

05,12

## Управляемый магнитными полями четырех наночастиц пиннинг доменной стенки в ферромагнитной нанопроволоке

© О.Л. Ермолаева<sup>1</sup>, Е.В. Скороходов<sup>1</sup>, В.Л. Миронов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Россия

E-mail: ermolaeva@ipmras.ru

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований пиннинга доменной стенки в планарной ферромагнитной системе, представляющей собой нанопроволоку и четыре прямоугольные однородно намагниченные наночастицы, расположенные под углом к ней. На основании расчетов энергии взаимодействия доменной стенки с полями рассеяния наночастиц и микромагнитного моделирования продемонстрировано, что в такой системе реализуются различные варианты пиннинга доменной стенки, определяющиеся взаимной ориентацией магнитных моментов наночастиц и намагниченности нанопроволоки. Обсуждается возможность создания на основе рассмотренных структур магнитных логических ячеек.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-02-04462 и 15-42-02388р\_поволжье\_а).

### 1. Введение

Процессы пиннинга и депиннинга доменных стенок в ферромагнитных нанопроволоках являются предметом интенсивных исследований в связи с перспективностью использования таких систем для создания устройств магнитной памяти и магнитной логики [1–3]. Процесс вычисления в таких устройствах основан на управлении движением доменной стенки под действием внешнего магнитного поля или спин-поляризованного тока [4–6]. В связи с этим актуальными являются исследования, посвященные прецизионному позиционированию доменных стенок в нанопроволоках посредством создания локальных ловушек для контролируемого пиннинга/депиннинга. В частности, ряд исследований посвящен пиннингу доменных стенок на искусственных дефектах нанопроволок в виде выступов и впадин с различными формами [7–13]. Такие дефекты играют роль постоянных ловушек, а контроль движения доменных стенок в указанных системах осуществляется посредством изменения величины и длительности импульсов внешнего магнитного поля.

Альтернативный подход состоит в использовании для управления пиннингом доменной стенки магнитных полей рассеяния, создаваемых однородно намагниченными наночастицами, расположенными вблизи нанопроволоки [14–16]. Недавно нами были предложены два способа пиннинга доменной стенки в планарной ферромагнитной системе, состоящей из нанопроволоки и двух наночастиц, расположенных перпендикулярно [17] и параллельно [18] оси нанопроволоки. Было показано, что в этих случаях движение доменной стенки вдоль нанопроволоки связано с прохождением потенциального рельефа, состоящего из потенциальных ям и барьеров. При этом величина энергии пиннинга доменной стенки определяется взаимной ориентацией магнитных моментов в системе и может существенно меняться за

счет изменения конфигурации магнитных моментов в подсистеме наночастиц. В настоящей работе приведены результаты исследований пиннинга доменной стенки в системе, представляющей собой нанопроволоку и четыре прямоугольные наночастицы, расположенные под углом к оси нанопроволоки. В частности, обсуждается возможность реализации на основе данной системы логической ячейки. Особенностью рассматриваемой логической ячейки является возможность изменения выполняемой логической операции.

### 2. Эксперимент

Исследуемая планарная система в виде нанопроволоки и четырех наночастиц была изготовлена методом электронной литографии и ионного травления. Многослойная структура  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (20 nm)/V (15 nm)/Cu (10 nm) была нанесена на подложку Si при помощи магнетронного напыления. После этого структура покрывалась слоем фуллеренов  $\text{C}_{60}$  (80 nm), который использовался в качестве электронного резиста. Начальная защитная маска формировалась в слое  $\text{C}_{60}$  при помощи системы ELPHY PLUS (на основе сканирующего электронного микроскопа „SUPRA 50VP“) с последующим химическим травлением в органическом растворителе. Затем изображение переносилось на слой Cu ионным травлением в  $\text{Ar}^+$  и далее на слой V плазменным травлением в атмосфере фреона. На конечном этапе система, состоящая из нанопроволоки и наночастиц, была сформирована в слое  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  с помощью ионного травления в  $\text{Ar}^+$ . Изображение структуры, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), приведено на рис. 1.

Нанопроволока имела размер  $3000 \times 100 \times 30$  nm, наночастицы имели размер  $300 \times 100 \times 30$  nm, расстояние между частицами и нанопроволокой составляло 50 nm.

