

05

## Воздействие поля зонда магнитно-силового микроскопа на скирмионное состояние в модифицированной пленке Co/Pt с перпендикулярной анизотропией

© В.Л. Миронов<sup>1</sup>, Р.В. Горев<sup>1</sup>, О.Л. Ермолаева<sup>1</sup>, Н.С. Гусев<sup>1</sup>, Ю.В. Петров<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mironov@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 15 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 22 апреля 2019 г.

Принята к публикации 24 апреля 2019 г.

Приводятся результаты экспериментов по локальному перемагничиванию зондом магнитно-силового микроскопа искусственных магнитных скирмионов в многослойной пленке Co/Pt с перпендикулярной намагниченностью. Образец представлял собой пленку Co/Pt, содержащую массив областей цилиндрической формы с пониженной анизотропией, модифицированных фокусированным ионным пучком He<sup>+</sup>. Магнитное состояние образца контролировалось методами магнитно-силовой микроскопии. Перемагничивание осуществлялось полем зонда МСМ при проходах над образцом на малых высотах. Методами микромагнитного моделирования исследованы эффекты взаимодействия поля МСМ зонда со скирмионным состоянием намагниченности в данных структурах.

**Ключевые слова:** магнитно-силовая микроскопия, магнитный скирмион, эффекты перемагничивания, микромагнитное моделирование.

DOI: 10.21883/FTT.2019.09.48104.07N

### 1. Введение

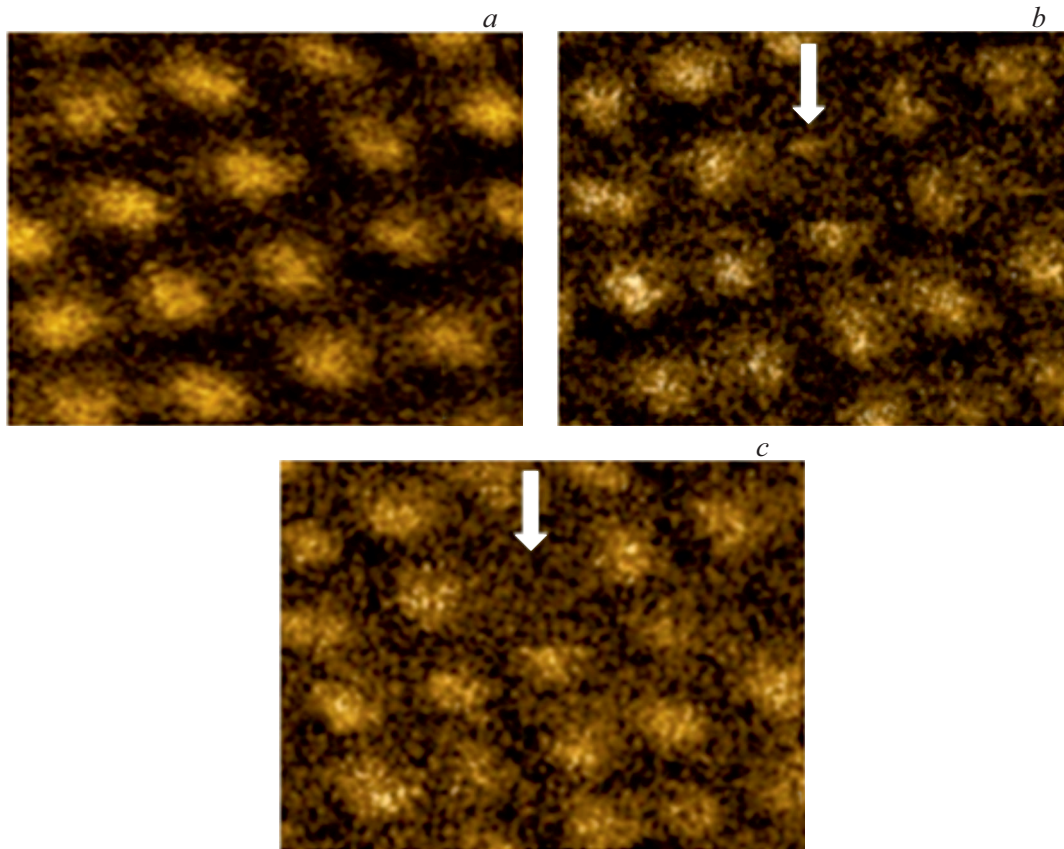
Многослойные тонкопленочные структуры с перпендикулярной анизотропией привлекают большое внимание в связи с перспективностью их использования в качестве рабочих слоев в приборных структурах спинтроники, а также в магнитных системах хранения и обработки информации [1]. Обычно наноструктурирование пленочных образцов производится посредством изменения их топологии методами литографии. Однако в последние годы были развиты новые методы наноструктурирования, основанные на облучении образцов с помощью фокусированных ионных пучков [2,3], что позволяет локально модифицировать свойства пленочных структур без изменения их рельефа. Особенно эффективен данный подход в применении к многослойным тонкопленочным структурам Co/Pt с перпендикулярной намагниченностью, в которых с помощью фокусированных ионных пучков удается локально модифицировать параметр перпендикулярной анизотропии [4–7]. В частности, в работе [8] было показано, что данный метод позволяет создавать плотные решетки искусственных магнитных скирмионов, которые могут быть применены в качестве среды для записи информации с высокой плотностью.

