксплуатационные характеристики. В частности, это касается влияния поверхностной анизотропии на формирование доменных структур одноосных высокоанизотропных магнетиков.

Изучение этой проблемы возможно в рамках широко используемой теории микромагнетизма, большой вклад в развитие которой внесли Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц, У. Ф. Браун, Ф. Элмор, Е.И. Кондорский и многие другие. Поэтому разработка и реализация методики численного моделирования в рамках теории микромагнетизма, позволяющая рассмотреть влияние поверхностной анизотропии на формирование доменных структур одноосных магнетиков представляется весьма актуальной.

Цель настоящего исследования - численное моделирование влияния поверхностной магнитной анизотропии на доменные структуры одноосных магнитных материалов. В соответствии с целью, были поставлены и решены следующие **задачи**:

- разработка численной (математической) методики вычисления распределения полей намагниченности в одноосных магнетиках с учетом различных типов поверхностной магнитной анизотропии;
- проведение компьютерного моделирования доменных структур в образцах магнитных материалов;
- исследование возможности магнитной записи на доменных границах с учетом влияния поверхностной анизотропии;
- теоретический анализ и интерпретация полученных результатов моделирования.

Объекты и предмет исследования. *Объектом* диссертационного исследования стали образцы одноосных магнитных материалов, имеющие сечение прямоугольной формы. *Предметом* исследования является изучение влияния по-

верхностной анизотропии разных типов на формирование доменных структур магнетиков.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- усовершенствована трехмерная модель вычисления распределения намагниченности в одноосных магнетиках с учетом различных типов поверхностной анизотропии;

- методом компьютерного моделирования получены результаты влияния поверхностной анизотропии на доменные структуры в тонких пластинах и бесконечных монокристаллических призмах;

- исследована возможность магнитной записи на доменных границах с учетом влияния поверхностной анизотропии.

Теоретическая и практическая ценность работы. Результаты диссертационного исследования способствуют развитию представлений о закономерностях и механизмах формирования экспериментально наблюдаемых доменных структур в магнитных материалах и могут быть использованы при проектировании магнитных систем. Результаты исследования по влиянию поверхностной анизотропии на магнитную запись на доменных границах монокристаллической пленки позволяют оценить возможности нового метода записи информации и могут использоваться в практических разработках.

Достоверность полученных результатов обеспечивается физической корректностью постановки и решения задач диссертации, а также использованием строгих математических методов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. метод расчета доменных структур одноосных магнетиков с учетом влияния поверхностной анизотропии разных типов.

2. Результаты моделирования доменных структур образцов одноосных магнетиков с учетом влияния поверхностной анизотропии разных типов:

- в монокристаллических бесконечных призмах влияние поверхностной анизотропии распространяется на поверхностные и приповерхностные слои материала;

- для образцов магнетиков в виде прямоугольных тонких пластин, учет поверхностной анизотропии может приводить к качественным изменениям вида доменных границ и самих доменных структур;

- магнитная запись на доменных границах монокристаллической пленки возможна в присутствии поверхностной анизотропии.

3. Негативные факторы влияния поверхностной анизотропии на магнитную запись и способы их нейтрализации.

Личный вклад автора состоит в разработке метода расчета доменных структур образцов одноосных магнетиков, проведении численного моделирования и интерпретации полученных результатов, а также в подготовке публикаций по результатам работы.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на: 9-й региональной научно-практической конференции аспирантов, студентов и учащихся «Наука и образование: проблемы и перспективы» (Бийск, 2007); Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука – третье тысячелетие» (Красноярск, 2007); II Всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные науки и образование» (Бийск, 2008); пятой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 2009); III Всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные науки и образование» (Бийск, 2010); I международной научно-практической конференции «Фундаментальные науки и образование» (Бийск, 2012 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ. По теме диссертационного исследования получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ соавторстве.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, разделенных на параграфы, заключения и списка литературы, включающего 141 наименование. Работа изложена на 114 страницах текста, содержит 28 рисунков и одну таблицу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность работы, сформулированы цель и

задачи исследования, указана научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава «Основные представления о поверхностной анизотропии магнетиков» содержит подробное теоретическое описание ключевого понятия работы – магнитной поверхностной анизотропии. Приведены описательные формулы, дана классификация.