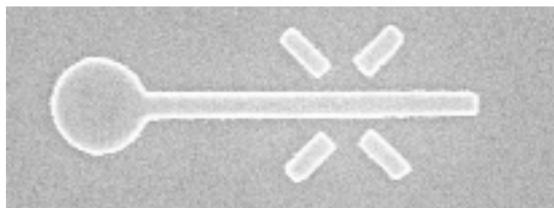


Рис. 1. СЭМ-изображение системы.

На одном конце нанопроволоки был сделан круглый диск диаметром 500 nm, который обладал низкой коэрцитивностью и служил затравочной частью для зарождения доменной стенки. Частицы были расположены под углом  $45^\circ$  к оси нанопроволоки. Процессы перемагничивания такой системы исследовались *in situ* с помощью магнитно-силового микроскопа (МСМ) „Solver-HV“. Микроскоп оборудован электромагнитом, способным создавать поле в плоскости образца величины до 1 кОе. Магнитно-силовые измерения проводились в вакууме  $10^{-4}$  Торр. Использовался неконтактный режим сканирования. В качестве сигнала регистрировался сдвиг фазы колебаний кантилевера под действием градиента магнитного поля образца.

### 3. Результаты

Магнитные поля частиц создают сложный профиль потенциальной энергии для движения доменной стенки вдоль нанопроволоки, который существенно зависит от конфигурации магнитных моментов частиц. В рассматриваемой системе существует десять неэквивалентных магнитных состояний (рис. 2), обладающих различной величиной энергии депиннинга доменной стенки. Проведенный теоретический анализ потенциальной энергии системы и микромагнитное моделирование показали, что наибольшая энергия депиннинга соответствует конфигурациям магнитных моментов S1 и S2. Значение полей депиннинга в этом случае превышает характерное поле зарождения доменной стенки, составляющее по оценкам величину порядка 200 Ое. Конфигурации S3 и S4 также имеют достаточно высокий барьер депиннинга, однако эти конфигурации сложно реализовать на практике из-за высокой энергии магнитоэлектростатического взаимодействия между наночастицами [19]. Таким образом, конфигурации S1 и S2 перспективны для реализации магнитных логических ячеек. Остальные магнитные конфигурации имеют потенциальный барьер, характеризующийся более низкими значениями полей депиннинга.

На рис. 3 представлены зависимости энергии доменной стенки (типа „хвост к хвосту“) от ее положения в нанопроволоке. Видно, что в конфигурации S1 (рис. 3, a) магнитное поле частиц создает потенциальный рельеф, состоящий из последовательно расположенных потенциальной ямы и барьера. Процесс движения доменной стенки в этом случае будет происходить следующим

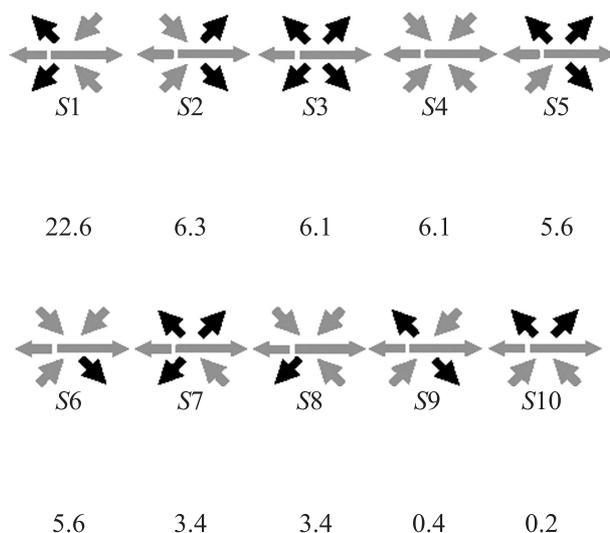


Рис. 2. Магнитные конфигурации системы и соответствующие величины энергии депиннинга (в единицах  $10^{10}$  erg).

