

УДК 537.611.3, 519.63

DOI: 10.31040/2222-8349-2023-0-1-19-23

**ОДНОМЕРНАЯ ДИНАМИКА ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЫ
В СЕМИСЛОЙНОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ СТРУКТУРЕ**

© В.Н. Назаров, К.Ю. Самсонов, Е.Г. Екомасов

На примере семислойной ферромагнитной структуры с тремя тонкими и четырьмя широкими магнитными слоями рассмотрена динамика доменной границы. Структура доменной границы представлена в виде кинкового решения уравнения синус-Гордона. Уравнение движения для намагниченности решалось численно с использованием явной схемы. Дискретизация уравнения проводилась по стандартной пятиточечной схеме типа «крест». В работе показаны особенности динамики доменной границы в мультислойной магнитной системе при наличии тонких магнитных слоев с увеличенным значением константы магнитной анизотропии. Тонкие слои с повышенной величиной константы магнитной анизотропии по сравнению с однородным состоянием представляют собой потенциальные барьеры для движущейся доменной границы. Построена диаграмма возможных сценариев динамики доменной границы в зависимости от начальной скорости ее движения и расстояния между тремя тонкими магнитными слоями. Получено максимальное значение скорости движения кинка для отражения от всех потенциальных барьеров в зависимости от их размеров. С увеличением высоты и ширины барьера нелинейно растет значение такой пороговой максимальной скорости отражения доменной границы. При достаточно большой высоте барьера наблюдается уже практически линейная зависимость от ширины этой пороговой скорости. При небольшом увеличении скорости движения доменной границы кинк может пройти через первый барьер, но отражается от второго барьера. Существует также случай колебания кинка между вторым и третьим потенциальными барьерами. Такие колебания явно носят негармонический характер. Получена зависимость пороговой скорости от расстояния между барьерами. С увеличением расстояния между барьерами значение пороговой скорости стремится к величине, равной пороговой скорости для одного барьера. В работе получено минимальное значение скорости доменной границы прохождения всех слоев в зависимости от параметров потенциальных барьеров. Обнаружено также наличие критического расстояния, разделяющего динамику доменной границы на две области с качественно различным поведением системы.

Ключевые слова: доменная граница, локализованная волна намагниченности, мультислойный ферромагнетик, резонансная динамика.

Введение. Многослойные ферромагнитные структуры часто представляют собой периодически чередующиеся слои двух материалов с различными магнитными параметрами [1]. Исследование даже одномерных моделей динамики спиновых волн и магнитных неоднородностей, распространяющихся в таких системах перпендикулярно границам раздела слоев, дает понимание влияния неоднородности параметров на рассматриваемые процессы [2–4]. При теоретическом исследовании динамики линейных и нелинейных волн намагниченности, распространяющихся перпендикулярно слоям,

часто вводится пространственная модуляция магнитных параметров магнетика [2–6]. В таких системах возможен пиннинг доменных границ (ДГ), генерация локализованных волн намагниченности типа магнитных солитонов и бризеров. Наличие локализованных магнитных неоднородностей существенно меняет динамику спиновых волн и доменных границ [4, 7]. Особый интерес к изучению данного вопроса в настоящее время связан с появлением новых уникальных экспериментальных методик, позволяющих изучать процессы формирования и распространения волн намагниченности

НАЗАРОВ Владимир Николаевич – к.ф.-м.н., Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН,
e-mail: nazarovvn@gmail.com

САМСОНОВ Кирилл Юрьевич, Тюменский государственный университет,
e-mail: k.y.samsonov@gmail.com

ЕКОМАСОВ Евгений Григорьевич – д.ф.-м.н., Уфимский университет науки и технологий,
e-mail: EkomasovEG@gmail.com

на нанометровом уровне [8, 9]. Показано, что задачу описания одномерной динамики ДГ в трех- и пятислойных ферромагнетиках, представляющих собой структуры из чередующихся широких и тонких магнитных слоев с разными магнитными параметрами анизотропии, при определенных условиях можно свести к задаче о взаимодействии кинков уравнения синус-Гордона УСГ с примесями [3–6]. В настоящей работе исследуется динамика доменных границ в семислойной ферромагнитной структуре.

