

УДК 537.611.3:539.216.2

НЕРЕГУЛЯРНАЯ ДИНАМИКА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ В ДВИЖУЩИХСЯ ГРАНИЦАХ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ ПРИ НАЛИЧИИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И ТЕПЛОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ

© 2019 г. В. В. Зверев^{1,2,*}, И. М. Изможеров^{1,2}, Е. Ж. Байкенов¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

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

²Федеральное 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 27.06.2019 г.

В рамках микромагнитного подхода численно изучены особенности внутренней динамики неоднородной доменной границы, движущейся в пленке из пермаллоя, при наложении периодических граничных условий. Рассмотрен случай малых случайных пространственных вариаций направлений осей анизотропии при нулевой температуре, а также случай термических флуктуаций в пленке с одноосной анизотропией. Показано, что флуктуации, изменяя траектории движения топологических солитонов, не оказывают влияния на “быстрые” процессы перестроек топологической структуры.

DOI: 10.1134/S0367676519100302

Трехмерное микромагнитное моделирование позволило показать, что предсказанные ранее эффекты возникновения колебаний скорости доменной границы (ДГ) (одномерная модель [1]) и перестроек продольной вихревой структуры ДГ (двумерные модели [2]) не исчерпывают всех возможностей сложного динамического поведения ДГ в образцах конечного размера. В частности, в магнитных пленках в результате продольной неустойчивости ДГ или при наличии неоднородностей начального распределения намагниченности появляются топологические солитоны, имеющие вид линейных вихрей [3] (выходящих на граничные поверхности или замыкающихся внутри пленки), и блоховские точки (БТ). Динамика таких структур в однородных пленках и постоянном магнитном поле рассматривалась в [4–6]. В данной работе мы исследуем влияние на динамику случайных пространственных неоднородностей анизотропии и тепловых флуктуаций.

В прямоугольной области с размерами $L_x \times L_y \times L_z$, при $L_x = 400$ нм, $L_y = 12.5\text{--}100$ нм, $L_z = 800$ нм (шаг кубической сетки $d = 3.125$ нм) методом Хьюна численно интегрировались уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma[\vec{m}\vec{H}_{eff}] + \alpha\left[\vec{m}\frac{d\vec{m}}{dt}\right], \quad (1)$$

$$\vec{H}_{eff} = 2AM_s^{-1}\Delta\vec{m} + 2KM_s^{-1}\vec{k}(\vec{k}\vec{m}) + \vec{H}^{(m)} + \delta\vec{H} + \vec{k}H, \quad (2)$$

где $\vec{m} = \vec{M}/M_s$ – нормированное поле намагниченности \vec{M} ; \vec{k} – орт оси z . Эффективное поле \vec{H}_{eff} является суммой (слева направо) обменного поля, поля анизотропии, магнитостатического поля $\vec{H}^{(m)}$, поля термических флуктуаций $\delta\vec{H}$ и постоянного внешнего магнитного поля $H = 0.01$ Тл. Для выполнения расчетов использовался пакет `mtax3` [7]. Были использованы значения материальных констант, типичные для пермаллоя безмагнотрикссионного состава: константы обмена $A = 1.3 \cdot 10^{-11}$ Дж · м⁻¹ и одноосной анизотропии $K = 10^2$ Дж · м⁻³; намагниченность насыщения $M_s = 8.6 \cdot 10^5$ А/м; параметр затухания $\alpha = 0.02$. На расчетную область были наложены граничные условия: $\vec{m}|_{x=0} = \vec{k}$, $\vec{m}|_{x=L_x} = -\vec{k}$, $\vec{m}|_{z=0} = \vec{m}|_{z=L_z}$; на границах пленки ($y = 0$ и $y = L_y$) намагниченность не закреплена.

Для анализа результатов микромагнитного моделирования были разработаны методы динамической визуализации топологических солитонов, базирующиеся на численном расчете значений топологических зарядов двух типов [4–6]: 1) числа вращения $J = (2\pi)^{-1} \oint d\Phi$, равного числу полных оборотов, совершаемых проекцией вектора \vec{m} на некоторую плоскость при обходе замкнутого контура; 2) скирмионного чис-

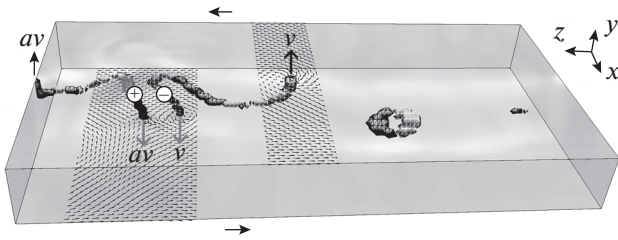


Рис. 1. “Мгновенный снимок” вихревой конфигурации в расчетной области.

