

# 01 Возможность управления динамикой и структурой магнитного солитона в трехслойной ферромагнитной структуре

© Е.Г. Екомасов<sup>1,2</sup>, В.Н. Назаров<sup>3,4</sup>, К.Ю. Самсонов<sup>1</sup>, Р.Р. Муртазин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

<sup>2</sup> Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

<sup>3</sup> Институт физики молекул и кристаллов — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия

<sup>4</sup> Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия

E-mail: EkomasovEG@gmail.com

Поступило в Редакцию 25 января 2021 г.

В окончательной редакции 15 февраля 2021 г.

Принято к публикации 17 февраля 2021 г.

Рассмотрены генерация и возбуждение магнитного солитона в трехслойном ферромагнетике постоянными магнитными полями и полями переменной частоты и малой амплитуды при наличии диссипации в системе. Анализ решений уравнения движения в переменном поле показывает возможность увеличения со временем при определенных условиях амплитуды магнитного солитона. На резонансный эффект влияют также геометрические параметры тонкого слоя: при большой ширине слоя возбуждается еще и трансляционная мода колебаний солитона.

**Ключевые слова:** трехслойный ферромагнетик, магнитный солитон, локализованные магнитные неоднородности, авторезонанс.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.10.50966.18718

В последнее время появилось много работ по использованию магнитных неоднородностей типа магнитных вихрей и скирмионов в спинтронных устройствах [1,2]. Конкуренцию им могут создать магнитные неоднородности солитонного типа, имеющие много схожих динамических свойств [3]. Появление новых экспериментальных методик, позволяющих изучать процессы формирования и распространения локализованных волн намагниченности нанометровых размеров и взаимодействия их с доменными границами (ДГ) [4–6], также стимулировало возросший прикладной интерес к данной теме [7]. Ключевым вопросом для создания новых устройств является нахождение условий для генерации устойчивых локализованных волн намагниченности типа магнитных солитонов и бризеров. Известно, что в области магнитного „дефекта“, являющегося 1D-, 2D- или 3D-потенциальной ямой для магнитной неоднородности (см., например, [8–11]), это вполне возможно. В одномерном случае одним из возможных путей при создании таких магнитных „дефектов“ является создание многослойных магнитных структур, представляющих собой периодически чередующиеся слои двух материалов с различными физическими свойствами, например магнитной анизотропией [12]. Одним из возможных способов управления динамикой намагниченности являются приложение внешнего магнитного поля [13] и учет затухания в системе. В настоящей работе рассматривается возможность управления параметрами магнитного солитона в трехслойном ферромагнетике при помощи постоянных магнитных полей и полей переменной частоты

и малой амплитуды с использованием авторезонансной модели управления при наличии диссипации в системе.

Рассмотрим трехслойную ферромагнитную структуру, состоящую из двух широких одинаковых слоев, разделенных тонким слоем с измененными значениями параметра магнитной анизотропии [14]. Параметры анизотропии будем считать функциями координаты  $x$ , направленной перпендикулярно границе раздела слоев. Обычно при решении динамических задач удобно перейти к сферическим координатам  $\theta$  и  $\varphi$  вектора намагниченности  $\mathbf{M}$ , где  $0 \leq \theta \leq 2\pi$  — угол в плоскости  $yz$  между направлением вектора  $\mathbf{M}$  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 можно представить в виде

$$\Delta\theta - \ddot{\theta} - \frac{1}{2}f(\mathbf{r}) \sin 2\theta = h \sin \theta + \alpha\dot{\theta}, \quad (1)$$

где  $f(\mathbf{r}) = K_1(x)/K_1^0$  — функция, определяющая пространственную модуляцию константы анизотропии,  $K_1^0$  — константа анизотропии в толстых слоях,  $h = (H_z/4\pi M_S)Q^{-1}$  и  $\alpha = \alpha_0/\sqrt{Q}$  — нормированные внешнее магнитное поле и константа затухания,  $Q = K_1^0/(2\pi M_S^2)$  — фактор качества материала,  $\alpha_0$  — константа затухания, время  $t$  нормировано на  $4\pi M_S \gamma \sqrt{Q}$ , координата  $x$  нормирована на ширину статической блоховской ДГ. Функцию  $f(x)$  в одномерном случае для простоты будем моделировать в форме

прямоугольника:

