

Управляемое электрическим полем движение магнитных доменных границ для применения в устройствах спинтроники

А. Д. Сизов^{1,*}, Г. А. Мешков², А. М. Монахов^{1,†}, А. М. Власов¹, Д. А. Сечин¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики колебаний.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²ООО "ОктоНус Техно". Москва, Лужнецкая наб. 2/4, стр. 3а

(Статья поступила 15.05.2013; подписана в печать 03.12.2013)

В последнее время возрос интерес к материалам, в которых проявляется взаимосвязь магнитных и электрических свойств — магнитоэлектрическое взаимодействие. Данная работа посвящена изучению одного из проявлений магнитоэлектрического взаимодействия: смещения магнитных доменных границ под действием электрического поля. Данный эффект может найти практические применения в новых видах запоминающих устройств, в основе работы которых лежит управляемое перемещение доменных границ.

PACS: 75.85.+t, 85.70.-w, 85.75.-d

УДК:537.622.4

Ключевые слова: мультиферроики, неоднородный магнитоэлектрический эффект, спинтроника.

ВВЕДЕНИЕ

Большую часть двадцатого столетия электроны, ответственные за проводимость в твердых телах и обладающие собственным магнитным моментом, использовались для переноса заряда, однако перенос магнитного момента в практических целях никак не использовался. С приходом нового тысячелетия начала бурно развиваться новая отрасль науки — спиновая электроника, или, как теперь принято ее называть, спинтроника.

Спинтроника — это область науки и техники, занимающаяся изучением переноса спин-поляризованного тока в твердых веществах. Важными задачами спиновой электроники являются обработка, перенос и хранение информации, использующие взаимосвязь электрической поляризации и намагниченности. Одним из последних достижений в данной области является открытие эффекта гигантского магнитосопротивления (GMR). Именно на этом эффекте основано действие современных считывающих головок жестких дисков, в то время как запись информации осуществляется традиционным способом — с помощью магнитного поля от миниатюрного электромагнита [1].

В качестве памяти нового поколения рассматривается магнитная память произвольного доступа (MRAM, Magnetic Random Access Memory) [2]. Она имеет быстроедействие и плотность ячеек, сравнимые с традиционной полупроводниковой оперативной памятью, энергонезависима и потребляет меньше энергии, выгодно отличается от полупроводниковых энергонезависимых устройств на технологии FLASH-памяти отсутствием деградации при многократной перезаписи. Однако плотности токов в MRAM дости-

гают значений 10^6 – 10^7 А/см². В новой концепции магниторезистивной памяти STT–MRAM для записи информации используется технология переноса спинового момента (spin-torque-transfer), которая позволяет уменьшить величину плотности тока, требуемую для переключения состояния ячейки памяти на порядок. Проблему дальнейшего уменьшения плотности тока позволяет решить запись информации на основе магнитоэлектрического эффекта. Магнитоэлектрические (МЭ) явления заключаются в взаимосвязи магнитных и электрических свойств кристаллов антиферромагнетиков и магнитных сегнетоэлектриков [3]. В частности, они проявляются в линейном магнитоэлектрическом эффекте [4, 5]: возникновении электрической поляризации пропорциональной магнитному полю и намагниченности пропорциональной электрическому полю.

Примером устройства, использующего магнитоэлектрические явления, является спиновый полевой транзистор [6]. Идея устройства схожа с принципом действия полевого транзистора: изменение электрического потенциала на затворе изменяет концентрацию дырок в полупроводниковом материале под ним. Только в данном случае изменение концентрации сказывается не только на проводимости материала, но и на намагниченности, поскольку обменное взаимодействие между ионами марганца, упорядочивающее магнитные моменты в веществе, осуществляется в (Ga, Mn)As дырками валентной зоны.