Во второй главе «Поверхностная анизотропия в бесконечно длинных монокристаллических стержнях» представлен метод вычисления распределения намагниченности в поперечном сечении $L \times L$ бесконечного монокристаллического стержня. Предполагается, что распределение намагниченности \mathbf{M} одинаково в любом поперечном сечении.

Задача решалась путем нахождения стационарных решений уравнения Ландау-Лифшица:

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \tau} = -\mathbf{m} \times \mathbf{H} - \alpha \mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{H}), \quad (2.1)$$

где $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_s$, $M_s = |\mathbf{M}|$ – намагниченность насыщения, $\tau = t\gamma M_s$, t – время, γ – гиромагнитное отношение,

$$\mathbf{H} = -\nabla U + \frac{2A}{M_s^2 L^2} \Delta \mathbf{m} + \mathbf{w}(\mathbf{m} \cdot \mathbf{w})(2K_1 + 4K_2(1 - (\mathbf{m} \cdot \mathbf{w})^2)) / M_s^2$$
 - вектор эффективного поля,

U - потенциал собственного поля, A – константа обмена, \mathbf{w} – единичный вектор оси легкого намагничивания (ОЛН), K_1, K_2 - константы внутриобъемной анизотропии. Параметр α определяет вклад диссипативного члена. Результаты работы получены при $\alpha = 0.15$. В качестве граничного условия для уравнения (2.1)

использовалась формула $\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial (-\mathbf{n})} = \bar{K}_s (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}) [\mathbf{n} - (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{m}]$, где \mathbf{n} – внешняя нормаль к поверхности боковой грани, $\bar{K}_s = LK_s/(2A)$, K_s – коэффициент поверхностной анизотропии, который вычислялся по формуле [1]: $|K_s| = l\pi M_s^2$, $l \sim 10^2 \text{ \AA}$. Знак $K_s > 0$ соответствует поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость», а $K_s < 0$ - поверхностной анизотропии типа «легкая ось».

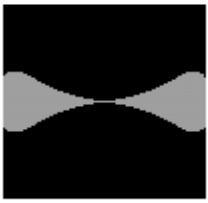
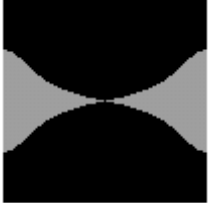
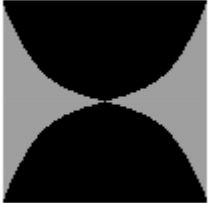
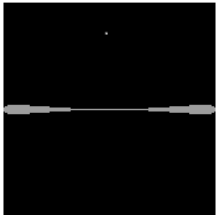
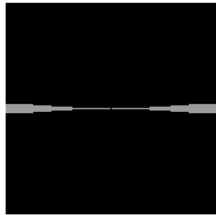

При численном решении задачи, уравнение (2.1) аппроксимировалось на двумерной сетке с постоянным шагом h обычной явной конечно-разностной схемой.

Результаты моделирования получены при следующих параметрах магнетиков: а) $A=1.3 \times 10^{-6}$ Эрг/см, $M_s=1420$ Гс, $K_1=4.0 \times 10^6$ Эрг/см³, $K_2=1.2 \times 10^6$ Эрг/см³, $L=127_{нм}$ б) $A=1.7 \times 10^{-6}$ Эрг/см, $M_s=1275$ Гс, $K_1=4.5 \times 10^7$ Эрг/см³, $K_2=6.6 \times 10^6$ Эрг/см³, $L=150_{нм}$. Что соответствует параметрам монокристаллов Co и Nd₂Fe₁₄B, соответственно.