Одним из методов селективного управления магнитным состоянием ферромагнитных наноструктур является их локальное перемагничивание с помощью неоднородного поля зонда магнитно-силового микроскопа

(МСМ) [9]. Выбирая зонды с достаточно большим магнитным моментом, в эксперименте удастся реализовать локальное переключение намагниченности наноструктур при сканировании на малых высотах и впоследствии контролировать результаты перемагничивания, регистрируя МСМ изображения на относительно больших расстояниях зонд–образец. В частности, данная методика была использована нами при исследовании особенностей МСМ перемагничивания nanoостровков Co/Pt [10]. В настоящей работе эта методика применена для селективного перемагничивания искусственных скирмионов в модифицированной пленке Co/Pt.

### 2. Эксперимент

Исследовались многослойные структуры [Co(0.5 nm)/Pt(1 nm)]<sub>5</sub>, выращенные на Si(100) подложках с буферным подслоем Ta(10 nm)/Pt(10 nm) методом магнетронного осаждения. Данные структуры были пространственно модифицированы фокусированным ионным пучком He<sup>+</sup> в микроскопе „Orion“ с приставкой „Nanomaker“ (Carl Zeiss, Jena). Облучение образцов производилось растровым методом. Диаметр фокусированного пучка ионов составлял 5 nm, энергия ионов — 30 keV, доза облучения — 10<sup>15</sup> ions/cm<sup>2</sup>. В результате в пленке был сформирован массив 20 × 14 μm<sup>2</sup>, состоящий из модифицированных областей цилиндрической формы диаметром 100 nm,



**Рис. 1.** Последовательные МСМ изображения одного и того же участка массива скирмионов в Co/Pt. *a* — Начальное состояние. МСМ изображение при проходе на высоте 30 нм. *b* — МСМ изображение при проходе на высоте 15 нм. *c* — Конечное состояние. Стрелками показана позиция скирмиона, который изменил направление намагниченности во время сканирования на малой высоте. Размер кадров  $900 \times 700$  нм.

имеющих пониженную анизотропию и упорядоченных на квадратной решетке с периодом 200 нм [8].