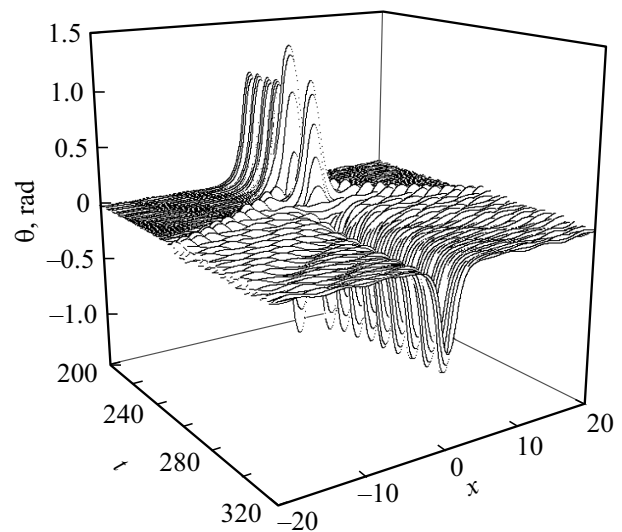
$$f(x) = \begin{cases} 1, & |x| > W_x/2, \\ K, & |x| < W_x/2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $W$  — параметр, характеризующий ширину тонкого слоя,  $K$  — величина, нормированная на константы магнитной анизотропии в области тонкого слоя. Следует заметить, что другие виды функции (2), например гауссова типа, ведут к изменению набора параметров, приводящих к образованию магнитного солитона и его собственной частоты колебаний [9].

Уравнение (1) решалось численно с использованием явной схемы интегрирования [14]. Для этого выбиралась трехслойная схема решения с аппроксимацией производных на пятиточечном шаблоне типа „крест“ [11]. Схема численного эксперимента выглядит следующим образом. Распределение намагниченности в начальный момент времени задавалось в виде блоховской ДГ  $\theta_0(x) = 2 \operatorname{arctg}(e^x)$ , находящейся далеко от тонкого слоя. Известно, что при определенных значениях параметров тонкого слоя при прохождении ДГ с постоянной скоростью через него образуется магнитная неоднородность в виде магнитного бризера или солитона. Случай магнитного бризера в переменном внешнем магнитном поле был нами рассмотрен ранее в [14]. Рассмотрим теперь магнитные неоднородности солитонного типа. Скорость движения блоховской ДГ возьмем на большом расстоянии от тонкого слоя равной 0.85 в безразмерных единицах, константу затухания — равной 0.001. Начиная с определенных величин параметров  $W = 1.9$ ,  $K = -1.4$  в области тонкого слоя наблюдаем образование магнитной неоднородности солитонного типа. При  $W \geq 2$ ,  $K < -1.8$  наблюдаем образование магнитного антисолитона с противоположным по отношению к солитону направлением намагниченности в его центре.

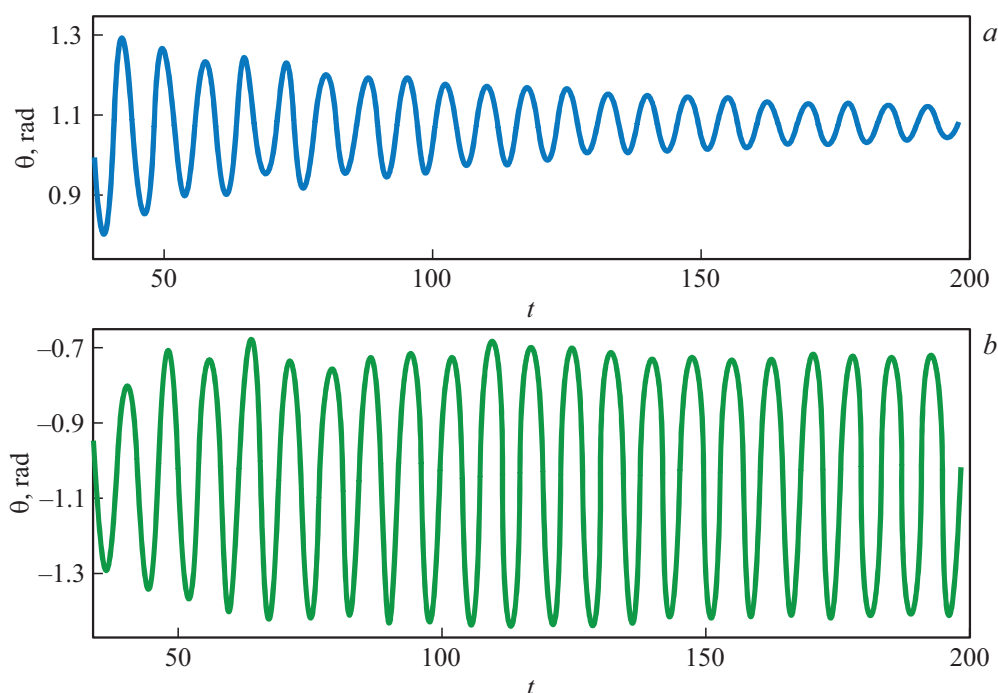
Если приложить постоянное внешнее магнитное поле против направления намагниченности в центре магнитного солитона (МС), то, очевидно, как и для случая магнитных вихрей в спин-вентильных структурах [11], можно ожидать переключения направления намагниченности в центре МС при некоторой критической величине магнитного поля. При  $h = 0.6$ ,  $W = 2$ ,  $K = -2$  наблюдалось подобное переключение и превращение магнитного солитона в антисолитон (рис. 1). Следует отметить, что при этом, как и для случая магнитных вихрей в спин-вентильных структурах [11], необходимо прикладывать достаточно большую величину постоянно поля.