В качестве начального условия выбрано поле намагниченности **M** ориентированное ортогонально плоскости сечения стержня с небольшим случайным отклонением от нормали. Большинство случайных выборок при указанных размерах образцов, приводит к состояниям с двумя или тремя основными доменами, ориентированными вдоль ОЛН.

В таблице 1 приведены результаты расчетов. Темным цветом обозначены векторы намагниченности, направленные преимущественно вдоль ОЛН, светлым цветом - направленные преимущественно поперек ОЛН. Изображения приведены в масштабе «один вектор – один пиксель».

Таблица 1. Поля вектора намагниченности в поперечном сечении стержня. ОЛН направлена горизонтально

	$K_s < 0$	$K_s = 0$	$K_s > 0$
Co			
Nd ₂ Fe ₁₄ B			

Результаты моделирования приводят к следующим выводам:

- 1) влияние поверхностной анизотропии в бесконечном стержне распространяется на поверхностные и приповерхностные слои материала, не оказывая кардинального влияния на вид доменной структуры;
- 2) поверхностная анизотропия типа «легкая плоскость» действует таким образом, что происходит расширение замыкающих доменов (ориентированных по-

перек ОЛН), поверхностная анизотропия типа «легкая ось» приводит к их сужению (по сравнению со случаем $k_s=0$);

3) в высокоанизотропном материале ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) поверхностная анизотропия оказывает влияние только лишь на узкий поверхностный слой. В умеренно анизотропном материале (Co) ее воздействие более существенно, и распространяется на большую глубину.

Полученные результаты объясняются следующим образом. Действие поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» ориентирует векторы намагниченности по поверхности образца. В связи с этим, векторы намагниченности на левой и правой гранях «прижимаются» к поверхности образца, увеличивая размер замыкающих доменов. Поверхностная анизотропия типа «легкая ось» стремится ориентировать векторы намагниченности перпендикулярно поверхности. На верхней и нижней границах совместного действия внутриобъемной анизотропии и возникающих поверхностных источников собственного поля достаточно для сохранения ориентации векторов \mathbf{M} вдоль ОЛН. На левой и правой границах поверхностная и внутриобъемная анизотропии действуют в одном направлении, уменьшая размер замыкающих доменов.

В высокоанизотропном материале действия поверхностной анизотропии не достаточно, чтобы заметно влиять на поле намагниченности.

Третья глава «Поверхностная анизотропия в тонких пластинках» содержит результаты моделирования доменных структур в тонких пластинках с трехмерным распределением намагниченности. Для изучения влияния поверхностной анизотропии на доменную структуру рассматривалась пластинка с размерами по координатным осям Ox , Oy и Oz равными $40 \times 20 \times 5$ нм соответственно. ОЛН ориентировалась по оси Oz . Величина внутриобъемной анизотропии изменялась путем умножения констант K_1 и K_2 , характерных для $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, на коэффициент $k_T > 0$.

В случае низкой внутриобъемной анизотропии ($k_T=10^{-4}$), из размагниченного начального состояния, которое моделировалось случайным выбором векторов \mathbf{m} в узлах сетки, большинство случайных выборок при $k_s=0$ приводят к двухвихревой доменной структуре (рис. 1а).

Если в этом состоянии «включить» поверхностную анизотропию типа «легкая плоскость», то вид доменной структуры практически не меняется. Включение же поверхностной анизотропии типа «легкая ось» приводит к существенным изменениям: происходит образование двух доменов с ориентацией поля \mathbf{m} вдоль ОЛН (рис. 1б). Кроме двухвихревой структуры при $k_T = 10^{-4}$ возможно также равновесное существование структур, подобных доменной структуре Ландау и квазиоднодоменных структур с намагниченностью, ориентированной преимущественно вдоль поверхности пластинки (поперек ОЛН). И в этих случаях включение поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» существенного влияния на поле намагниченности не оказывает. Включение поверхностной анизотропии типа «легкая ось» приводит к формированию однодоменной структуры, векторы намагниченности в которой ориентированы вдоль ОЛН.

