

УДК 538.955:621.377.624.6:004.942

## ФОРМИРОВАНИЕ СКИРМИОНОВ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ CoPt ЗОНДОМ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

© 2023 г. А. Г. Темиряев<sup>1, \*</sup>, А. В. Здоровейщев<sup>2</sup>, М. П. Темиряева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязино, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского”,  
Научно-исследовательский физико-технический институт, Нижний Новгород, Россия

\*E-mail: temiryazev@gmail.com

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.

После доработки 27.10.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

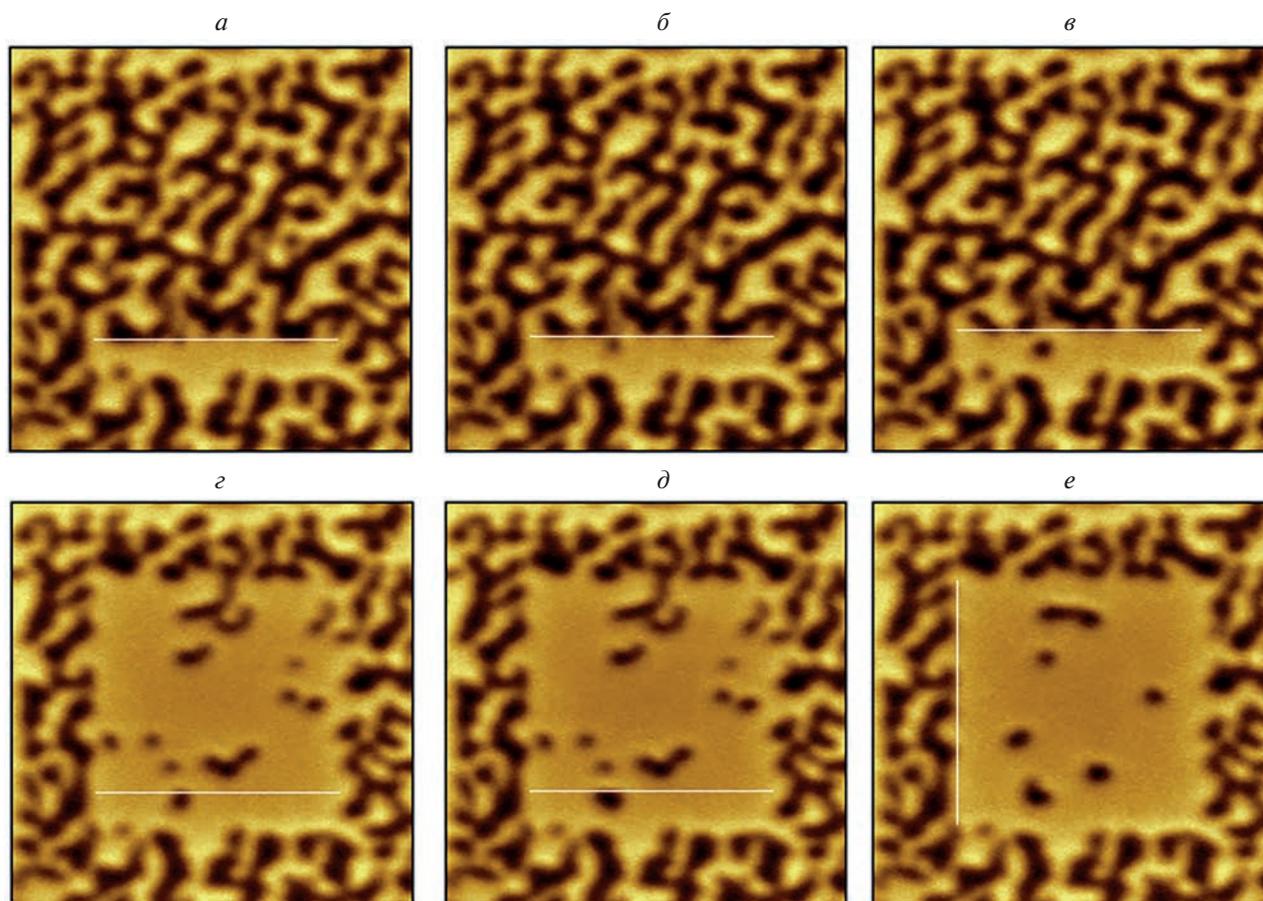
Разработаны методы магнитно-силовой микроскопии, позволяющие визуализировать эволюцию доменной структуры при сканировании образца магнитным зондом, использованные при изучении процессов образования скирмионов в тонких пленках CoPt, характерной особенностью которых является наличие взаимодействия Дзялошинского–Мории. Экспериментально продемонстрировано изменение положения, формы и размеров скирмионов под действием магнитного поля зонда.