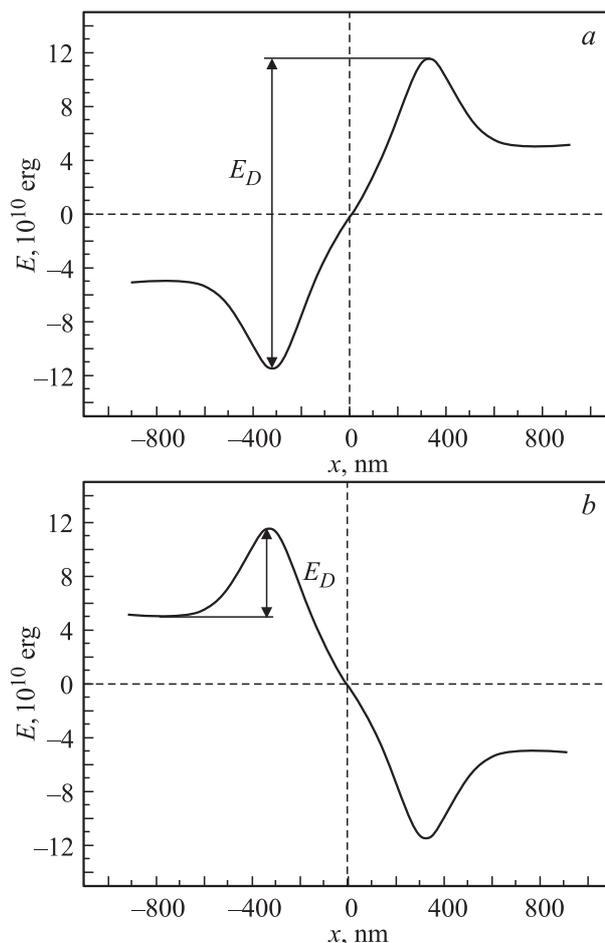
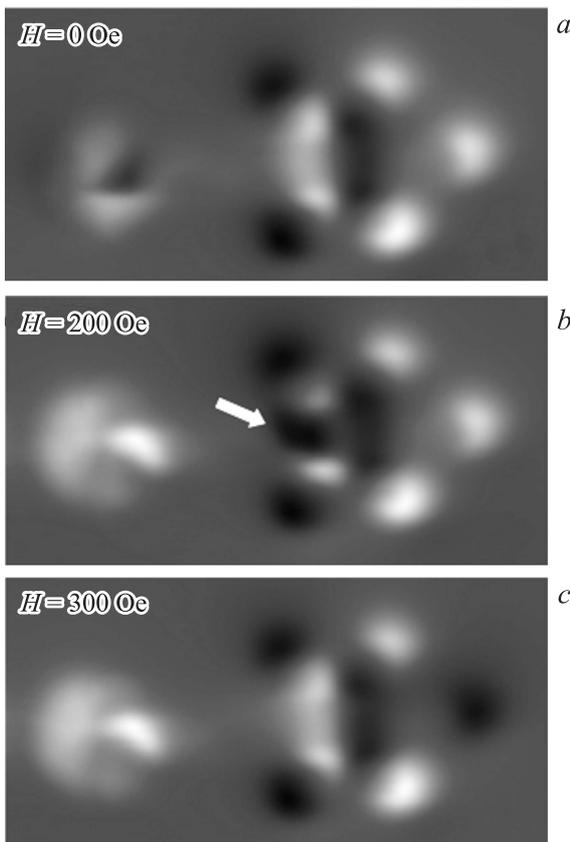


Рис. 3. Зависимости потенциальной энергии доменной стенки от ее положения в нанопроволоке. a — потенциальный профиль для конфигурации S1. b — потенциальный профиль для конфигурации S2. Начало координат соответствует точке симметрии между частицами.

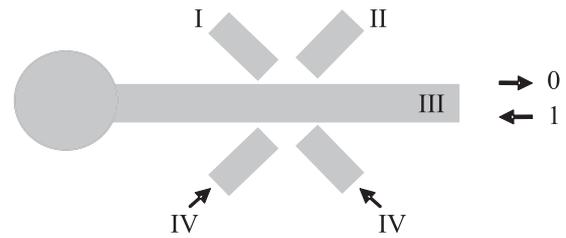
образом. Доменная стенка возникает под действием внешнего магнитного поля в затравочной части и движется вдоль нанопроволоки (слева направо), пока не попадает в потенциальную яму, где она пиннингуется (энергия депиннинга  $E_D$ ). Ее положение будет устойчиво до тех пор, пока внешнее магнитное поле не превысит значение поля депиннинга.