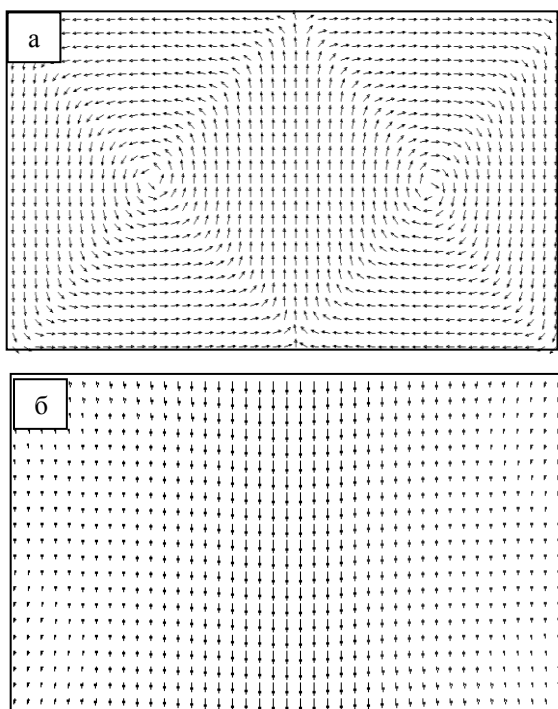


Рис. 1. Доменные структуры, при $k_T = 10^{-4}$ а) без учета и с учетом влияния поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость»; б) с учетом влияния поверхностной анизотропии типа «легкая ось»

В случае более высокой внутриобъемной анизотропии ($k_T = 0.45$) при $K_s = 0$ случайные выборки после установления равновесия приводят к однодоменной, двухдоменной или трехдоменной полосовым структурам с блоховскими границами и ориентацией намагниченности в доменах вдоль ОЛН. Причем, в последнем случае возможно вращение векторов в доменных границах, как в одном направлении, так и в противоположных. При «включении» поверхностной анизотропии любого типа однодоменная структура не изменяется. В двухдоменной структуре при «включении» поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» изменяется тип доменной границы с блоховской на неелевскую, а анизотропия типа «легкая ось» существенных изменений не вносит.

Изменения в трехдоменной структуре при «включении» поверхностной анизотропии происходят по-разному. Если вращение векторов в блоховских границах имеет противоположное направление, то «включение» поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» приводит систему в двухдоменное состояние с неелевской границей. Легкоосная поверхностная анизотропия в таком случае существенного влияния не оказывает. Если вращение векторов в доменных границах имеет одинаковое направление, то при «включении» поверхностной анизотропии любого типа система переходит в однодоменное состояние. Качественно отличающееся поведение почти одинаковых трехдоменных структур объясняется их различным «запасом устойчивости» к возмущению, которое вносится включением поверхностной анизотропии.

В случае высокой внутриобъемной анизотропии ($k_T = 4$) получаются доменные структуры, подобные тем, что получены для $k_T = 0.45$, но с более узкими доменными границами. Однако, в отличие от предыдущего случая, включение поверхностной анизотропии любого типа ни на одну из них заметного влияния не оказывает.

Общий вывод состоит в следующем. Влияние поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» на доменные структуры не существенно в случаях низкой или очень высокой внутриобъемной анизотропии. Если же параметры внутриобъемной анизотропии имеют некоторые средние (умеренные) значения, то поверхностная анизотропия типа «легкая плоскость» может оказаться важным фактором, и должна учитываться при расчетах доменных структур. Влияние поверхностной анизотропии типа «легкая ось» существенно для материалов как с умеренными значениями внутриобъемной анизотропии, так и для материалов с малыми ее значениями.