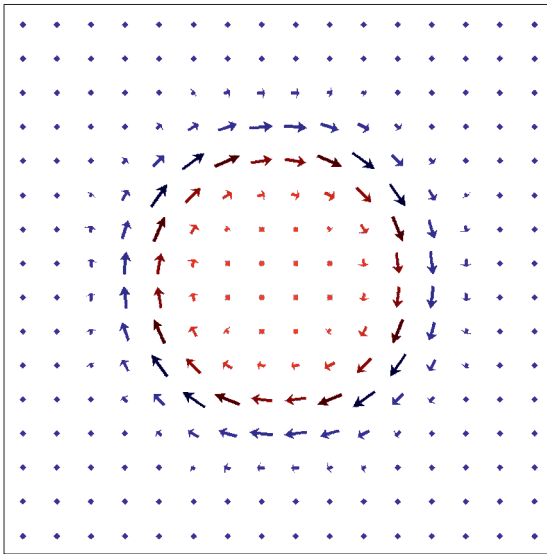
Магнитное состояние образца и эффекты перемагничивания исследовались с помощью зондового магнитно-силового микроскопа „Solver-HV“ (НТ-МДТ, Зеленоград). В качестве зондового датчика использовался стандартный кантилевер NSG-03, покрытый слоем Co толщиной 30 нм. Перед измерениями зонд намагничивался вдоль оси пирамиды во внешнем поле 2 Т. В качестве МСМ отклика регистрировался сдвиг фазы вынужденных колебаний кантилевера (возбуждаемых на резонансной частоте), вызванный градиентом поля рассеяния образца, при проходе на постоянной высоте.

В эксперименте вначале образец намагничивался до насыщения во внешнем перпендикулярном магнитном поле 500 Ое. Затем прикладывалось инвертированное поле 200 Ое, и в модифицированной пленке Co/Pt формировалась решетка скирмионов (рис. 1, *a*), так что намагниченность в скирмионах и магнитный момент зонда были направлены в противоположных направлениях. Невозмущенные МСМ изображения образца получались при проходе на больших высотах (расстояние между кончиком зонда и образцом  $> 30$  нм, амплитуда

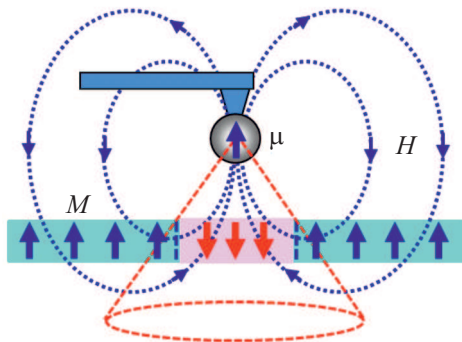
колебаний зонда  $\sim 10$  нм). При перемагничивании среднее расстояние зонд–образец сокращалось вручную в процессе сканирования до 15 нм, и наблюдались единичные переключения намагниченности скирмионов, сопровождающиеся резким изменением МСМ контраста (рис. 1, *b* и *c*).

### 3. Микромагнитное моделирование

Нами было проведено микромагнитное моделирование процесса перемагничивания скирмиона в поле зонда МСМ. Моделирование проводилось с помощью пакета Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) [11] для квадратного участка пленки Co/Pt размером  $200 \times 200$  нм, содержащего область с пониженной анизотропией диаметром 100 нм. Толщина пленки Co/Pt — 7.5 нм. В расчетах использовались усредненные материальные параметры пленок Co/Pt [8,12,13]: намагниченность насыщения —  $4 \cdot 10^5$  А/м, обменная константа —  $2 \cdot 10^{12}$  Дж/м. Поле анизотропии пленки Co/Pt выбиралось равным 413 кА/м, в модифицированной области его величина была уменьшена до 404 кА/м. Размер ячейки разбиения  $2.5 \times 2.5 \times 7.5$  нм. Вначале



**Рис. 2.** Распределение намагниченности на участке  $200 \times 200$  nm пленки Co/Pt, соответствующее скирмионному состоянию в модифицированной области диаметром 100 nm.