DOI: 10.31857/S0367676522700648, EDN: HGBZDZ

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из многочисленных методик атомно-силовой микроскопии является магнитно-силовая микроскопия (МСМ), позволяющая с субмикронным разрешением исследовать доменные структуры. Основным недостатком МСМ связан с тем, что под влиянием магнитного зонда микроскопа может происходить искажение или даже существенная перестройка изучаемой доменной структуры. Чтобы ослабить данный эффект можно либо уменьшать магнитный момент зонда, либо увеличивать расстояние между зондом и образцом. Изменение расстояния позволяет один и тот же зонд использовать как для воздействия на доменную структуру, подводя его близко к поверхности, так и для визуализации произошедших изменений. Таким образом основным недостатком МСМ в ряде случаев можно рассматривать как важную и полезную особенность метода — возможность формировать определенные доменные структуры пространственно-неоднородным полем зонда. Данный подход использовался в [1, 2] для переключения намагниченности в нанодисках, изготовленных из тонкой магнитной пленки. В случае сплошной (не текстурированной) пленки особый интерес представляет применение такой методики при исследовании многослойных структур, полученных нанесением чередующихся слоев ферромагнетика и тяжелого металла. Подобные образцы часто имеют силь-

ную магнитную анизотропию с легкой осью перпендикулярной плоскости и демонстрируют наличие неколлинеарного обменного взаимодействия Дзялошинского–Мории [3, 4]. Сочетание этих свойств определяет возможность существования в таких пленках топологически устойчивых состояний — магнитных скирмионов, которые могут представлять интерес для разработки устройств хранения и обработки информации [5, 6]. В размагниченном состоянии подобные пленки имеют лабиринтную доменную структуру, из которой, как показано в работах [7–10], при сканировании магнитным зондом образуются мелкие уединенные домены. МСМ не позволяет выявить их внутреннюю структуру, однако на основании общих свойств пленок и исследований методами лоренцевской микроскопии [8] принято считать, что она близка к структуре скирмиона. В работе [9] мы продемонстрировали некоторые особенности формирования скирмионов с помощью магнитного зонда. Было отмечено, что скирмионы существенно более стабильны, чем исходная лабиринтная структура. При повторном воздействии на них тем же зондом изменения минимальны. Если пленка изначально находилась в насыщенном состоянии, то скирмионы не образуются, зонд, как правило лишь переворачивает намагниченность на участке сканирования. На основании этого можно предположить, что наличие в пленке магнитных неоднородностей в виде доменов или доменных стенок является не-



**Рис. 1.** МСМ изображения доменных структур, снятые после прохода 25-й (а), 27-й (б), 35-й линии (в), 17-й и 18-й линий второй серии (г и д), в конце 9-й серии (е).

обходимым условием при образовании скирмионов под действием магнитного зонда. Однако МСМ не позволяет визуализировать процесс формирования скирмионов при использовании стандартной двухпроходной методики. В этом случае зонд на первом проходе измеряет профиль поверхности вдоль линии сканирования. На втором проходе, когда снимается магнитное изображение, зонд движется по этому профилю, но уже на некотором удалении от поверхности. Изменение доменной структуры происходит преимущественно на первом проходе, когда зонд в полуконтактном режиме касается поверхности. Если этот процесс повторяется на каждой линии, то зонд смещает доменную границу. Изображение, построенное на измерениях второго прохода, будет хаотичным (см. рис. 1с в работе [9]), поскольку каждая линия отражает текущую форму доменной границы и содержит участки как исходного, так и нового распределения намагниченности. В данной работе мы рассмотрим методы сканирования, позволяющие расширить возможности МСМ и детально анализировать изменение до-

