

УДК 537.611.3:539.216.2

## ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ПЛЕНКАХ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

© 2019 г. Е. Ж. Байкенов<sup>1</sup>, И. М. Изможеров<sup>1,2</sup>, В. В. Зверев<sup>1,2, \*</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

“Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт физики металлов имени М.Н. Михеева  
Уральского отделения Российской академии наук”, Екатеринбург, Россия

\*E-mail: vvzverev49@gmail.com

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Выполнено трехмерное численное моделирование статических доменных структур в пленке Co(0001) при различных значениях внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно к поверхности пленки либо лежащего в плоскости пленки. Детально рассмотрены процессы изменения тонкой структуры доменных границ, связанные с появлением, движением и исчезновением блоховских линий и блоховских точек.

DOI: 10.1134/S0367676519070056

В магнитных пленках с перпендикулярной анизотропией и фактором качества  $Q < 1$  доменные границы (ДГ) имеют блоховскую структуру вдали от граничных поверхностей, переходящую в неелевскую вблизи границ. Появление составляющей вектора намагниченности, перпендикулярной оси анизотропии, вблизи поверхности пленки связано с тем, что здесь существенную роль играет магнитостатическое взаимодействие. ДГ в таких материалах имеют в сечениях, перпендикулярных поверхностям пленки, вихревую структуру [1, 2]. Перестройки доменной структуры пленки, происходящие при изменении внешнего магнитного поля, должны обеспечивать выполнение топологических ограничений, следующих из условия постоянства длины вектора намагниченности. Это, в частности, влечет за собой появление линейных и точечных топологических солитонов — блоховских линий (БЛ) и блоховских точек (БТ). Такие структурные элементы, являясь существенно трехмерными, остаются вне рассмотрения при двумерном моделировании полосовой доменной структуры [1]. Недостаточный интерес к изучению перестройки тонкой структуры ДГ объясняется, по-видимому, трудностями, связанными с экспериментальным обнаружением и изучением БЛ и БТ [1–5]. Между тем, особенности процессов перемагничивания, связанные с рождением и уничтожением БЛ, мо-

гут быть рассмотрены с помощью трехмерного микромагнитного моделирования.

В настоящей работе представлены результаты трехмерного микромагнитного моделирования доменных структур в пленке Co(0001). Для отыскания равновесного распределения намагниченности выполняли минимизацию полной энергии, определенной функционалом

$$W = \iiint_V (w_e + w_a + w_m + w_z) d\vec{r}, \quad (1)$$

в прямоугольной области с размерами  $L_x \times L_y \times L_z$ , при  $L_x = L_y = 1024$  нм,  $L_z = 200$  нм. Образец разбивался на  $256 \times 256 \times 64$  прямоугольных параллелепипедов. Плотности обменной  $w_e$ , анизотропной  $w_a$ , магнитостатической  $w_m$  и зеемановской  $w_z$  энергий определяются выражениями

$$w_e = A \left\{ \left( \frac{\partial \vec{m}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \vec{m}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \vec{m}}{\partial z} \right)^2 \right\},$$

$$w_a = -K_1 (\vec{k} \vec{m})^2 - K_2 (\vec{k} \vec{m})^4, \quad (2)$$

$$w_m = -\frac{1}{2} M_s \vec{m} \vec{H}^{(m)}, \quad w_z = -M_s \vec{m} \vec{H}.$$

Были взяты значения материальных констант, типичные для Co(0001) [1]: константы обмена  $A = 3.01 \cdot 10^{-11}$  Дж/м; константы одноосной анизо-