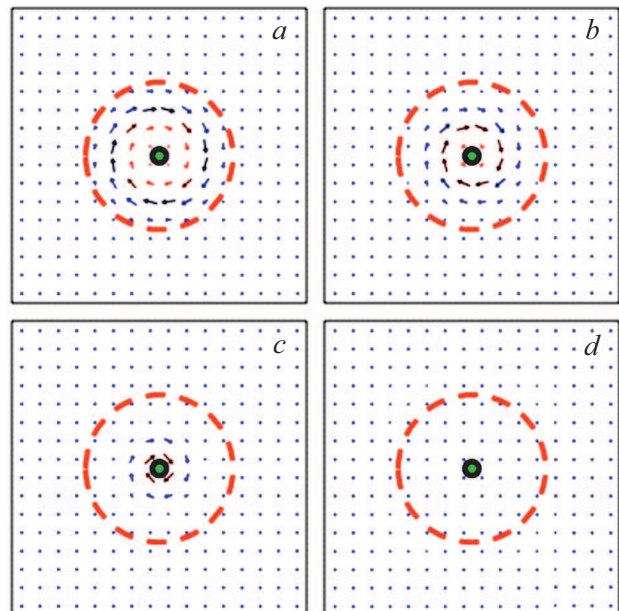
**Рис. 3.** Схематическое изображение системы зонд—образец.

образец намагничивался до насыщения во внешнем перпендикулярном магнитном поле 500 Oe. Затем прикладывалось инвертированное поле 200 Oe, и в модифицированной области пленки Co/Pt формировался искусственный скирмион, представляющий собой домен с инвертированной намагниченностью (рис. 2). Граница между областями с противоположно направленной намагниченностью представляет собой блоховскую доменную стенку.

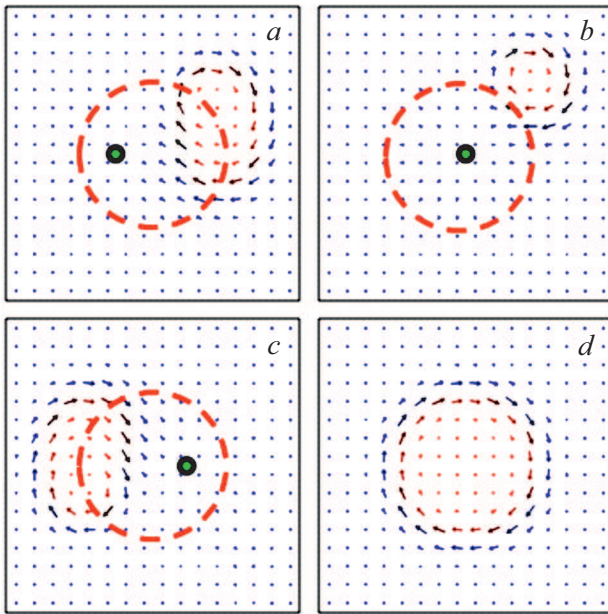
В модельных расчетах поле зонда, представлялось полем точечного магнитного диполя с магнитным моментом  $\mu$ , равным магнитному моменту однородно намагниченного шара из Co диаметром 50 nm [10]. Магнитное поле такого зонда имеет аксиально-симметричную структуру (рис. 3). При этом  $z$ -составляющая поля меняет свой знак на поверхности конуса, показанного на рисунке пунктиром. Эффекты перемагничивания скирмиона определяются величиной магнитного момента зонда и его положением над модифицированной областью.

Перемагничивание скирмиона возможно двумя способами. В первом случае перемагничивание производится при вертикальном опускании зонда в центр модифицированной области. При этом вначале зонд вдвигают от образца, и при сближении на определенное расстояние (критическое расстояние для перемагничивания) происходит изменение направления намагниченности в модифицированной области. На рис. 4 приведены последовательные стадии перемагничивания скирмиона. Из рисунка видно, что при сближении зонда с образцом происходит постепенное уменьшение диаметра домена с инвертированной намагниченностью (рис. 4, *a*) и превращение его в магнитный вихрь (рис. 4, *b* и *c*), а затем наблюдается полное перемагничивание (рис. 4, *d*). Затравкой для перемагничивания служит блоховская доменная стенка на границе домена с инвертированной намагниченностью (рис. 2). Данный процесс качественно отличается от сценария перемагничивания нанодисков Co/Pt в поле зонда MCM [10], в котором магнитный вихрь зарождается в центре диска и волна перемагничивания распространяется от центра к периферии.