менной структуры под действием пространственно-локализованного магнитного поля зонда.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работах [11, 12] мы использовали следующую последовательность измерений: сначала небольшая площадь исследуемой пленки сканировалась в полуконтактном режиме (зонд касается поверхности), далее большая площадь сканировалась по плоскости, приподняв зонд на 100–150 нм над поверхностью (зонд далеко от поверхности). На полученном МСМ изображении по краям была видна исходная доменная структура, а в центре – сформированная под воздействием поля зонда. При необходимости оценить устойчивость этой структуры данная последовательность сканирований повторялась. В предлагаемом методе мы уложим задачу. В полуконтактном режиме зонд пройдет лишь одну линию (например, в направлении  $X$ ), после чего мы выполним сканирование всей площади по плоскости и получим магнитное изображение. Далее мы будем повторять эти две

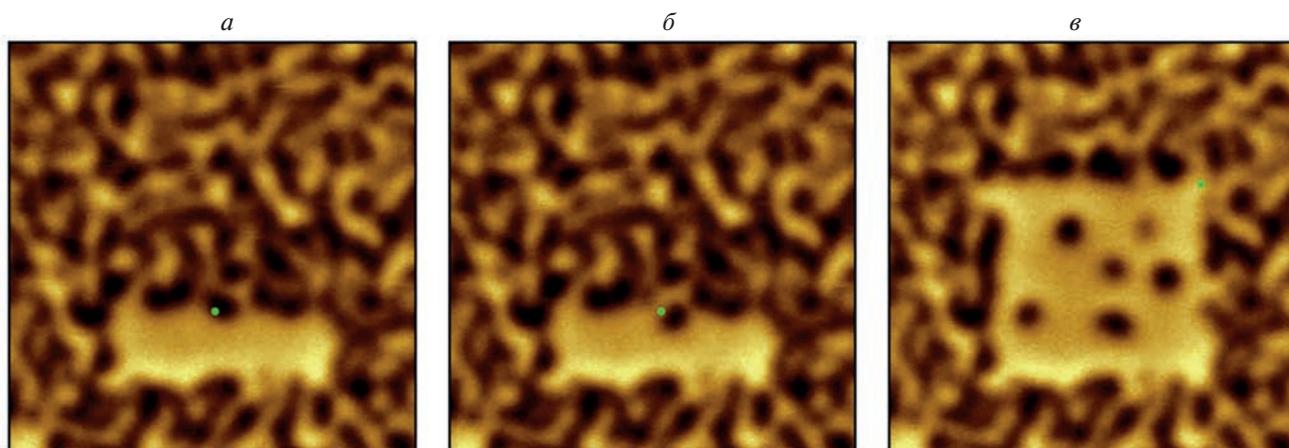


Рис. 2. МСМ изображения доменных структур, снятых в режиме “точка–скан”.

операции, последовательно сдвигая линию в  $Y$  направлении с некоторым шагом.

Таким образом мы получим серию МСМ изображений, из которых можно составить фильм, демонстрирующий, как менялась доменная структура. Небольшие изменения в последовательности сканов существенно проще анализировать в динамике, при просмотре видео. Выделив некоторые характерные моменты, можно вернуться к исходным сканам. На рис. 1 представлены изображения, полученные таким методом. Белая линия показывает положение линии прохода зонда в полуконтактном режиме. Ее длина составляет 3 мкм, расстояние по  $Y$  между соседними линиями 15 нм, размер скана  $5 \times 5$  мкм. Представлены изображения сдвига фазы колебаний зонда, обусловленного магнитным взаимодействием. Светлые области соответствуют участкам, где зонд притягивается к пленке. Проходя близко к поверхности зонд перемагничивает темные домены исходной лабиринтной структуры, оставляя за собой светлую область. Однако, сравнивая изображения после 25-го прохода (рис. 1а) и 27-го (рис. 1б), мы видим, что образуется изолированный темный домен, который далее несколько увеличивается в размерах (рис. 1в после 35-го прохода). Получив МСМ изображение после последней 201-й линии в этой серии, мы продолжили эксперимент, вернувшись вновь к первой линии. Цель состояла в том, чтобы оценить стабильность сформированных уединенных доменов по отношению воздействию поля зонда. Всего было выполнено 9 серий, в первых четырех линия прохода в полуконтакте была вдоль оси  $X$ , далее — вдоль  $Y$  и смещалась справа налево. Получившаяся в конечном результате доменная структура представлена на рис. 1е. Как видно, число скирмионов уменьшилось, однако совсем уничтожить их не удалось. При взаимодействии с зондом они

могут слегка менять свое положение, форму и размеры. Рисунки 1г и 1д соответствуют 17 и 18 линиям второй серии. Видно, что темный домен не только не исчез, а даже увеличился после 18 линии. Объяснение этого, видимо, связано с пространственной неоднородностью поля зонда. Поскольку силовые линии магнитного поля замкнуты, поле в точках, расположенных вдали от оси диполя, имеет направление противоположное полю на оси. Это может приводить к увеличению темных доменов, когда зонд находится сбоку от них.