Основные уравнения и метод решения.

Рассмотрим семислойную ферромагнитную структуру, состоящую из четырех широких слоев, разделенных тремя тонкими слоями, находящимися на расстоянии d друг от друга. Широкие и тонкие магнитные слои отличаются друг от друга значениями константы магнитной анизотропии. Рассмотрим простой случай движения по инерции и отсутствия затухания. Параметры анизотропии считаем функциями от координаты x , направленной перпендикулярно границе раздела слоев. Используем для описания динамики намагниченности сферические координаты – $\mathbf{M}(\cos\varphi\sin\theta, \sin\varphi, \cos\varphi\cos\theta)$, где $0 \leq \theta \leq 2\pi$ – угол в плоскости yz между направлением вектора магнитного момента и осью легкого намагничивания (ось Oz), $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$ – угол, описывающий выход \mathbf{M} из плоскости ДГ. Учитывая в плотности энергии магнетика обменное взаимодействие и анизотропию, и считая $\varphi \ll 1$, уравнение движения для намагниченности в угловых переменных в одномерном случае можно представить в следующем безразмерном виде [10]:

$$\Delta\theta - \ddot{\theta} - \frac{1}{2}f(\bar{r})\sin 2\theta = 0. \quad (1)$$

где $f(x) = K(x) = K_1(x)/K_1^0$ – функция, определяющая пространственную модуляцию параметра обменного взаимодействия и константы анизотропии, K_1^0 – константа анизотропии в толстых слоях. Время t нормировано на $4\pi M_S \gamma \sqrt{Q}$, где $Q = K_1/(2\pi M_S^2)$ – фактор качества материала. Координата x нормирована на δ_0 , где δ_0 – ширина статической блоховской ДГ. При получении уравнения (1) считалось, что $K_1 \ll 2\pi M_S^2$. Такая постановка задачи справедлива для класса обычных одноосных ферромагнетиков. Отметим, что т.к. для них ширина доменной границы имеет величину сотен нано-

метров, то рассматриваемые ширины тонких магнитных слоев тоже могут быть наноразмерными. Уравнение (1) при нулевой правой части и $K(x)=1$ переходит в известное уравнение синус-Гордона [4].

Функцию $K(x)$ будем моделировать функцией в форме прямоугольника:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & |x| > W/2, |x+d| > W/2, |x-d| > W/2 \\ K, & |x| < W/2, |x+d| < W/2, |x-d| < W/2 \end{cases}, \quad (2)$$

где W – параметр, характеризующий ширину тонкого магнитного слоя, K – величина нормированной константы магнитной анизотропии в области тонкого магнитного слоя. Отметим, что тонкие слои с повышенной величиной константы магнитной анизотропии по сравнению с величиной магнитной анизотропии в толстых слоях представляют собой потенциальные барьеры для движущейся ДГ. В предельном случае, когда тонкие слои можно считать бесконечно тонкими, уравнение (1) можно решить аналитически [11]. При произвольных значениях параметров W и K уравнение (1) можно решить только численно. Для численного решения использовалась явная схема. Дискретизация уравнения проводилась по стандартной пятиточечной схеме типа «крест», обладающей условием устойчивости $(\Delta t / \Delta x)^2 \leq 0.5$, где Δt – шаг по времени, Δx – шаг по координате. В начальный момент времени имеем ДГ блоховского типа, движущуюся с постоянной скоростью v_0 , а граничные условия имеют вид: $\theta(-\infty, t) = 0$, $\theta(+\infty, t) = \pi$, $\theta(\pm\infty, t) = 0$. Кроме того, используемая схема удобна тем, что является «одношаговой», использует сравнительно небольшое количество обращений к памяти и обладает потенциалом для оптимизации вычислительного алгоритма. В ходе численного эксперимента ДГ пересекает области тонких слоев, при этом в каждый момент времени рассчитывается структура ДГ и ее основные динамические характеристики: положение центра, скорость и траектория движения.