В работе [2] методом микромагнитного моделирования показана возможность магнитной записи на блоховских доменных границах монокристаллической пленки. В качестве отрезка дорожки записи рассматривалась пластинка $Nd_2Fe_{14}B$ размером $80 \times 20 \times 10$ нм с ОЛН, ориентированной по оси Oy и содержащая четыре домена (Рис. 2). Роль информационного бита выполняла z -компонента собственного поля H^z , создаваемая полем намагниченности бло-

ховской границы. Запись осуществлялась путем перемагничивания границы локальным внешним полем, ортогональным плоскости дорожки записи.

Для исследования возможности магнитной записи на доменных границах в присутствии поверхностной анизотропии рассматривалась пластинка с размерами по координатным осям Ox , Oy и

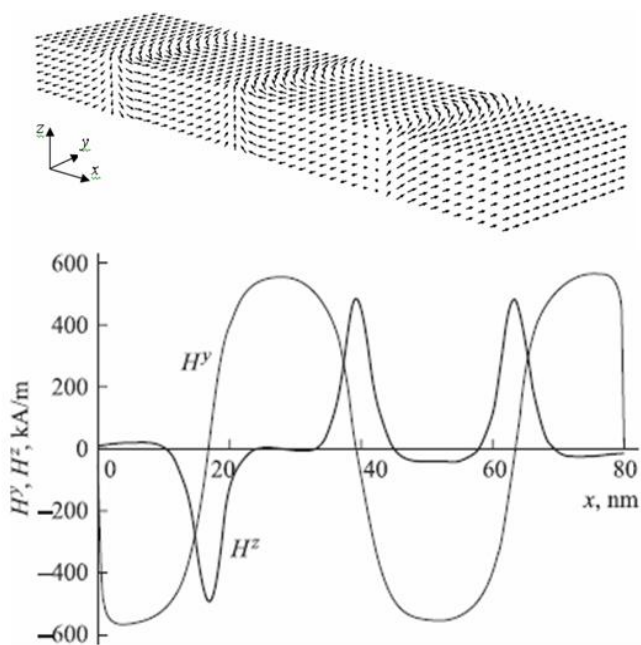


Рис. 2. Моделирование магнитной записи в работе [2]: Вверху - отрезок дорожки записи с тремя доменными границами (левая ориентирована вниз, остальные – вверх); внизу - компоненты собственного поля H^y, H^z на задней и верхней гранях дорожки соответственно.

равными 100, 20 и 10 нм соответственно. Выбор в качестве начального состояния поля \mathbf{m} , ориентированного нормально к плоскости пластинки с небольшим случайным отклонением от нормали, приводит к полосовой доменной структуре при любом типе поверхностной анизотропии. Но анизотропия типа «легкая плоскость» увеличивает вероятность появления доменных структур с меньшим числом доменов в пластинке, а доменные границы получают разного типа: вихревые (близкие к блоховским) и неелевские. Вихревые границы можно использовать в качестве информационных битов, ориентируя их полем записи вдоль оси Oz в том или ином направлении, а неелевские под действием поля записи превращаются в вихревые. Процесс перемагничивания доменной границы образца, как в случае с $K_s=0$, так и в случае с $K_s < 0$, проходит по одной и той же схеме: неперемагниченная область границы смещается вдоль оси Oy , и далее появляется перемагниченная часть. При $K_s > 0$, перемагничивание доменной границы происходит по схеме продавливания: зародыши перемагничивания появляются с двух сторон границы, сжимая неперемагниченный участок. По сравнению со смещением такая схема требует значительного увеличения внешнего поля, т.к. существенно увеличивается плотность энергии обмена.

Внешнее поле, необходимое для перемагничивания границ с $K_s=0$, $K_s < 0$ и $K_s > 0$, составляет $2.4 \cdot 10^5$, $4.0 \cdot 10^5$ и $2.4 \cdot 10^6$ А/м соответственно. Увеличение

напряженности для случая $K_s < 0$ по сравнению с $K_s = 0$ можно объяснить действием легкоосной анизотропии в направлении, противоположном внешнему полю, а значительное (в 10 раз) увеличение поля перемагничивания при $K_s > 0$ объясняется изменением механизма перемагничивания.