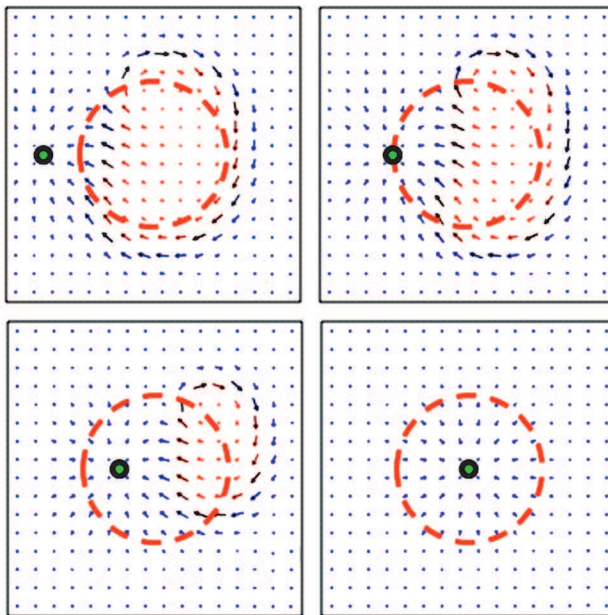
Второй способ перемагничивания реализуется, при продольном движении MCM зонда над скирмионом. В этом случае критическая высота, при прохождении на которой происходит перемагничивание, имеет меньшее значение, поскольку взаимодействие зонда и скирмиона носит более сложный характер. В качестве примера, на рис. 5 и 6 приведены последовательные стадии изменения распределения намагниченности при продольном



**Рис. 4.** Последовательные стадии перемагничивания скирмиона при вертикальном сближении зонда с образцом. *a* — Расстояние от центра зонда до поверхности образца  $h = 100$  nm, *b* —  $h = 90$  nm, *c* —  $h = 80$  nm, *d* —  $h = 60$  nm. Зонд (обозначен темным кружком) расположен над центром модифицированной области (ее граница показана пунктирной линией).



**Рис. 5.** Последовательные стадии прохождения МСМ зонда над центром модифицированной области пленки Co/Pt со скирмионным состоянием. Высота прохода (расстояние от центра зонда до поверхности образца) равно 55 nm.



**Рис. 6.** Последовательные стадии прохождения МСМ зонда над центром модифицированной области со скирмионным состоянием в пленке Co/Pt. Высота прохода (расстояние от центра зонда до поверхности образца) равно 40 nm.

прохождения МСМ зонда над модифицированной областью на различных высотах. При прохождении на достаточно большой высоте (больше критической) перемещение зонда с периферии моделируемого участка пленки к центру приводит к смещению инвертированного домена

на границу модифицированной области (рис. 5, *a* и *b*), где происходит его частичное пиннингование. Существование скирмиона в этом случае поддерживается  $z$ -компонентой поля зонда вне конуса (см. рис. 3). При дальнейшем движении зонда скирмион смещается по направлению против часовой стрелки вдоль границы модифицированной области и затем возвращается в центр (рис. 5, *d*). Аналогичные процессы наблюдались при моделировании взаимодействия МСМ зонда с магнитным вихрем в дисках из материалов с плоскостной анизотропией, где эффекты смещения вихря также были обусловлены взаимодействием поля зонда с кором и вихревой оболочкой [14].

Другая ситуация наблюдается при прохождении зонда на высоте, меньше критической. На рис. 6 показаны последовательные стадии прохождения зонда над образцом на высоте 40 nm. Вначале скирмион испытывает сильное возмущение и вытесняется полем зонда на границу модифицированной области (рис. 6, *a–c*), а затем происходит перемагничивание пленки с переходом модифицированной области из скирмионного состояния в состояние с однородной намагниченностью (рис. 6, *d*), которое и сохраняется при удалении зонда. По-видимому, аналогичный процесс имеет место при перемагничивании скирмиона в эксперименте при сканировании на малой высоте.