В следующем эксперименте мы изменили методику измерений, чтобы улучшить детализацию. В предыдущем случае последовательность действий была линия — скан, то есть после прохода линии мы выполняли МСМ сканирование. Теперь же мы используем последовательность точка — скан. Каждая линия будет разбита на точки, зонд опускается в определенную точку, потом поднимается, выполняется МСМ сканирование и переход в следующую точку. Из набора МСМ изображений мы смонтируем видео и выберем наиболее интересные кадры — рис. 2. На рисунке обозначены точки подвода зонда к поверхности. Расстояние между точками на одной линии 50 нм, между линиями тоже 50 нм, 31 точка на линию, размер скана  $3 \times 3$  мкм. Вплоть до скана, приведенного на рис. 2а, зонд перемагничивал домены, переводя пройденный участок в однородное (светлое) состояние. Однако после подвода к следующей точке (рис. 2б) образовался круглый темный домен, который сдвинулся в область, уже пройденную зондом. Он остался стабильным и при дальнейшем смещении зонда. На рис. 2в представлена доменная структура, сформированная после 28 линий. Далее мы вновь вернулись на первую линию и повторили проход по первым 15 линиям. Зафиксировать уничтожения скирмионов не уда-

лось, они лишь несколько сжимались при приближении зонда. Учитывая, что, как следует из предыдущего эксперимента, аннигиляция скирмиона процесс достаточно редкий, а времени на проведение исследований используемым методом требуется много, дальнейшие измерения были прекращены. Отметим, что в данном эксперименте нам удалось экспериментально зафиксировать эволюцию доменной структуры при сканировании магнитным зондом. Ранее, насколько нам известно, подобный видеоряд был получен лишь в результате микромагнитного расчета (см. Приложение в [8]).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты были выполнены на пленках, изготовленных методом электронно-лучевого испарения попеременно двух мишеней из высокочистых Co и Pt. Пленки толщиной 8 нм, состояли из десяти бислоев Co и Pt, толщиной 0.3 и 0.5 нм соответственно. Свойства таких структур достаточно подробно отражены в работе [13]. Отметим, что остаточная намагниченность пленок после намагничивания их в перпендикулярном поле порядка 1 кЭ, была близка к намагниченности насыщения. Это определяет возможность существования в нулевом поле отдельных, далеко отстоящих друг от друга скирмионов. В работе [8], где использовались пленки, не имеющие остаточной намагниченности, под воздействием зонда образовывалась плотная решетка скирмионов.

Проведенные исследования были выполнены на атомно-силовом микроскопе SmartSPM (АИСТ-НТ) с некоммерческой, модифицированной нами, программой управления. Использовались зонды PPP-LM-MFMR (Nanosensors), имеющие пониженный магнитный момент, который, тем не менее, достаточен для перемагничивания участка пленки. Остановимся на некоторых технических деталях реализации использованных методик. При темпе сканирования в одну секунду на линию для снятия одного изображения, содержащего 256 линий, требуется более 4 мин. Для визуализации процессов перемагничивания необходимо получить как минимум несколько десятков изображений. В экспериментах, описанных в данной работе их было более тысячи. Обязательным условием реализации метода является автоматизация, позволяющая прописывать последовательность действий (сканирование, выход в заданную точку, изменение высоты, проход по линии и т.д.) и их многократное повторение. Поскольку процесс измерения занимает существенное время, в эту последовательность должны быть включены операции, обеспечивающие постоянство оптимальных параметров сканирования