Другая ситуация наблюдается для конфигурации S2. В этом случае потенциальный рельеф представляет собой последовательно расположенные и равные по абсолютной величине барьер и яму (рис. 3, b). Как видно из рисунка, в этом случае величина энергии депиннинга равна высоте потенциального барьера и меньше, чем для магнитной конфигурации S1. Кроме того, в отличие от предыдущего случая при конфигурации S2 доменная стенка пиннингуется на потенциальном барьере, а не в яме, и в отсутствие внешнего магнитного поля она будет выталкиваться обратно из области наночастиц полями рассеяния.

Нами были проведены эксперименты по наблюдению процесса прохождения доменной стенки в описанной системе под действием внешнего магнитного поля. В каче-



**Рис. 4.** МСМ-изображения последовательных стадий перемагничивания системы в состоянии S1. *a* — начальное состояние, нанопроволока намагничена однородно, *b* — пиннинг доменной стенки (показана светлой стрелкой) в области между наночастицами после приложения поля 200 Ое. *c* — депиннинг доменной стенки после приложения поля 300 Ое. Нанопроволока намагничена в противоположном направлении.



**Рис. 5.** Схема магнитной логической ячейки. I — вход 1, II — вход 2, III — выход, IV — управляющие частицы.

стве примера на рис. 4 представлены МСМ-изображения последовательных стадий перемагничивания системы для конфигурации магнитных моментов S1.

Начальное состояние системы создавалось посредством намагничивания в сильном поле, приложенном вдоль оси нанопроволоки (рис. 4, a). Затем прикладывалось постепенно увеличивающееся поле, направленное в противоположную сторону. В поле 200 Ое в затравочной части происходило зарождение доменной стенки, которая под действием магнитного поля двигалась по нанопроволоке и пинниговалась в области между первыми наночастицами. На МСМ-изображении (рис. 4, b) доменная стенка видна как дополнительный темный полюс. Положение доменной стенки было устойчивым вплоть до значения поля 300 Ое. При превышении этого поля наблюдалось перемагничивание нанопроволоки целиком, о чем можно судить по изменению цвета полюса на конце нанопроволоки (рис. 4, c).

Соотношение величин полей зарождения доменной стенки и полей депиннинга в различных магнитных конфигурациях позволяет реализовать на основе данной системы магнитную логическую ячейку с переключаемой логической функцией (рис. 5). Основным элементом такой ячейки является ферромагнитная нанопроволока, по которой под действием внешнего магнитного поля движется доменная стенка (для определенности рассмотрим

**Таблица 1.** Таблица истинности логической операции „И“

Вход 1	Вход 2	Выход
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**Таблица 2.** Таблица истинности логической операции „Или-Не“

Вход 1	Вход 2	Выход
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

доменную стенку типа „хвост к хвосту“). Пара частиц по одну сторону нанопроволоки — входные элементы ячейки. Свободный конец нанопроволоки является выходом ячейки. Вторая пара частиц служит для изменения логической операции, выполняемой ячейкой. Входная и выходная информация кодируется направлением магнитных моментов. Если магнитные моменты управляющих частиц направлены вправо, то такая логическая ячейка выполняет логическую операцию „И“ (табл. 1). В том случае, когда магнитные моменты управляющих частиц направлены влево, логическая ячейка выполняет логическую операцию „Или-Не“ (табл. 2). Если магнитные моменты управляющих частиц направлены в противоположные стороны, то такая ячейка выключена и не выполняет никакой логической операции.

Алгоритм работы такой ячейки аналогичен алгоритму, описанному в [19]. На первой стадии в нанопроволоке записывается логическая единица при помощи намагничивания ее во внешнем поле. После этого за счет локального магнитного поля записывается информация на входы и на управляющие наночастицы. На финальной стадии происходит процесс вычисления, заключающийся в приложении реверсивного магнитного поля с амплитудой меньше поля депиннинга и считывание выходной информации.