В описанных выше устройствах используется перемагничивание всего элемента памяти, находящегося в однодоменном состоянии. Однако в последнее время все большую популярность приобретает концепция элементов памяти, основанная на использовании доменных границ (ДГ) [7–11] (в том числе и магнитных доменных границ, что представляет интерес для спинтроники), которая обладает следующими преимуществами [10]:

1. отношение поверхности к объему растет с умень-

*E-mail: anatoliy.sizov@gmail.com

†E-mail: monahov.aleksandr@phys.msu.ru

шением размера, следовательно, миниатюрные устройства, например тонкие пленки, которые являются базисом современной электроники, могут обладать маленькими доменами и высокой объемной концентрацией доменных стенок;

2. доменные стенки обладают пониженной симметрией, по отношению к кристаллу в однородно намагниченных областях-доменах, и, как следствие, отличными свойствами. Например, доменные стенки в сегнетоэлектриках обладают проводимостью, превышающей проводимость самих доменов, а доменные стенки ферромагнетиков обладают электрической поляризацией, что позволяет управлять ими с помощью электрического поля [14];
3. в отличие от других типов интерфейсов (например, границ раздела между различными веществами в композиционных материалах) доменные границы обладают подвижностью.

Свойство подвижности ДГ используется в концепции трековой памяти (Racetrack memory) [7]. Однако, для ее осуществления требуются большие плотности тока 10^5 – 10^6 А/см² и управление отдельными доменными границами невозможно [11]. Поэтому представляют интерес перспективы использования МЭ эффектов для управления ДГ. На данный момент существует несколько подходов: использование композиционных структур из магнитного вещества и пьезоэлектрика [9], использование эффекта влияния электрического поля на магнитную анизотропию и скорость доменной границы [11], непосредственное воздействие на магнитные неоднородности (в том числе доменные границы) с помощью электрического поля [3]. Последний подход нам представляется наиболее перспективным. Он основан на использовании неоднородного МЭ взаимодействия, описываемого следующим вкладом в плотность свободной энергии (для кристалла с кубической симметрией):

$$F_{ME} = \dots - \gamma \mathbf{P} (\mathbf{M}(\nabla \mathbf{M}) + [\mathbf{M} \times [\nabla \times \mathbf{M}]]), \quad (1)$$

где γ — константа МЭ эффекта. Из формулы (1) следует, что неоднородный магнитоэлектрический эффект возникает в материалах с неоднородным распределением намагниченности.

Вводя вектор пространственной спиновой модуляции \mathbf{k} , мы можем представить ∇ как $\mathbf{k} \frac{\partial}{\partial x}$, где x — координата вдоль оси, параллельной \mathbf{k} . Введем также вектор вращения спина Ω по аналогии с вектором угловой скорости: $\Omega = \frac{[\mathbf{m} \times d\mathbf{m}]}{dx}$, где $\mathbf{m} = \frac{\mathbf{M}}{|\mathbf{M}|}$ — единичный вектор намагниченности.

Тогда, раскрывая двойное векторное произведение по формуле Лагранжа, уравнение (1) можно переписать в следующем виде:

$$F_{ME} = -\gamma M^2 (\mathbf{P}[\mathbf{k} \times \Omega]) \quad (2)$$

Соответственно, так как $P = \frac{\partial F}{\partial E}$ получим:

$$\mathbf{P} = \gamma \chi_e M^2 [\mathbf{k} \times \Omega], \quad (3)$$

где χ_e — электрическая поляризуемость.

Одним из типов магнитной неоднородности является доменная граница. При переходе через границу вектор магнитного момента может изменять ориентацию двумя способами. Вращение происходит либо по геликоиде, либо по циклоиде, каждому типу вращения соответствует свой тип доменной стенки: стенка Блоха и стенка Нееля, соответственно (рис. 1). Из формулы (3) следует, что поляризация не равна нулю только у стенки Нееля.