Динамика доменной границы. Для определенности начало координат положим в центре второго барьера, центры других барьеров будут находиться по обе стороны от него с безразмерными координатами $x_1 = -3$ и $x_3 = 3$, $W=1$, $K=1.2$. Пусть доменная граница движется из бесконечности в сторону потенциальных барьеров. Исключая взаимодействие ДГ с барьерами в начальный момент времени, в нашей задаче необходимо начальное положение ДГ задавать

достаточно далеко от барьеров. Численный анализ показывает, что достаточно хорошо показывает себя случай с начальной координатой кинка $x = -10$. При некоторой начальной скорости ДГ меньше или равной 0.296 происходит отражение от первого барьера и движение обратно с той же по модулю скоростью (рис. 1, кривая 1 на рис. 2). Поэтому такую скорость $v=0.296$ будем считать максимальной скоростью для отражения от всех барьеров при заданных параметрах. С увеличением параметров K и W нелинейно растет значение такой пороговой максимальной скорости отражения ДГ от барьеров. Однако при достаточно большой высоте барьера (например, $K > 2$) наблюдается уже практически линейная зависимость от K этой пороговой скорости. Если проанализировать зависимость этой скорости от расстояния между барьерами (параметра d), то при увеличении расстояния между барьерами (когда уже теряется их коллективное влияние на динамику) она стремится к величине равной пороговой скорости для одного барьера. При небольшом увеличении скорости движения ДГ кинк может пройти через первый потенциальный барьер, но отражается от второго барьера (кривая 3 на рис. 2). Здесь возможны два варианта развития событий. Если ДГ движется со скоростью 0.297, в момент времени $t \approx 64$ он проходит первый барьер и отражается от второго, и, двигаясь обратно, проходит опять через первый барьер и уходит на бесконечность (кривая 3 на рис. 2). Но в небольшом интервале скоростей $0.296 < v < 0.297$ можно увидеть третий вариант развития событий. ДГ, пройдя через первый барьер, теряет часть энергии при взаимодействии с барьером. Когда она отражается от второго, ей не хватает энергии пройти обратно первый барьер и она уже отражается от него. Таким образом, при определенной начальной скорости 0.29654, ДГ будет двигаться в области, ограниченной первым и вторым барьерами (кривая 2 на рис. 2, рис. 3). Случай прохождения ДГ двух барьеров и отражение от третьего не обнаружен, он возможен лишь при наличии затухания в системе. При $W=1$, $K=2$ увеличивая скорость ДГ можно наблюдать описанные выше сценарии динамики ДГ. Однако, увеличивая скорость, можно увидеть и четвертый возможный вариант развития событий. ДГ, пройдя через второй барьер она отражается от третьего и начинает колебаться между ними. Отметим, что колебания ДГ между первым и вторым, между

вторым и третьим барьерами носит явно не гармонический характер.