(подстройка резонансной частоты зонда и поддержание заданной амплитуды). Кроме того, необходимо обеспечить компенсацию дрейфов, которые неизбежны при длительных измерениях. Мы использовали для этого привязку к какой-либо особенности, на поверхности образца [14]. Как правило, выбирался выступ, находящийся вне области сканирования и зонд сдвигался к нему. Была написана процедура, перемещающая зонд в точку с максимальной высотой. Таким образом определялись точные координаты вершины  $(x_1, y_1)$ . После каждого скана зонд передвигался в точку  $(x_1, y_1)$  и находил текущие координаты вершины  $(x_1 + \Delta x, y_1 + \Delta y)$ . Затем начало координат сканера сдвигалось на величину  $(-\Delta x, -\Delta y)$ . Такая процедура позволяет с точностью порядка 10 нм поддерживать неизменность области сканирования в течение длительного времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были разработаны методы МСМ, позволяющие визуализировать эволюцию доменной структуры при сканировании образца магнитным зондом. Эффективность данных методов продемонстрирована на примере образования скирмионов в тонких пленках CoPt и последующем сканировании области, в которой уже сформированы скирмионы. В частности, показано, что при приближении зонда скирмионы могут сдвигаться и увеличиваться в размерах.

Изготовление и исследование пленок CoPt выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-20186). Разработка новых методик атомно-силовой микроскопии выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (тема № FFWZ-2022-0008).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chang J., Mironov V.L., Gribkov B.A. et al.* // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. Art. No. 104304.
2. *Mironov V.L., Gribkov B.A., Vdovichev S.N. et al.* // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. Art. No. 053911.
3. *Dzyaloshinskii I.* // J. Phys. Chem. Solids. 1958. V. 4. P. 241.
4. *Moriya T.* // Phys. Rev. 1960. V. 120. P. 91.
5. *Wiesendanger R.* // Nature. Rev. Mater. 2016. V. 1. Art. No. 16044.
6. *Fert A., Reyren N., Cros V.* // Nature Rev. Mater. 2017. V. 2. Art. No. 17031.
7. *Здоровейщев А.В., Дорохин М.В., Вихрова О.В. и др.* // ФТТ. 2016. Т. 58. № 11. С. 2186; *Zdoroveyshchev A.V., Dorokhin M.V., Vikhrova O.V. et al.* // Phys. Solid State. 2016. V. 58. No. 11. P. 2267.
8. *Zhang S., Zhang J., Zhang Q. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. Art. No. 132405.

9. Темирязов А.Г., Темирязева М.П., Здоровейцев А.В. и др. // ФТТ. 2018. Т. 60. № 11. С. 2158; *Temiryazev A.G., Temiryazeva M.P., Zdoroveyshchev A.V.* // Phys. Solid State. 2018. V. 60. No. 11. P. 2200.
10. Casiraghi A., Corte-León H., Vafaei M. et al. // Commun. Phys. 2019. V. 2. P. 145.
11. Калентьева И.Л., Вихрова О.В., Данилов Ю.А. и др. // ФТТ. 2019. Т. 61. № 9. С. 1694; *Kalentyeva I.L., Vikhrova O.V., Danilov Y.A. et al.* // Phys. Solid State. 2019. V. 61. No. 9. P. 1646.
12. Калентьева И.Л., Вихрова О.В., Данилов Ю.А. и др. // ФТТ. 2021. Т. 63. № 3. С. 324; *Kalentyeva I.L., Vikhrova O.V., Danilov Y.A. et al.* // Phys. Solid State. 2021. V. 63. No. 3. P. 384.
13. Zdoroveyshchev A.V., Vikhrova O.V., Demina P.B. et al. // Int. J. Nanosci. 2019. V. 18. Art. No. 1940019.
14. Abe M., Sugimoto Y., Custance O., Morita S. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. Art. No. 173503.

## Formation of skyrmions in thin CoPt films with an atomic force microscope probe

A. G. Temiryazev<sup>a, \*</sup>, A. V. Zdoroveishchev<sup>b</sup>, M. P. Temiryazeva<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino, 141190 Russia

<sup>b</sup> Scientific Research Institute of Physics and Technology, Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

\*e-mail: temiryazev@gmail.com

Methods of magnetic force microscopy have been developed that make it possible to visualize the evolution of the domain structure when scanning a sample with a magnetic probe. These methods were used to study the processes of formation of skyrmions in thin CoPt films, a characteristic feature of which is the presence of the Dzyaloshinskii–Moriya interaction. A change in the position, shape, and size of skyrmions under the action of a spatially inhomogeneous magnetic field of the probe has been experimentally demonstrated.