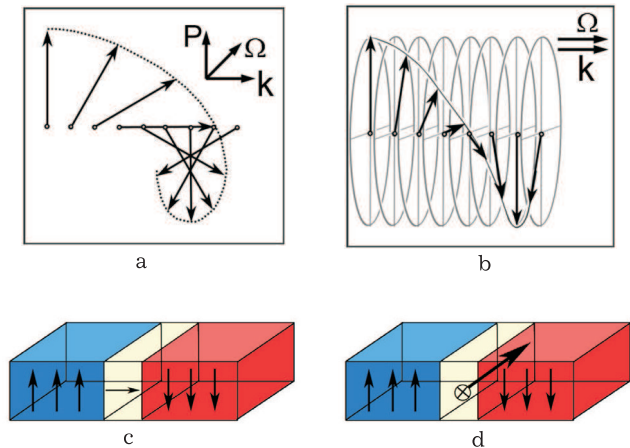


Рис. 1: Варианты вращений вектора спина при переходе через доменную границу: а — циклоида, б — геликоида. Выделяют два типа доменных стенок в ферромагнетиках: с — стенка типа Нееля, d — стенка типа Блоха

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния статического электрического поля на доменные границы пленок феррит гранатов, микромагнитная структура которых перестраивается с помощью магнитного поля, а также результаты численного моделирования поведения доменных границ при наличии неоднородностей в пленках. Проведен анализ перспектив использования данного эффекта в спинтронике и сравнение его с существующими технологиями магнитной памяти на доменных границах.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

1.1. Экспериментальная установка

Эксперимент проводился на установке для магнитооптического наблюдения быстро протекающих процессов в магнитных средах [12]. Данная установка позволяет непосредственно наблюдать магнитную структуру оптически прозрачной магнитной пленки благодаря магнитооптическому эффекту Фарадея.

Общая схема эксперимента изображена на рис. 2, 3. Внешнее статическое электрическое поле создавалось зондом, который подводился непосредственно к поверхности исследуемой пленки. Зонд представляет собой отрезок медной проволоки толщиной от 10 до 50 мкм, соединенный одним концом с выходом высоковольтного источника напряжения. Второй полюс источника подключен к плоскому электроду, расположенному со стороны подложки исследуемого образца. Создаваемое иглой электрическое поле имеет у ее поверхности напряженность примерно 3000 кВ/см при радиусе кривизны острия 10 мкм и напряжении 1500 В. Пример экспериментального кадра представлен на рис. 4.

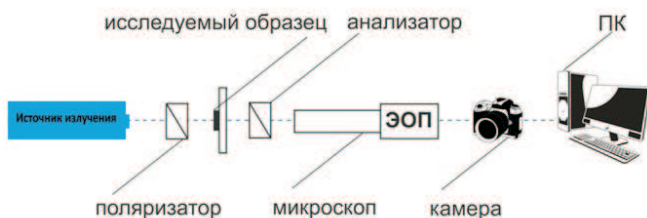


Рис. 2: Общая схема экспериментальной установки. Излучение последовательно проходит через поляризатор, исследуемый образец, анализатор попадает в микроскоп, и преобразованное ЭОПом изображение фиксируется цифровой камерой и передается в ПК для последующего анализа

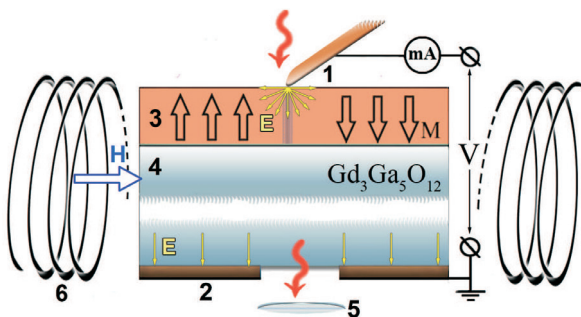


Рис. 3: Экспериментальная установка. Вид сбоку. Электрическое поле создается между зондом (1) и заземляющим электродом (2); пленка феррита-граната (3) и подложка (4) просвечиваются лазерным излучением, которое через отверстие в подложке проходит дальше в оптическую систему (5); катушки (6) создают магнитное поле в плоскости исследуемой пленки