#### 4. Заключение

Таким образом, проведены МСМ исследования скирмионных состояний в пространственно модифицированных пленках Co/Pt с перпендикулярной анизотропией. Показано, что при сканировании образца на малых высотах наблюдаются эффекты перемагничивания скирмиона под действием поля зонда МСМ. Методами микромагнитного моделирования изучены процессы перестройки скирмионного распределения намагниченности, локализованного в области с пониженной анизотропией, в зависимости от положения зонда относительно образца. Результаты моделирования качественно объясняют наблюдаемое в эксперименте перемагничивание скирмионов в процессе сканирования образца на малых высотах.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (изготовление модифицированных образцов Co/Pt — проект 18-02-00827, эксперименты по МСМ перемагничиванию и микромагнитное моделирование — проект 18-02-00247). Использовалось оборудование ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“ ИФМ РАН и Междисциплинарного ресурсного центра по направлению „Нанотехнологии“ СПбГУ.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] R.L. Stamps, S. Breitzkreutz, J. Akerman, A.V. Chumak, Y. Otani, G.E.W. Bauer, J.-U. Thiele, M. Bowen, S.A. Majetich, M. Klaui, I.L. Prejbeanu, B. Dieny, N.M. Dempsey, B. Hillebrands. *J. Phys. D* **47**, 333001 (2014).
- [2] C. Chappert, H. Bernas, J. Ferre, V. Kottler, J.-P. Jamet, Y. Chen, E. Cambriil, T. Devolder, F. Rousseaux, V. Mathet, H. Launois. *Science* **280**, 1919 (1998).
- [3] T. Devolder, C. Chappert, Y. Chen, E. Cambriil, H. Bernas, J.P. Jamet, J. Ferre. *Appl. Phys. Lett.* **74**, 3383 (1999).
- [4] T. Devolder, J. Ferre, C. Chappert, H. Bernas, J.-P. Jamet, V. Mathet. *Phys. Rev. B* **64**, 064415 (2001).
- [5] C. Vicu, J. Gierak, H. Launois, T. Aign, P. Meyer, J.P. Jamet, J. Ferre, C. Chappert, T. Devolder, V. Mathet, H. Bernas. *J. Appl. Phys.* **91**, 3103 (2002).
- [6] A. Aziz, S.J. Bending, H. Roberts, S. Crampin, P.J. Heard, C.H. Marrows. *J. Appl. Phys.* **98**, 124102 (2006).
- [7] O.L. Ermolaeva, N.S. Gusev, E.V. Skorohodov, Yu.V. Petrov, M.V. Sapozhnikov, V.L. Mironov. *Materials* **10**, 1034 (2017).
- [8] M.V. Sapozhnikov, S.N. Vdovichev, O.L. Ermolaeva, N.S. Gusev, A.A. Fraerman, S.A. Gusev, Yu.V. Petrov. *Appl. Phys. Lett.* **109**, 042406 (2016).
- [9] В.Л. Миронов, А.А. Фраерман, Б.А. Грибков, О.Л. Ермолаева, А.Ю. Климов, С.А. Гусев, И.М. Нефедов, И.А. Шерешевский. *Физика металлов и металловедение* **110**, 708 (2010).
- [10] V.L. Mironov, B.A. Gribkov, S.N. Vdovichev, S.A. Gusev, A.A. Fraerman, O.L. Ermolaeva, A.B. Shubin, A.M. Alexeev, P.A. Zhdan, C. Binns. *J. Appl. Phys.* **106**, 053911 (2009).
- [11] M.J. Donahue, D.G. Porter. Interagency Report No. NISTIR 6376, NIST, Gaithersburg.
- [12] M.V. Sapozhnikov, R.V. Gorev, E.A. Karashtin, V.L. Mironov. *J. Magnet. Magn. Mater.* **446**, 1 (2018).
- [13] M.V. Sapozhnikov, O.L. Ermolaeva. *Phys. Rev. B* **91**, 024418 (2015).
- [14] В.Л. Миронов, О.Л. Ермолаева. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **8**, 37 (2007).

*Редактор Д.В. Жуманов*