Если вектор напряженности внешнего поля отклонить от ортогонального положения на 10 градусов к оси Ox , то появляется x -компонента внешнего поля. В этом случае величина внешнего поля, необходимого для перемагничивания границы уменьшается: при $K_s = 0$ - до $2.2 \cdot 10^5$ А/м, при $K_s < 0$ - до $3.5 \cdot 10^5$ А/м, при $K_s > 0$ - до $2.1 \cdot 10^5$ А/м. В третьем случае напряженность уменьшилась более чем в 10 раз, что объясняется изменением механизма перемагничивания от продавливания к вытеснению.

В третьей главе обсуждается вопрос об устойчивости магнитной записи к внешнему магнитному полю в присутствии поверхностной анизотропии разных типов. Рассматривалось воздействие однородного внешнего поля в направлениях координатных осей. Оказалось, что минимальное поле, разрушающее магнитную запись, составляет $4.6 \cdot 10^4$, $5.3 \cdot 10^4$ и $5.0 \cdot 10^4$ А/м для значений $K_s < 0$, $K_s = 0$ и $K_s > 0$ соответственно. Из полученных результатов видно, что увеличение коэффициента K_s от $-5.11 \cdot 10^{-3}$ до 0 Дж/м² повышает устойчивость записи, а дальнейшее увеличение K_s до $5.11 \cdot 10^{-3}$ Дж/м² устойчивость понижает. Такой эффект объясняется различием в механизмах разрушения записи. В первых двух

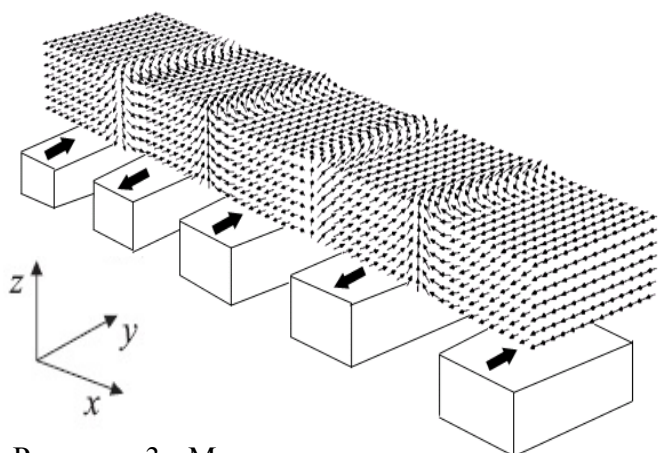


Рисунок 3. Магнитная запись на доменных границах верхнего слоя двухслойной пленки. Большими стрелками показано направление намагниченности в частицах нижнего слоя

случаях происходит изменение доменной структуры, в третьем – изменение типа границ с вихревых на неелевские. Из представленных результатов видно, что поверхностная анизотропия мало влияет на устойчивость записи, а разрушающее поле значительно ниже поля записи.

Для повышения устойчивости записи в работе предлагается использовать вспомогательный слой

частиц. Как и прежде, вихревые доменные границы верхнего монокристаллического слоя выполняют функцию информационных битов, а частицы вспомогательного нижнего слоя фиксируют положение доменов в верхнем слое. Нижний вспомогательный слой рассматривался состоящим из частиц магнито жесткого материала с чередующимися направлениями намагниченности (рис. 3). Слои разделены немагнитной прослойкой малой толщины, исключающей обменное взаимодействие между ними. Учитывается только магнитостатическое взаимодействие между слоями. Было установлено, что при $K_s = 0$ применение вспомогательного слоя существенно (почти вдвое) повышает устойчивость магнитной записи и позволяет избежать вариации размеров информационных битов, которая наблюдалась в однослойной пленке.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан метод вычисления распределения намагниченности в магнетиках с учетом поверхностной анизотропии, позволяющий избежать её неоднозначности на поверхности образца.
2. Предсказано, что в случае бесконечных стержней Co и $Nd_2Fe_{14}B$: а) поверхностная анизотропия не оказывает кардинального влияния на доменную структуру; б) поверхностная анизотропия типа «легкая плоскость» приводит к расширению замыкающих доменов, а поверхностная анизотропия типа «легкая ось» приводит к их сужению; в) влияние поверхностной анизотропии уменьшается с увеличением магнитокристаллической анизотропии образца, т.е. в случае $Nd_2Fe_{14}B$.
3. В случае тонких прямоугольных пластин с ОЛН, ортогональной плоскости пластины, поверхностная анизотропия может приводить к качественному изменению вида доменных границ и самих доменных структур.