1.2. Управление поляризацией доменных границ при помощи магнитного поля

Наличие электрической поляризации у ДГ очень легко проверить: если поляризация есть следствие

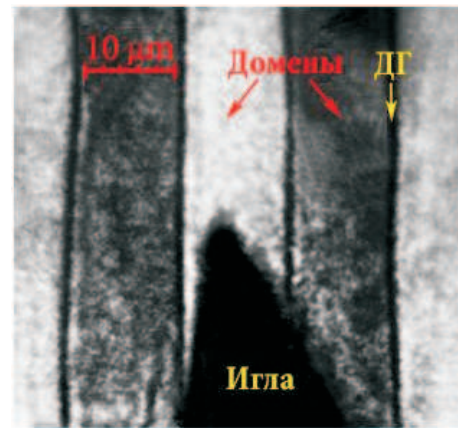


Рис. 4: Пример экспериментального изображения доменной структуры. Черный объект в нижней части кадра — зонд, темные и светлые полосы — домены с различным направлением намагниченности

определенной микромагнитной структуры доменной границы, то изменив эту структуру, мы увидим изменения в поведении границы в электрическом поле. Очевидный способ изменить структуру ДГ — поместить исследуемый образец во внешнее магнитное поле, перпендикулярное плоскости ДГ, что должно изменить поляризацию границы, заставляя векторы намагниченности в центре ДГ ориентироваться вдоль направления поля. В этом случае структура доменной стенки приближается к неелевской.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Смещение доменных границ под воздействием электрического поля зонда и магнитного поля, перпендикулярного плоскости границы

Измерения проводились для пленки феррита граната $(\text{LuBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ толщиной 12 мкм, выращенной на подложке с кристаллографической ориентацией (110).

В магнитном поле, перпендикулярном плоскости границы, смена полярности магнитного поля приводит к смене направления смещения границы, находящейся в электрическом поле, при том же знаке напряжения на зонде (рис. 5). При этом соседние границы смещаются противоположным направлением. В ранее исследуемых пленках (210) критическое магнитное поле, при котором происходила смена знака МЭ эффекта, составляло 20–80 Э [13]. В данном образце это поле имеет более низкое значение, меньше 5 Э. Такая восприимчивость структуры ДГ к внешнему магнитному полю позволяет достигать больших значений смещений доменных границ под действием электрического поля при меньших величинах магнитного поля. Усиление МЭ эффекта позволяет, в свою очередь, по-

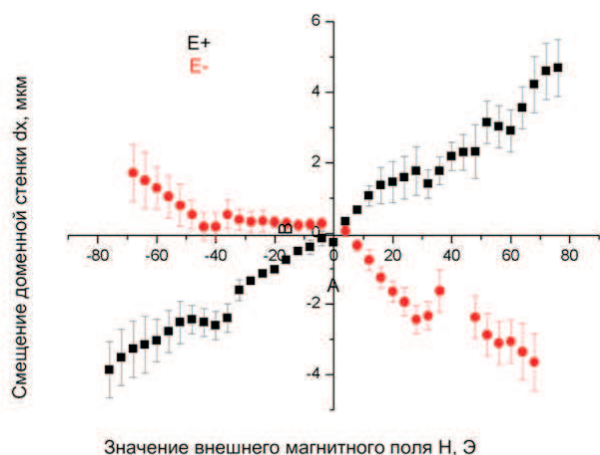


Рис. 5: Зависимость электроиндуцированного смещения доменной границы от модуля и знака внешнего магнитного поля, а также от знака электростатического потенциала, подаваемого на зонд. Черным цветом изображена зависимость при положительном потенциале, красным — при отрицательном

низить управляющие напряжения. Так, в магнитном поле напряженностью 200 Э заметные смещения доменных границ (более 1 мкм) наблюдались уже при напряжении на зонде 60 В, тогда как в первых экспериментах аналогичное смещение доменных границ достигалось лишь при напряжениях порядка 1500 В [14].