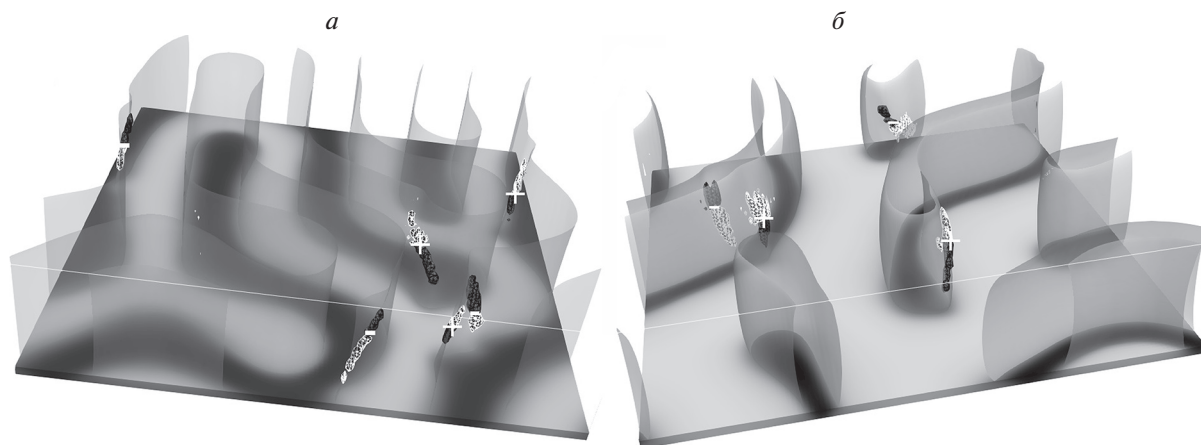


Рис. 1. *a* – Доменная структура, БЛ и БТ после первой минимизации энергии; *б* – после повторного появления доменов из однородного распределения намагниченности в результате уменьшения поля, нормального к границе пленки.

тропии  $K_1 = 4.46 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$  и  $K_2 = 1.5 \cdot 10^5 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$ ; намагниченность насыщения  $M_s = 1.435 \cdot 10^6 \text{ А/м}$  (фактор качества  $Q = 2K_1/(\mu_0 M_s^2) = 0.34 < 1$ ). На расчетную область были наложены периодические граничные условия:  $\vec{m}|_{x=0} = \vec{m}|_{x=L_x}$ ,  $\vec{m}|_{y=0} = \vec{m}|_{y=L_y}$ ; считалось, что на границах пленки (при  $z = 0$  и  $z = L_z$ ) намагниченность не закреплена. Минимизация энергии выполнялась с помощью пакета `matlab3` [6].

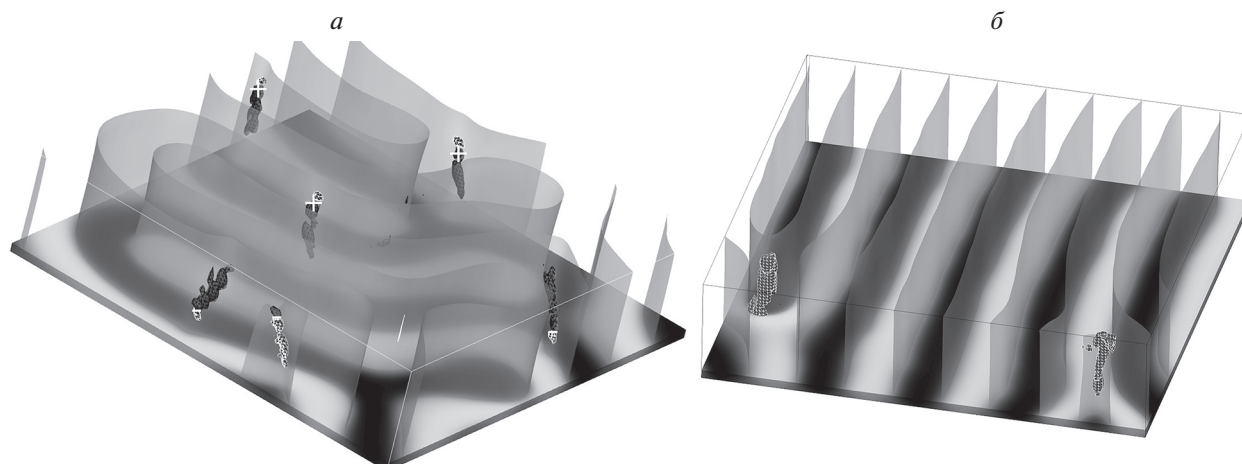
Области локализации БЛ отыскивались как области сильной неоднородности поля  $\vec{m}$ . Для их нахождения на основе данных о распределении  $\vec{m}$  рассчитывалось поле квадрата модуля плотности гиротропного вектора  $\vec{g} = [\vec{\nabla} \cos \Theta \times \vec{\nabla} \Phi]$  [7–9], выраженного здесь через угловые переменные, определяющие положение вектора намагниченности в каждой точке образца:  $\vec{m} = (\sin \Theta \cos \Phi, \sin \Theta \sin \Phi, \cos \Theta)$ . Знак  $z$ -компоненты гиротропного вектора определяет направление разворота намагниченности в БЛ. С целью отыскания пространственных положений БТ по данным для распределений  $\vec{m}$  численно рассчитывались локальные значения скирмионного числа  $\chi = (4\pi)^{-1} \oint \vec{g} d\vec{s}$ ; интегрирования выполнялись по граничным поверхностям малых кубов, последовательно пробегающих все возможные положения внутри расчетной области.