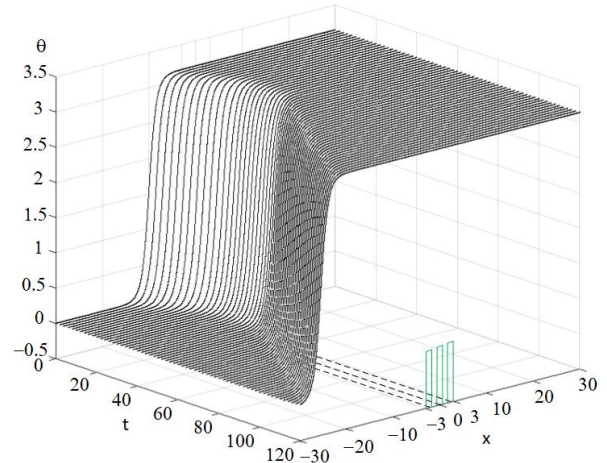


Рис. 1. Динамика ДГ при скорости $v_0 = 0.296$, $W = 1$, $K = 1.2$

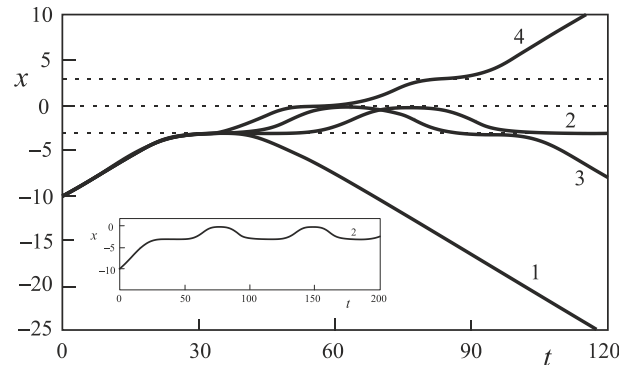


Рис. 2. Зависимость координаты центра ДГ x от времени при $W=1$, $K=1.2$. Линии: 1 – отражение ДГ, движущейся со скоростью 0.296, от первого потенциального барьера; 2 – прохождение ДГ движущейся со скоростью 0.29654 через первый барьер, отражение от второго, и дальнейшее замкнутое движение между первым и вторым барьерами; 3 – прохождение ДГ, движущейся со скоростью 0.297, через первый барьер и отражение от второго; 4 – прохождение ДГ, движущейся со скоростью 0.299, через три барьера

С еще большим увеличением начальной скорости (начиная со значения скорости 0.29809237) ДГ может преодолеть уже все три барьера и уйти на бесконечность. Отметим, что при прохождении от среднего барьера, скорость падает в 10000 раз, т.е. практически до нуля. Отметим, что подобное динамическое поведение ДГ было получено ранее и для случая бесконечно тонких слоев [11], когда вместо функции (1) использовалась дельта-функция. Можно ожидать, что и изменение вида функции (1),

например, на функцию гиперболического вида, что уже исследовалось ранее для случая трех- и пятислойной структуры [5], не приведет к качественному изменению динамического поведения ДГ.

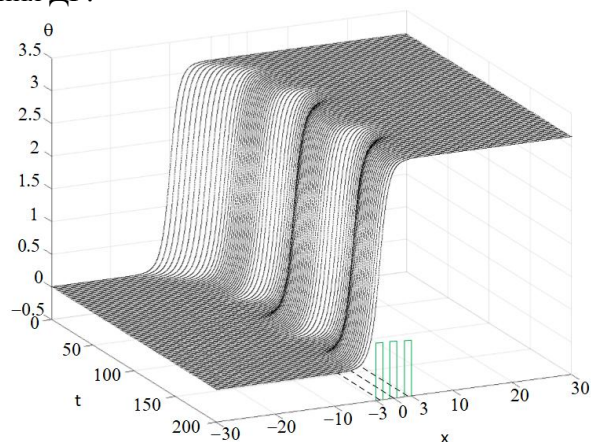


Рис. 3. Динамика ДГ при $v_0 = 0.29654$ и параметрах $W = 1$, $K = 1.2$

Таким образом, в зависимости от скорости доменной границы и параметров слоев, наблюдается прохождение доменной границы сквозь семислойную ферромагнитную структуру, отражение от области тонкого слоя и междуслойный пиннинг. Отметим, что подобное динамическое поведение ДГ было обнаружено при численном счете и для других значениях параметров W и K .