2.2. Моделирование перемещения доменных стенок под воздействием электрического поля

Моделирование поведения доменных границ при наличии искусственных неровностей на поверхности производилось в программе Nmag для образца прямоугольного сечения с двумя дефектами треугольного типа размером $1 \times 0.2 \times 0.1 \text{ мкм}^3$ с электродами, на которые подавалась разность потенциалов 0.5 В (рис. 6). Начальным распределением намагниченности задавался домен, доменные стенки которого закреплялись на дефектах. После приложения электрического поля доменные границы затягиваются под электроды со скоростью порядка 0.5 м/с.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Концепции устройств на доменных границах

Главным недостатком традиционной магнитной памяти, представленной жесткими дисками, является наличие движущихся частей, что ограничивает быстродействие и чрезвычайно повышает чувствительность к механическим воздействиям. В связи с этим

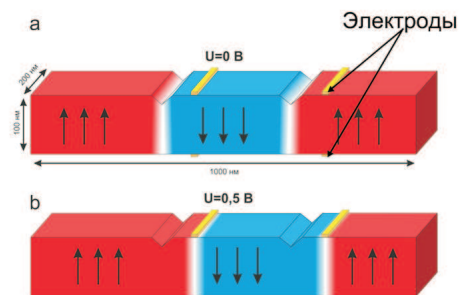


Рис. 6: Смещение доменной границы под действием приложенного электростатического поля: а — начальное распределение намагниченности; б — после подачи напряжения на электроды доменные стенки сместились относительно первоначального состояния

становится привлекательной идея использования в запоминающих устройствах движения и трансформации доменных границ, которые не сопровождаются механическим перемещением каких-либо объектов.

3.1.1. Трековая память

Устройство, изображенное на рис. 7, было предложено Стюартом Паркиным, исследователем из ИВМ [7]. Принцип действия основан на эффекте движения доменных границ вдоль магнитных нанопроводов толщиной около 10 нм, при пропускании через них спин-поляризованного тока. Доменные стенки проходят мимо системы считывания записи, аналогичной той, что используется в современных жестких дисках. При смене полярности тока происходит движение в обратную сторону. Гипотетический модуль памяти представляет собой матрицу из блоков, состоящих из проволоки с несколькими десятками доменов и системы считывания/записи. За счет такой конструкции можно достичь значения среднего времени доступа к произвольному биту порядка 20–32 нс, что сравнимо со значениями для используемой в настоящее время оперативной памяти, реализованной на кремниевой элементной базе. Трехбитовая версия такого устройства была продемонстрирована в начале 2008 г. Основной трудностью в разработке этой технологии является использование спин-поляризованного тока большой плотности (порядка $3 \times 10^8 \text{ А/см}^2$).

3.1.2. Магнитоэлектрический затвор для логических элементов спинтроники

Еще одним многообещающим направлением является локальный контроль намагниченности в композитных структурах из ферромагнетика и пьезоэлектрика [9]. В этих структурах приложение электрического напряжения приводит к возникновению од-