ла $\chi = (4\pi)^{-1} \iint d\Omega$, имеющего смысл степени отображения находящейся в координатном пространстве замкнутой поверхности, охватывающей некоторую область, на сферу $|\vec{m}| = 1$.

На рис. 1 изображена вихревая конфигурация в пленке толщиной $L_y = 100$ нм в момент времени $t = 1.885$ нс. Осевые линии светлых (темных) трубчатых поверхностей обозначают местоположения коров вихрей (v) и антивихрей (av), имеющих в области ядра положительную (отрицательную) проекцию намагниченности на ось y . Вихревые нити, расположенные в левой части образца, выходят на граничные поверхности пленки в виде поверхностных вихрей (антивихрей), и содержат БТ (+) и (–) со значениями скирмионного заряда $\chi = +1$ и $\chi = -1$. В правой части образца имеется замкнутая вихревая структура, расположенная внутри пленки. Вертикальными (горизонталь-

ными) стрелками показаны направления векторов намагниченности в ядрах поверхностных вихрей и антивихрей (в доменах). Для нахождения положений линейных вихрей мы рассчитывали значения J с использованием плоскостей, параллельных плоскости xz ; координаты БТ определяли путем расчета значений χ (подробное описание процедур описано в [4–6]).

На рис. 2 изображены графики зависимостей от времени z -координат центров поверхностных v и av на границах пленки и z -координат БТ (ось z совпадает с осью ДГ). Графики на рис. 2а–в отвечают случаю отсутствия случайных возмущений; на рис. 2г–2е – случаю введения “шумового” магнитного поля, имитирующего термические флуктуации при температуре $T = 300$ К [7]. Также был рассмотрен случай малых случайных пространственных вариаций направлений осей анизотропии при $T = 0$ К (направления различны в 16 подобластях рабочей области, разброс углов ~ 0.01 рад). Траектории движения v , av и БТ в этом случае отличаются от изображенных на рис. 2; при этом общая картина движения сохраняется.

В работах [5, 6] была дана классификация основных “быстрых” процессов топологических трансформаций, к которым относятся рождения и аннигиляции пар v/av на границах пленки, а также пар БТ (+)/(–) с противоположными топологическими зарядами внутри образца; трехсолитонные процессы $v/av/(\pm)$ (последние обозначены на рис. 2 латинскими и греческими буквами).