Рассмотрим далее случай применения переменного внешнего магнитного поля и используем явление авторезонанса для управления динамическими характеристиками магнитного солитона. Известно, что применение авторезонансных моделей управления позволяет существенно уменьшить величину внешнего воздей-

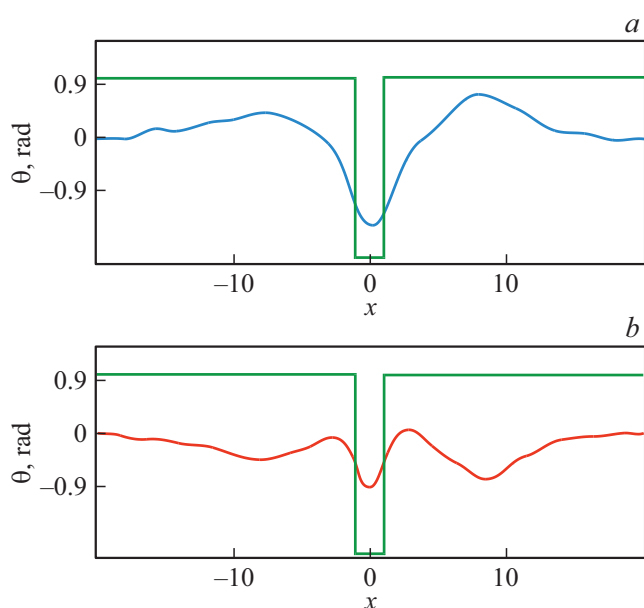


**Рис. 1.** Перемагничивание магнитной неоднородности типа солитон: до момента времени  $t = 220$  при  $h = 0.32$  существовал покоящийся солитон, после  $t = 220$  при включении поля величиной  $h = 0.6$  произошло переключение.  $W = 2$ ,  $K = -2$ , координаты центра области дефекта  $x = 0$ .

ствия на систему [15–17]. Поле имеет вид, где частота  $\omega = \omega_0 + \mu t$  ( $\omega_0$  — собственная частота солитона,  $\mu$  — малый параметр). Рассмотрим случай  $K = -1.4$  и  $W = 2$ , когда в отсутствие поля после прохождения ДГ через тонкий слой в нем генерируется МС, амплитуда которого испытывает колебания (рис. 2, а). При  $h_0 = 0.1$ ,  $\mu = 0.01$  и  $\omega_0 = 0.83$  при прохождении ДГ через тонкий слой будем наблюдать генерацию уже магнитного антисолитона. Если в отсутствие магнитного поля амплитуда солитона затухает со временем, то в переменном поле определенной частоты (связанной с собственной частотой колебаний магнитного солитона) амплитуда магнитного антисолитона возрастает в 2 раза (рис. 2), но дальнейший рост амплитуды ограничивается за счет излучения спиновых волн. При увеличении параметра  $K$  в переменном магнитном поле будет наблюдаться аналогичная ситуация: амплитуда колебаний магнитного антисолитона возрастает в 2 раза, но только с другой измененной частотой, так как частота антисолитона зависит от параметров тонкого слоя. Такое ограничение на увеличение амплитуды колебаний вызвано тем, что центр антисолитона уже не остается в центре тонкого слоя, а возбуждается еще и трансляционная мода его колебаний вдоль координаты  $x$ , сопровождающаяся излучением объемных спиновых волн. Наиболее отчетливо эти волны проявляются в отсутствие затухания (рис. 3). Случай достаточно малой ширины тонкого слоя приводит к исчезновению трансляционной моды колебаний магнитного солитона. Здесь можно добиться большего увеличения амплитуды солитона (практически на порядок) в переменном магнитном поле по сравнению со случаем без поля.