Поверхностная анизотропии типа «легкая плоскость» существенно не влияет на доменные структуры образцов с низкой или очень высокой внутриобъемной анизотропией. Если же константы внутриобъемной анизотропии образцов имеют некоторые средние значения, например, $K_1 = 2 \cdot 10^7$ Эрг/см³, $K_2 = 3 \cdot 10^6$ Эрг/см³, то поверхностная анизотропия типа «легкая плоскость» изменяет тип доменных границ с блоховских на неелевские и может изменить до-

менную структуру образца, поэтому должна учитываться при расчетах доменных структур.

Для материалов с умеренными и малыми значениями внутриобъемной анизотропии поверхностная анизотропия типа «легкая ось» может влиять на вид доменных структур.

4. В работе проведено моделирование влияния поверхностной анизотропии на параметры магнитной записи на доменных границах монокристаллической пленки. Предсказано, что магнитная запись возможна и в присутствии поверхностной анизотропии. Выявлены следующие негативные факторы поверхностной анизотропии: а) поверхностная анизотропия типа «легкая плоскость» приводит к увеличению размера доменов в дорожке записи; б) поверхностная анизотропия любого типа приводит к увеличению напряженности внешнего локального поля, необходимого для перемагничивания доменной границы.

5. В работе предложены способы нейтрализации негативных факторов, указанных в предыдущем пункте. Предлагается направление магнитного поля записи отклонить на 10 градусов от ортогонального к плоскости дорожки направления к продольному, что снижает поле записи для всех значений K_s , а для случая $K_s < 0$, более чем в 10 раз.

5. Предсказано, что поверхностная анизотропия слабо влияет на устойчивость магнитной записи к воздействию внешних полей. Стабильность записи существенно (почти вдвое) повышается применением вспомогательного слоя магнито-жестких частиц, который позволяет избежать вариации размеров информационных битов, наблюдаемой в однослойной пленке.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Шилинг Г. С., Толстобров Ю. В. Влияние поверхностной и внутриобъемной анизотропии на доменные структуры в тонкой пластинке // Известия ВУЗОВ. Физика, 2010, Том 53, №4. С. 30-32
2. Толстобров Ю. В., Манаков Н. А., Шилинг Г. С. Влияние поверхностной анизотропии типа " легкая плоскость " на магнитную запись на доменных границах // ПЖТФ, 2011, Том 37, Выпуск 5. С. 38-42

3. Толстобров Ю. В., Манаков Н. А., Шилинг Г. С., Коротких Д. Ю. Устойчивость магнитной записи на доменных границах // ПЖТФ, 2012, Том 38, Выпуск 23. С. 64-69

4. Шилинг Г. С., Толстобров Ю. В. Микромагнитное моделирование вида доменных структур в монокристаллических ферромагнитных стержнях // В мире научных открытий. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2012, №8(32)(Математика. Механика. Информатика). С. 167-179.

В других изданиях:

5. Шилинг Г. С. Два метода моделирования доменных структур // Наука и образование: проблемы и перспективы [Текст]: Материалы 9-й региональной научно-практической конференции аспирантов, студентов и учащихся (Бийск, 13-14 апреля 2007 г.). – Бийск: БПГУ имени В.М.Шукшина, 2007. С. 253-255.