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе рассмотрены возможности пиннинга доменной стенки в системе, состоящей из нанопроволоки и четырех наночастиц, расположенных под углом  $45^\circ$  к ее оси. Показано, что величина поля депиннинга в такой системе существенно зависит от взаимной ориентации магнитных моментов наночастиц и намагниченности нанопроволоки. Проанализированы магнитные конфигурации системы наночастиц, различающиеся величиной энергии пиннинга доменной стенки и соответственно значениями полей депиннинга. Показана принципиальная возможность реализации на основе такой системы перестраиваемой магнитной логической ячейки.

Авторы выражают благодарность С.Н. Вдовичеву и В.В. Рогову за помощь в изготовлении образцов, а также А.А. Фраерману за полезные обсуждения.

#### Список литературы

- [1] D.A. Allwood, G. Xiong, C.C. Faulkner, D. Atkinson, D. Petit, R.P. Cowburn. *Science* **309**, 1688 (2005).
- [2] S.S.P. Parkin, M. Hayashi, L. Thomas. *Science* **320**, 190 (2008).
- [3] R.L. Stamps, S. Breitzkreutz, J. Akerman, A.V. Chumak, Y. Otani, G.E.W. Bauer, J.-U. Thiele, M. Bowen, S.A. Majeed, M. Klaui, I.L. Prejbeanu, B. Dieny, N.M. Dempsey, B. Hillebrands. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **47**, 333001 (2014).
- [4] D.A. Allwood, G. Xiong, M.D. Cooke, C.C. Faulkner, D. Atkinson, N. Vernier, R.P. Cowburn. *Science* **296**, 2003 (2002).
- [5] L. O'Brien, D.E. Read, H.T. Zeng, E.R. Lewis, D. Petit, R.P. Cowburn. *Appl. Phys. Lett.* **95**, 232502 (2009).
- [6] M. Hayashi, L. Thomas, C. Rettner, R. Moriya, Ya.B. Bazaliy, S.S.P. Parkin. *Phys. Rev. Lett.* **98**, 037204 (2007).
- [7] M. Hayashi, L. Thomas, R. Moriya, C. Rettner, S.S.P. Parkin. *Science* **320**, 209 (2008).
- [8] E. R. Lewis, D. Petit, L. Thevenard, A.V. Jausovec, L. O'Brien, D.E. Read, R.P. Cowburn. *Appl. Phys. Lett.* **95**, 152505 (2009).
- [9] D. Petit, A.V. Jausovec, D.E. Read, R.P. Cowburn. *J. Appl. Phys.* **103**, 114307 (2008).
- [10] D. Petit, A.V. Jausovec, H.T. Zeng, E.R. Lewis, L. O'Brien, D.E. Read, R.P. Cowburn. *Phys. Rev. B* **79**, 214405 (2009).
- [11] K. O'Shea, S. Mc Vitie, J.N. Chapman, J.M.R. Weaver. *Appl. Phys. Lett.* **93**, 202505 (2008).
- [12] L.K. Bogart, D. Atkinson, K. O'Shea, D. Mc Grouther, S. Mc Vitie. *Phys. Rev. B* **79**, 054414 (2009).
- [13] E. Varga, G. Csaba, A. Imre, W. Porod. *IEEE Trans. Nanotechnol.* **11**, 682 (2012).
- [14] Q. Zhu, X. Liu, S. Zhang, Q. Zheng, J. Wang, Q. Liu. *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 073001 (2014).
- [15] S.M. Ahn, K.W. Moon, C.G. Cho, S.B. Choe. *Nanotechnology* **22**, 085201 (2011).
- [16] R.A. van Mourik, C.T. Rettner, B. Koopmans, S.S.P. Parkin. *J. Appl. Phys.* **115**, 17D503 (2014).
- [17] V.L. Mironov, O.L. Ermolaeva, E.V. Skorohodov, A.Yu. Klimov. *Phys. Rev. B* **85**, 144418 (2012).
- [18] В.Л. Миронов, О.Л. Ермолаева. *Изв. РАН. Сер. физ.* **78**, 1, 36 (2015).
- [19] A. Remhof, A. Schumann, A. Westphalen, H. Zabel. *Phys. Rev. B* **77**, 134409 (2008).