На первом этапе была найдена доменная структура, отвечающая минимуму функционала  $W(\vec{m})$  в нулевом внешнем поле. При этом в качестве исходного было использовано случайное распределение намагниченности. Благодаря этому первая минимизация энергии приводит к формированию лабиринтной структуры с большим числом БТ, каждая из которых принадлежит определенной

вертикальной БЛ. Лабиринтная доменная структура и распределение БЛ и БТ для этого случая изображены на рис. 1*a*. Темные (светлые) области на нижней грани образца изображают проекции доменов, в которых вектор намагниченности имеет направление  $\vec{m} \downarrow \uparrow \vec{k}$  ( $\vec{m} \uparrow \uparrow \vec{k}$ ), где  $\vec{k}$  – орт оси  $z$ ; доменная стенка изображена в виде светлой сетчатой цилиндрической поверхности. Поле  $|\vec{g}|^2$ , являющееся индикатором степени неоднородности поля  $\vec{m}$ , резко возрастает в местах расположения БЛ; эти области выделены темным тоном. Позиции БТ со значениями скирмионного числа (топологического заряда)  $\chi = \pm 1$  помечены знаками ( $\pm$ ). В участках БЛ, расположенных выше БТ типа (+) и ниже БТ типа (–) ( $g_z > 0$ ; белая триангуляционная сетка на поверхности) направления поворота намагниченности одинаковы и противоположны направлениям поворота намагниченности в дополняющих их более темных участках БЛ ( $g_z < 0$ ).

Были найдены статические конфигурации намагниченности при различных значениях внешнего постоянного поля  $\vec{H}$ . Для поля, перпендикулярного поверхности пленки, был пройден диапазон от 0 до 1.5 Тл в прямом и обратном направлениях. Наблюдались парные аннигиляции БЛ с БТ разного типа. Однако часть БЛ была унаследована цилиндрическими доменами, появление которых предшествовало установлению однородной намагниченности. При уменьшении поля возникали изолированные домены, несущие БЛ; типично на один домен приходилось две БТ с разными значениями топологического заряда (рис. 1*б*).

Для поля, лежащего в плоскости пленки, был пройден диапазон от 0 до 1 Тл. При малых значе-



**Рис. 2.** *a* – Доменная структура, БЛ и БТ после первой минимизации энергии; *б* – после повторного появления доменов из однородного распределения намагниченности в результате уменьшения поля, параллельного границе пленки.

ниях поля также наблюдались аннигиляции пар БЛ (рис 2*a*), иногда приводившие к изменению (скачком) формы ДГ. При дальнейшем возрастании поля БЛ приобретали ориентацию вдоль плоскости пленки; при этом БТ исчезали. При уменьшении значения поля состояние с однородной намагниченностью превращалось в полосовую доменную структуру с дислокациями. Появлялось небольшое число БЛ, сосредоточенных вблизи “головок” оборванных доменов (рис. 2*б*), на которых при дальнейшем уменьшении поля возникали БТ (такая локализация БЛ согласуется с данными работы [10]).

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема “Магнит” Г. р. № АААА-А18-118020290129-5), а также проекта УрОРАН 18-10-2-5 при финансовой поддержке, согласно постановлению № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубовик М.Н., Филиппов Б.Н. // ФММ. 2017. Т. 118. № 11. С. 1; Dubovik M.N., Filippov B.N. // Phys. Met. Metallography. 2017. V. 118. № 11. P. 1031.
2. Kisielewski M., Maziewski A., Zablotzki V. // JMMM. 2007. V. 316. P. 277.
3. Donzelli O., Bassani M., Spizzo F. et al. // JMMM. 2008. V. 320. P. e261.
4. Suszka A.K., Etxebarria A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. Art. № 222402.
5. Fallarino L., Hovorka O., Berger A. // Phys. Rev. B. 2016. V. 94. Art. № 064408.
6. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M. et al. // AIP Adv. 2014. V. 4. Art. № 107133.
7. Зверев В.В., Филиппов Б.Н. // ФТТ. 2016. Т. 58. № 3. С. 473; Zverev V.V., Filippov B.N. // Phys. Sol. St. 2016. V. 58. № 3. P. 485.
8. Зверев В.В., Филиппов Б.Н., Дубовик М.Н. // ФТТ. 2017. Т. 59. № 3. С. 506; Zverev V.V., Filippov B.N., Dubovik M.N. // Phys. Sol. St. 2017. V. 59. № 3. P. 520.
9. Зверев В.В., Изможеров И.М., Филиппов Б.Н. // ФТТ. 2018. Т. 60. № 2. С. 294; Zverev V.V., Izmozherov I.M., Filippov B.N. // Phys. Sol. St. 2018. V. 60. № 2. P. 299.
10. Pamyatnykh L.A., Filippov B.N., Agafonov L.Y. et al. // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 18084.