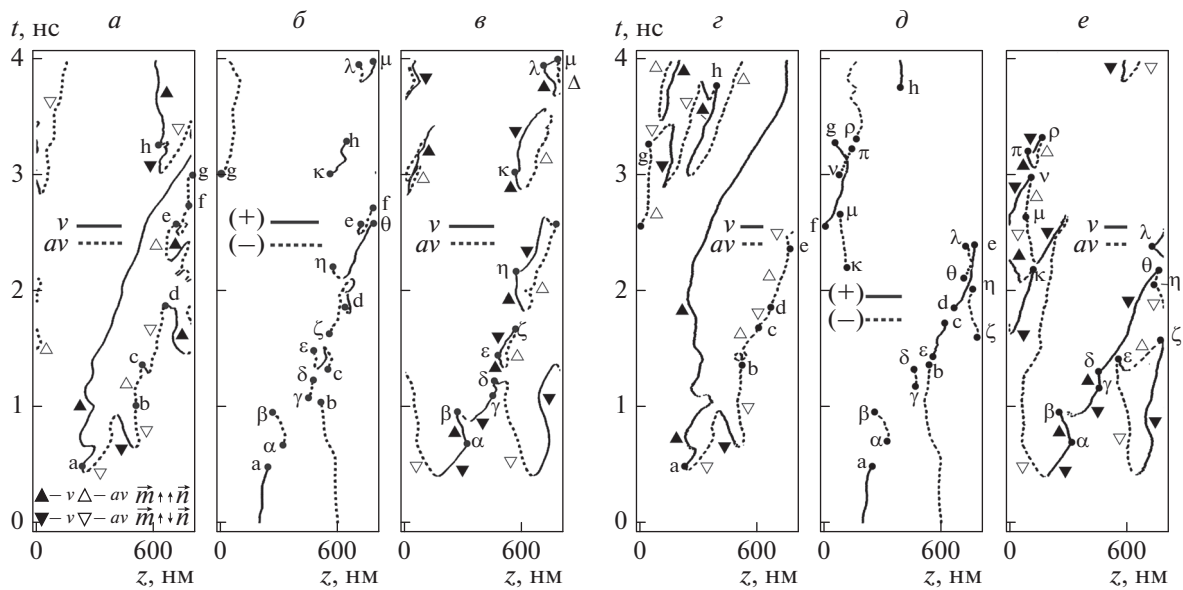


Рис. 2. Графики зависимостей от времени z -координат центров вихрей (v) и антивихрей (av) на верхней (a, e) и нижней ($в, e$) границах пленки; БТ точек типа (+) и (–) внутри пленки ($б, д$). В начальный момент времени распределение намагниченности содержит две БТ; значения температуры $T = 0$ К ($a–в$) и $T = 300$ К ($г–e$). Векторы \vec{n} задают направления внешних нормалей к границам пленки.

Анализируя графики на рис. 2, можно прийти к выводу, что “быстрые” процессы не чувствительны к введению малых случайных возмущений. В то же время такие возмущения изменяют глобальную внутреннюю динамику ДГ существенным образом. Так же, как и в известном случае “турбулентного” (хаотического) движения систем с неустойчивыми траекториями, происходит “накопление отклонений”, в результате которого в определенные моменты времени изменяется общий характер движения. При этом, как при наличии случайных факторов, так и при их отсутствии, реализуются одни и те же “сценарии”, характеризующие динамику на относительно небольших промежутках времени (типичные последовательности рождений и исчезновений пар v/av , одиночных БТ и пар БТ).

С макроскопической точки зрения наиболее важным следствием наличия внутренней динамики у ДГ является изменение ее скорости. В пленках толщиной $L_y = 12.5$ и 25 нм начальные конфигурации, получаемые путем минимизации энергии, имеют вид последовательностей сквозных v и av (ДГ со структурой cross-tie). После включения поля $H = 0.01$ Тл v и av начинают перемещаться вдоль движущейся ДГ, также могут меняться (скачком) направления намагниченности в корах v и av ; при этом в течение первых 4 нс при $T = 0$ и $T = 300$ К траектории движения v и av , и скорости ДГ практически одинаковы. При $L_y \geq 50$ нм стационарной начальной конфигурацией с минимальной энергией является одновихревая ДГ [2]. При $L_y = 62.5$ – 100 нм движение вихревых структур сопровождается множественным рождением БТ, приобретая турбулентный характер, и становится чувствительным к случайным возмущениям, что приводит к изменению скорости ДГ. К

примеру, при $L_y = 62.5; 75; 87.5; 100$ нм скорости ДГ равны $V_{ДГ} = 51; 92; 133; 188$ м/с для $T = 0$ К и $V_{ДГ} = 62; 145; 127; 128$ м/с для $T = 300$; разброс достигает 60 м/с. В пленке с $L_y = 100$ нм в поле $H = 0.01$ Тл средняя скорость ДГ уменьшается с ростом температуры: $V_{ДГ} \approx 160$ м/с при $T < 50$ К; $V_{ДГ} \approx 120$ м/с при $T = 150$ – 300 К. Средняя плотность энергии ДГ меняется при турбулентном движении нерегулярным образом.

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема “Магнит” Г.р. № АААА-А18-118020290129-5), при финансовой поддержке в рамках проекта, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 211 (контракт № 02.А03.21.0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schryer N.L., Walker L.R. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 5406.
2. Филиппов Б.Н. // ФНТ. 2002. Т. 28. С. 991; Filippov B.N. // Low Temp. Phys. 2002. V. 28. № 10. P. 707.
3. Noske M., Stoll H., Fähnle M. et al. // Phys. Rev. B. 2015. V. 91. Art. № 014414.
4. Зверев В.В., Филиппов Б.Н. // ЖЭТФ. 2013. Т. 144. С. 126; Zverev V.V., Filippov B.N. // J. Exp. Theor. Phys. 2013. V. 117. № 1. P. 108.
5. 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.
6. 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.
7. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M. et al. // AIP Adv. 2014. V. 4. Art. № 107133.