6. Шилинг Г. С. Математическое и компьютерное моделирование при решении задач о распределении намагниченности в кристаллах // Естественные и технические науки. – 2007. - №2(28). С. 252-253.

7. Шилинг Г. С. Влияние поверхностной энергии на формирование доменных структур в высокоанизотропных материалах // Молодежь и наука – третье тысячелетие: Сб. материалов Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. II часть. / Сост.: Сувейзда В.В.; КРО НС «Интеграция», - Красноярск, 2007. С. 434-436.

8. Шилинг Г. С. О граничных условиях в задаче нахождения стационарных решений уравнения Ландау-Лившица // Фундаментальные науки и образование [Текст]: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Бийск, 30 января – 1 февраля 2008 г.) / Бийский пед. гос. ун-т им. В. М. Шукшина. – Бийск: БПГУ им. В. М. Шукшина, 2008. С. 100-102.

9. Шилинг Г. С. Влияние коэффициентов анизотропии на доменную структуру материалов // Фундаментальные науки и образование [Текст]: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Бийск, 30 января – 1 февраля 2008 г.) / Бийский пед. гос. ун-т им. В. М. Шукшина. – Бийск: БПГУ им. В. М. Шукшина, 2008. С. 102-104.

10. Шилинг Г. С. Влияние поверхностной анизотропии на формирование доменных структур тонких пленок // Необратимые процессы в природе и технике: Труды пятой Всероссийской конференции 26-28 января 2009 г. В 3-х частях. Часть 1-М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. С. 144-147.

11. Манаков Н. А., Толстобров Ю. В., Шилинг Г. С. Микромагнитное моде-

лирование влияния поверхностной анизотропии на доменные структуры в нанопластинке // Вестник ОГУ. - 2009. -№ 10. С. 130-133.

12. Шипунова Е. В., Шилинг Г. С. Зависимость процесса перемагничивания доменной границы от типа поверхностной анизотропии в тонкой пластинке $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ // Фундаментальные науки и образование [Текст]: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции (Бийск, 31 января – 3 февраля 2010 г.) / Бийский пед. гос. ун-т им. В. М. Шукшина. – Бийск: БПГУ им. В. М. Шукшина, 2010. С. 105-107.

13. Шилинг Г. С., Шипунова Е. В. Динамика собственного поля при перемагничивании блоховской границы тонкой пластинки $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ в зависимости от типа поверхностной анизотропии // Фундаментальные науки и образование [Текст]: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции (Бийск, 31 января – 3 февраля 2010 г.) / Бийский пед. гос. ун-т им. В. М. Шукшина. – Бийск: БПГУ им. В. М. Шукшина, 2010. С. 107-109.

14. Шилинг Г. С., Коротких Д. Ю. Способы повышения плотности магнитной записи на поликристаллических дорожках ферромагнитных материалов // Фундаментальные науки и образование [Текст]: Материалы I международной научно-практической конференции (Бийск, 29 января – 1 февраля 2012 г.) / Алтайская гос. академия образования им. В. М. Шукшина. – Бийск: ФГБОУ ВПО «АГАО», 2012. С. 170-172.

Свидетельства о регистрации авторского права:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012613793 «Расчет трехмерного поля намагниченности в пластинке с поверхностной анизотропией (Ks_3D)» от 23.04.2012. Авторы: Толстобров Ю. В., Шилинг Г.С., Коротких Д.Ю.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012613794 «Расчет трехмерного поля намагниченности в двойной пластинке (double_3D)» от 23.04.2012. Авторы: Толстобров Ю. В., Шилинг Г.С., Коротких Д.Ю.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neel L., Anisotropie magnetique superficielle et surstructures d'orientation. // J. phys. rad., 1954, Vol.15, № 4, P.225–239.

2. Толстобров Ю.В., Манаков Н.А., Заиграев А.С. Магнитная запись на доменных границах монокристаллической пленки // Письма в ЖТФ. - 2009. - Т.35. - вып. 19. – С. 1–5.