**Рис. 2.** Зависимость амплитуды солитона от времени без поля (а) и в переменном поле (b),  $h_0 = 0.1$ , параметр  $\mu = 0.01$ , начальная частота поля 0.83, параметры ямы  $W = 2$ ,  $K = -1.4$ .



**Рис. 3.** Колебания антисолитона с излучением спиновых волн в отсутствие затухания в различные моменты времени.  $t = 153$  (а) и  $156$  (b).  $W = 2$ ,  $K = -2$ ,  $h_0 = 0.1$ ,  $\mu = 0.01$ , начальная частота поля 1.0.

Из проведенного исследования следует, что авторезонансная модель управления магнитным солитоном в трехслойном ферромагнетике позволяет пользоваться малыми по амплитуде переменными полями, что может найти применение в магнитных устройствах памяти.

### Финансирование работы

Исследования Е.Г. Екомасова и К.Ю. Самсонова выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-31-90048, В.Н. Назарова — в рамках государственного задания #AAAA-A19-119022290052-9.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] C. Li, S. Wang, N. Xu, X. Yang, B. Liu, B. Yang, L. Fang, *J. Magn. Magn. Mater.*, **498**, 166155 (2019). DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166155
- [2] L. Shen, J. Xia, G. Zhao, X. Zhang, M. Ezawa, O.A. Tretiakov, X. Liu, Y. Zhou, *Appl. Phys. Lett.*, **114**, 042402 (2019). DOI: 10.1063/1.5080302
- [3] М.А. Шамсутдинов, И.Ю. Ломакина, В.Н. Назаров, А.Т. Харисов, Д.М. Шамсутдинов, *Ферро- и антиферромагнетодинамика. Нелинейные колебания, волны и солитоны* (Наука, М., 2009).
- [4] R. Kukreja, S. Bonetti, Z. Chen, D. Backes, Y. Acremann, J.A. Katine, A.D. Kent, H.A. Dürr, H. Ohldag, J. Stöhr, *Phys. Rev. Lett.*, **115**, 096601 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.096601
- [5] M.V. Gerasimov, M.V. Logunov, A.V. Spirin, Yu.N. Nozdrin, I.D. Tokman, *Phys. Rev. B*, **94**, 014434 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.94.014434

- [6] D. Backes, F. Macià, S. Bonetti, R. Kukreja, H. Ohldag, A.D. Kent, *Phys. Rev. Lett.*, **115**, 127205 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.127205
- [7] P.J. Metaxas, M. Albert, S. Lequeux, V. Cros, J. Grollier, P. Bortolotti, A. Anane, H. Fangohr, *Phys. Rev. B*, **93**, 054414 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.93.054414
- [8] E.G. Ekomasov, A.M. Gumerov, R.R. Murtazin, R.V. Kudryavtsev, A.E. Ekomasov, N.N. Abakumova, *Solid State Phenom.*, **233-234**, 51 (2015). DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.233-234.51
- [9] E.G. Ekomasov, R.R. Murtazin, V.N. Nazarov, *J. Magn. Magn. Mater.*, **385**, 217 (2015). DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.03.019
- [10] А.М. Гумеров, Е.Г. Екомасов, Р.В. Кудрявцев, М.И. Фахретдинов, *Письма о материалах*, **8** (3), 299 (2018). DOI: 10.22226/2410-3535-2018-3-299-304
- [11] E.G. Ekomasov, R.R. Murtazin, O.B. Bogomazova, A.M. Gumerov, *J. Magn. Magn. Mater.*, **339**, 133 (2013). DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.02.042
- [12] D.D. Tang, Y.-J. Lee, *Magnetic memory: fundamentals and technology* (Cambridge University Press, N.Y., 2010). DOI: 10.1017/CBO9780511676208
- [13] V.N. Nazarov, L.A. Kalyakin, M.A. Shamsutdinov, *Solid State Phenom.*, **81**, 168 (2011). DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.168-169.81
- [14] Е.Г. Екомасов, В.Н. Назаров, А.М. Гумеров, К.Ю. Самсонов, Р.Р. Муртазин, *Письма о материалах*, **10** (2), 141 (2020). DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-141-146
- [15] Л.А. Калякин, М.А. Шамсутдинов, *ТМФ*, **160** (1), 102 (2009). [Пер. версия: 10.1007/s11232-009-0086-3].
- [16] С.В. Баталов, А.Г. Шагалов, *ФММ*, **109** (1), 3 (2010). [Пер. версия: 10.1134/S0031918X10010011].
- [17] С.В. Баталов, А.Г. Шагалов, *ФММ*, **114** (2), 115 (2013). [Пер. версия: 10.1134/S0031918X13020038].