Литература

1. Tang D.D., Le Y.-J. *Magnetic Memory Fundamentals and Technolog.* New York: Cambridge University Press, 2010.
2. Gusieva Y., Graczyk P., Gorobets O., Krawczyk M. Excitation of Bulk Spin Waves by Acoustic Wave at the Plane Defect of a Ferromagnet // *Acta Physica Polonica A.* 2018. V. 133. 489 p.
3. Gumerov A.M., Ekomasov E.G., Kudryavtsev R.V. One-dimensional dynamics of magnetic inhomogeneities in a three- and five-layer ferromagnetic structure with different values of the magnetic parameters // *Journal of Physics: Conference Series.* 2019. V. 1389. P. 012004.
4. Шамсутдинов М.А., Ломакина И.Ю., Назаров В.Н., Харисов А.Т., Шамсутдинов Д.М. Ферро- и антиферромагнитодинамика. Нелинейные колебания, волны и солитоны. М.: Наука, 2009. 456 с.
5. Ekomasov E.G., Murtazin R.R., Nazarov V.N. Excitation of magnetic inhomogeneities in three-layer ferromagnetic structure with different parameters of the magnetic anisotropy and exchange // *JMMM.* 2015. V. 385. 217 p.

6. Гумеров А.М., Екомасов Е.Г., Кудрявцев Р.В., Фахретдинов М.И. Генерация локализованных магнитных неоднородностей на дефектах, как новый канал затухания для движущейся доменной границы // *Письма о материалах.* 2018. Т. 8. 299 с.
7. Kiselev V.V., Rascovalov A.A. Forced motion of breathers and domain boundaries against the background of nonlinear magnetization wave // *Chaos, Solitons & Fractals.* 2012. V. 45. 1551 p.
8. Tetienne J.P., Hingant T., Kim J.V., Diez L.H., Adam J.P., Garcia K., Roch J.F., Rohart S., Thiaville A., Ravelosona D., Jacques V. Nanoscale imaging and control of domain-wall hopping with a nitrogen-vacancy center microscope // *Science.* 2014. V. 344. 1366 p.
9. Gerasimov M.V., Logunov M.V., Spirin A.V., Nozdrin Yu.N., Tokman I.D. Time evolution of domain-wall motion induced by nanosecond laser pulses // *Phys. Rev. B.* 2016. V. 94. P. 014434.
10. Ekomasov E.G., Gumerov A.M., Kudryavtsev R.V., Dmitriev S.V., Nazarov V.N. Multisoliton dynamics in the sine-gordon model with two point impurities // *Brazilian Journal of Physics.* 2018. V. 48. P. 576–584.
11. Екомасов Е.Г., Самсонов К.Ю., Гумеров А.М., Кудрявцев Р.В. Структура и динамика локализованных нелинейных волн уравнения синус-Гордона в модели с одинаковыми притягивающими примесями // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика.* 2022. Т. 30. 749 с.

References

1. Tang D.D., Le Y.-J. *Magnetic Memory Fundamentals and Technolog* (Cambridge University Press, New York, 2010).
2. Gusieva Y., Graczyk P., Gorobets O., Krawczyk M. Excitation of Bulk Spin Waves by Acoustic Wave at the Plane Defect of a Ferromagnet // *Acta Physica Polonica A.*, 2018, vol. 133, 489 p.
3. Gumerov A.M., Ekomasov E.G., Kudryavtsev R.V. One-dimensional dynamics of magnetic inhomogeneities in a three- and five-layer ferromagnetic structure with different values of the magnetic parameters // *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1389, p. 012004.
4. Shamsutdinov M.A., Nazarov V.N., Lomakina I.U., Kharisov A.T., Shamsutdinov D.M. Ферро- и антиферромагнитодинамика. Nonlinear Oscillations, waves and solitons, 2009, 456 p. (in Russian).
5. Ekomasov E.G., Murtazin R.R., Nazarov V.N. Excitation of magnetic inhomogeneities in three-layer ferromagnetic structure with different parameters of the magnetic anisotropy and exchange // *JMMM*, 2015, vol. 385, 217 p.
6. Gumerov A.M., Ekomasov E.G., Kudryavtsev R.V., Fakhretdinov M.I. Localized Magnetic Inhomogeneities Generation on Defects, as a New Channel of Damping for a Moving Domain Wall // *Letters on Materials*, 2018, vol. 8, 299 p. (in Russian).