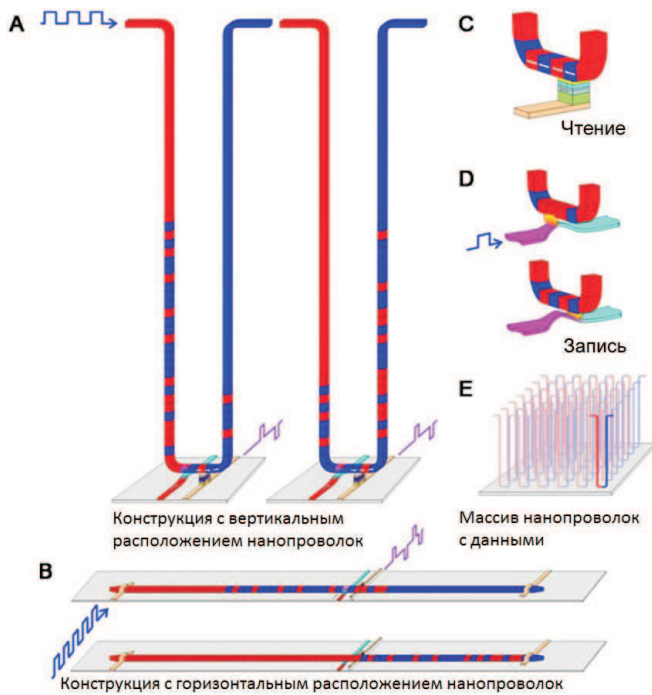


Рис. 7: Трековая память. А — Конструкция с вертикальным расположением нанопроволок. В — Горизонтальная конфигурация. С — Чтение данных путем измерения магнитосопротивления туннельного перехода. D — Запись данных путем пропускания импульсов тока по второму ферромагнитному нанопроводу, идущему рядом. Е — Массив нанопроволок с данными с высокой плотностью хранения [7]

ноосных механических напряжений в пьезоэлектрическом слое, которые передаются магнитоэлектрическому материалу, что приводит к изменению микромагнитной структуры (рис. 8). Этот подход позволяет контролировать перемещение доменных стенок в проводах из ферромагнетиков при комнатных температурах. При приложении напряжения 50 В к одному из контактных входов (что соответствует напряженности поля между электродами 100 кВ/см), происходит пиннинг доменной стенки, которая ранее распространялась вдоль провода свободно, что фиксируется с помощью GMR-датчика. Взяв за основу данный подход, можно создать новый дизайн ассоциативной трековой памяти и реализовать логические элементы и устройства памяти [9].

3.1.3. DWRAM

Еще одна концепция устройства с двумя переключаемыми состояниями DWRAM (domain wall RAM), предложенная коллективом нашей лаборатории, основана на эффекте движения доменных границ во внешнем поле (рис. 9). Устройство состоит из магнитоэлектрического слоя, обменно связанного с проводящим магнитным слоем. Сверху на МЭ слой нанесены

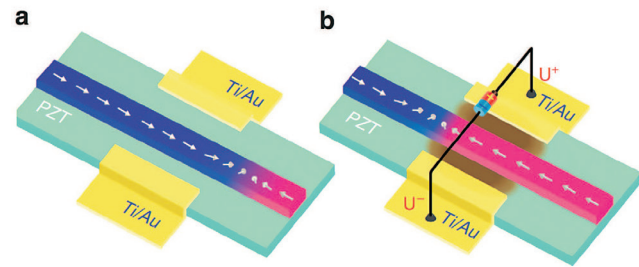


Рис. 8: Магнитоэлектрическое управление ДГ в устройствах на композитных материалах: а — при отсутствии напряжения, приложенного к пьезоэлектрическому слою, доменная стенка свободно распространяется в ферромагнитном слое; б — при подаче напряжения возникает локальное сжатие, которое передается ферромагнитному слою и приводит к «залипанию» доменной стенки

два электрода. Создавая электрическое поле заданной полярности, мы перемещаем доменную границу в магнитоэлектрике в одно из двух положений, заданных с помощью искусственных дефектов. Обменная связь между слоями заставляет смещаться и границу в проводящем слое, что приводит к изменению направления намагниченности в области между крайними положениями границы. Изменение направления намагниченности можно считывать, если пропускать ток через структуру «магнитный слой – немагнитный проводник – магнитоэлектрический проводник (намагничен однородно)». Сопротивление такой структуры будет различным в зависимости от того, сонаправлены или противоположны вектора намагниченности в крайних слоях.