7. Kiselev V.V., Rascovarov A.A. Forced motion of breathers and domain boundaries against the background of nonlinear magnetization wave // *Chaos, Solitons & Fractals*, 2012, vol. 45, 1551 p.

8. Tetienne J.P., Hingant T., Kim J.V., Diez L.H., Adam J.P., Garcia K., Roch J.F., Rohart S., Thiaville A., Ravelosona D., Jacques V. Nanoscale imaging and control of domain-wall hopping with a nitrogen-vacancy center microscope // *Science*. 2014, vol. 344, 1366 p.

9. Gerasimov M.V., Logunov M.V., Spirin A.V., Nozdrin Yu.N., Tokman I.D. Time evolution of domain-wall motion induced by nanosecond laser pulses // *Phys. Rev. B.*, 2016, vol. 94, 014434 p.

10. Ekomasov E.G., Gumerov A.M., Kudryavtsev R.V., Dmitriev S.V., Nazarov V.N. Multisoliton dynamics in the sine-gordon model with two point impurities // *Brazilian Journal of Physics.*, 2018, vol. 48, pp. 576-584.

11. Ekomasov E.G., Samsonov K.Yu., Gumerov A.M., Kudryavtsev R.V. Nonlinear waves of the sine-Gordon equation in the model with three attracting impurities // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 30, 749 p. (in Russian).

ONE-DIMENSIONAL DYNAMICS OF THE DOMAIN BOUNDARY IN A SEVEN-LAYER FERROMAGNETIC STRUCTURE

© V.N. Nazarov¹, K.Yu. Samsonov², E.G. Ekomasov³

¹ Institute of Molecule and Crystal Physics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre
of the Russian Academy of Sciences,
71, prospect Oktyabrya, 450054, Ufa, Russian Federation

² University of Tyumen,
6, ulitsa Volodarskogo, 625003, Tyumen, Russian Federation

³ Ufa University of Science and Technology,
32, ulitsa Zaki Walidi, 450076, Ufa, Russian Federation

The dynamics of the domain boundary is considered using the example of a seven-layer ferromagnetic structure with three thin and four wide magnetic layers. The structure of the domain boundary is represented as a kink solution of the sine-Gordon equation. The equation of motion for magnetization was solved numerically using an explicit scheme. The discretization of the equation was carried out according to a standard five-point scheme of the "cross" type. The paper shows the features of the dynamics of the domain boundary in a multilayer magnetic system in the presence of thin magnetic layers with an increased value of the magnetic anisotropy constant. Thin layers with an increased value of the magnetic anisotropy constant compared to the homogeneous state represent potential barriers to the moving domain boundary. Thin layers with an increased magnitude of magnetic anisotropy compared to a homogeneous state represent potential barriers to a moving domain boundary. A diagram of possible scenarios of the dynamics of the domain boundary is constructed depending on the initial velocity of its movement and the distance between three thin magnetic layers. The maximum value of the kink velocity for reflection from all potential barriers, depending on their size, is obtained. With an increase in the height and width of the barrier, the value of such a threshold maximum reflection velocity of the domain boundary increases non-linearly. With a sufficiently high barrier height, there is already an almost linear dependence on the width of this threshold velocity. With a slight increase in the speed of movement of the domain boundary, the kink can pass through the first barrier, but it is reflected from the second barrier. There is also a case of kink oscillation between the second and third potential barriers. Such fluctuations are clearly inharmonious. The dependence of the threshold velocity on the distance between the barriers is obtained. As the distance between the barriers increases, the threshold speed value tends to a value equal to the threshold speed for one barrier. In the work, the minimum value of the speed of the domain boundary of the passage of all layers, depending on the parameters of potential barriers, is obtained. It is also found that there is a critical distance separating the dynamics of the domain boundary into two regions with qualitatively different behavior of the system.

Keywords: domain wall, localized magnetization wave, multilayer ferromagnet, resonant dynamics.