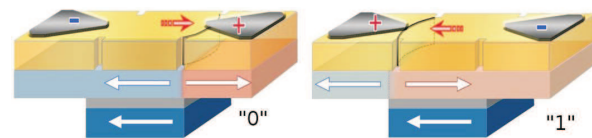


Рис. 9: Ячейка памяти «DWRAM». Положение границы в свободном слое определяет состояния соответствующие логическому «0» или «1»

3.2. Сравнительный анализ

Для устройства DWRAM были проведены следующие оценки его основных характеристик. В этом устройстве управление происходит путем перемещения доменной стенки, значит время переключения устройства в основном определяется временем движения доменной границы из одного положения в другое и временем переключения напряжения на электродах. Говорить о перемещении доменной стенки можно, если ее смещение больше ее размера, который в ферритах гранатах оставляет около 100 нм. Скорости движения стенок, полученные в эксперименте [15], достига-

Таблица 1: Сравнение DWRAM с другими технологиями построения устройств памяти

| Тип памяти | DRAM (65 нм) | Flash (65 нм) | SRAM (65 нм) | MRAM | Racetrack | DWRAM |
|------------------|--------------|---------------|--------------|---------|-----------|---------------|
| Размер ячейки | 30 нм | 40 нм | 30 нм | 160 нм | 200 нм | 300 нм |
| Время считывания | 10 нс | 10–50 нс | 1 нс | 10 нс | 20–32 нс | 2 нс |
| Время записи | 10 нс | 0,1 – 100 мс | 1 нс | 5 нс | 20–32 нс | 1 нс |
| Энергия записи | 5 пДж | 10,000 пДж | 5 пДж | 100 пДж | 2 пДж | 10^{-3} пДж |

ют 50 м/с, следовательно, время перемещения приблизительно равно 2 нс. Таким образом быстродействие данного устройства может быть оценено в 0.5 ГГц.

В вышеописанных экспериментах удалось понизить величину управляющих напряжений, необходимых для переключения состояния элемента памяти, до 60 В (при диаметре электрода 10 мкм). При уменьшении линейных размеров устройства размеры электродов можно будет уменьшить и достигать тех же значений напряженности электрического поля при меньшей разности потенциалов.

Энергия переключения устройства на движении доменных стенок — это энергия перезарядки конденсатора, которая равна $CU^2/2$. Емкость электрода можно оценить в 1×10^{-17} Ф, однако необходимо учесть также емкость «обвязки» подводящих проводов, которая составляет единицы и десятые доли пикофарад. Таким образом, суммарная емкость электрода и подводящей обвязки приблизительно равняется 4×10^{-13} Ф. Значение управляющего напряжения, используемое в эксперименте, составляет 60 В. Однако при уменьшении размеров электродов до 30 нм, управляющее напряжение составит величину порядка 0.1 В, а энергия переключения, соответственно, уменьшится больше чем на пять порядков до 10^{-15} Дж.

При использовании полевого принципа управления устройствами отсутствуют постоянные токи, однако имеются токи перезарядки, которые описываются следующей формулой:

$$J = Q \times \omega = CU \times \omega, \quad (4)$$

где J — плотность тока, Q — заряд, накапливающийся на электроде емкости C при заряде до напряжения U , ω — тактовая частота работы устройства.

В устройстве DWRAM при размере электрода 30 нм $C = 10^{-17}$ Ф, $U = 0.1$ В, при $\omega \simeq 10$ ГГц сила тока составит 0.01 мкА, а плотность тока 1 кА/см², что на несколько порядков ниже чем в существующих кон-

струкциях MRAM памяти.

В таблице 1 указаны характеристики существующих устройств памяти, а также запоминающих устройств, использующих перемещение доменной границы. Из таблицы 1 видно, что энергонезависимая память DWRAM обладает скоростью работы SRAM, однако энергии записи в ней на несколько порядков ниже.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внешнее магнитное поле, направленное перпендикулярно к плоскости доменной границы, позволяет значительно увеличить эффект электроиндуцированного смещения магнитных доменных границ. Благодаря этому удалось понизить величину управляющих электрических напряжений с 1.5 кВ до 60 В при тех же значениях смещения доменных стенок. На основе продемонстрированных эффектов возможно создание элементов памяти, в которых используется полевой принцип управления доменными границами, с основными техническими характеристиками, соответствующими стандартам существующих видов запоминающих устройств. Математическое моделирование показало, что, используя магнитоэлектрический эффект вместо спин-поляризованного тока для перемещения доменных стенок в тонких нанопроводах, можно усовершенствовать существующую трековую память, что приведет к понижению используемой плотности тока.

Благодарности

Исследования поддержаны Российским Фондом Фундаментальных исследований (№ 13-02-12443-офи-м) и Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (соглашение между Мин. Обр. Науки и МГУ № 8691)

- [1] Chappert C., Fert A., and Nguyen Van Dau F. Nature-Matter **6**. P. 813. (2007).
- [2] Fert A. Rev. of Mod. Phys. **80**. P. 1517. (2008).
- [3] Pyatakov A. P., Zvezdin A. K. Physics Uspekhi. **55**. P. 557-581. (2012).
- [4] Landau L. D., Lifshitz E. M. Electro-dynamics of Con-

tinuous Media. (1984).

- [5] Astrov D. N. Sov. Phys. JETP. **11708**. (1960).
- [6] Stolichnov I. et al. Nature Materials. **7**. P. 464. (2008).
- [7] Parkin S. S. P., Hayashi M., Thomas L. Science **320**. P. 190. (2008).
- [8] Parkin S. S. P. US Patent. **7,031,178**. P. 1. (2006).

- [9] *Na Lei et al.* Nature Communication. **4**. P. 1378. (2013).
[10] *Catalan G., Seidel J., Ramesh R., Scott J.F.* Rev. of Mod. Phys. **84**. P. 119. (2012).
[11] *Schellekens A. et al.* Nature Communication. **4**. P. 1378. (2013).
[12] *Logginov A., Nikolaev A. et al.* Sov. Phys. JETP. **66(6)**. P. 398. (1997).
[13] *Pyatakov A., Sechin D. et al.* EPL. **93(17001)**. (2011).
[14] *Logginov A., Meshkov G. et al.* Sov. Phys. JETP. **86(2)**. P. 124. (2007).
[15] *Logginov A., Meshkov G. et al.* Appl. Phys. Lett. **93**. P. 182510. (2008).

Motion of magnetic domain walls controlled by an electric field as the principle of spintronic devices

A. D. Sizov^a, G. A. Meshkov, A. M. Monahov^b, A. M. Vlasov, A. D. Sechin

Chair of Physics of Oscillations, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia
E-mail: ^aanatoliy.sizov@gmail.com, ^bmonahov.aleksandr@phys.msu.ru

In our days interest in materials that demonstrate the coupling between the magnetic and electrical properties increased. This work is devoted to the study of one of manifestations of magnetoelectric interaction: movement of magnetic domain walls under the influence of an electric field. This effect can be used for practical applications in new kinds of magnetic storage devices, based on controlled movement of domain walls.

PACS: 75.85.+t, 85.70.-w, 85.75.-d

Keywords: multiferroics, inhomogeneous magnetoelectric effect, spintronics.

Received 15.05.2013

Сведения об авторах

1. Сизов Анатолий Дмитриевич — студент; тел.: (926) 128-15-49, e-mail: anatoliy.sizov@gmail.com.
2. Монахов Александр Михайлович — студент; тел.: (915) 326-21-39, e-mail: monahov.aleksandr@phys.msu.ru.
3. Власов Александр Михайлович — аспирант; тел.: (925) 858-11-28, e-mail: alex.m.vlasov@gmail.com.
4. Сечин Дмитрий Игоревич — аспирант; тел.: (916) 363-57-48, e-mail: dmitriy.sechin@gmail.com.
5. Мешков Георгий Александрович — канд. физ.-мат. наук, программист; тел.: (495) 939-41-38, e-mail: meshkov@phys.msu.ru.