

# ГИСТЕРЕЗИС НАМАГНИЧЕННОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В МАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ СО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДЗЯЛОШИНСКОГО–МОРИЯ

З. В. Гареева <sup>a,b\*</sup>, Н. В. Шульга <sup>a\*\*</sup>, И. Ф. Шарафуллин <sup>b</sup>, Р. А. Дорошенко <sup>a</sup>,  
А. К. Звездин <sup>c,d</sup>

<sup>a</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики молекул и кристаллов  
Уфимского научного центра Российской академии наук  
450075, Уфа, Россия

<sup>b</sup> Башкирский государственный университет  
450076, Уфа, Россия

<sup>c</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук  
119991, Москва, Россия

<sup>d</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук  
119991, Москва, Россия

Поступила в редакцию 21 июля 2022 г.,  
после переработки 15 августа 2022 г.  
Принята к публикации 16 августа 2022 г.

Проведено исследование влияния взаимодействия Дзялошинского–Мория на формирование полярных структур в наноразмерных магнитоэлектрических пленках. Исследована последовательность микромагнитных структур различной топологии при намагничивании и размагничивании пленки ограниченного размера в магнитном поле, ориентированном вдоль нормали к поверхности пленки. Показано, что с магнитными структурами связано образование полярных структур и исследованы особенности полярных состояний в зависимости от взаимодействия Дзялошинского–Мория и симметрии интерфейса.

*Статья представлена в рамках публикации материалов VIII Евроазиатского симпозиума  
«Тенденции в магнетизме» (EASTMAG-2022), Казань, август 2022 г.*

DOI: 10.31857/S004445102301008X  
EDN: NNOFSJ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы внимание исследователей привлекают топологические состояния, реализующиеся в наноструктурированных пленках, в связи с возможностями их применения в устройствах вычислительной техники и информационных технологий [1]. Необходимо отметить, что в равной мере исследуются как магнитные структуры, так и полярные состояния, представляющие собой сегнетоэлектрические структуры разной топологии, формиру-

ющиеся в магнитных системах ограниченной геометрии при наличии магнитоэлектрического взаимодействия [2].

Сочетание магнитоэлектрических и спин-орбитальных эффектов и обусловленных ими различных типов упорядочений открывают новые функциональные качества магнетиков и новые области их технологических приложений. Так, совместное использование магнитоэлектрических и спин-орбитальных эффектов в одном логическом устройстве MESO [1], предложенное компанией Intel, имеет значительные преимущества по энергоэффективности, быстродействию и объему выполняемых операций.

С фундаментальной точки зрения интерес к таким системам обусловлен преимущественно двумя

\* E-mail: zukhragzv@yandex.ru

\*\* E-mail: shulga@anrb.ru

асpekтами: 1) возможностью реализации новых топологических состояний – магнитных вихрей, антивихрей, скирмионов, меронов, скирмиониумов и других сопутствующих им структур и 2) спецификой магнитоэлектрических эффектов, формированием новых топологических полярных (сегнетоэлектрических) структур.

Развитие технологий позволяет создавать различные дизайны наноструктурированных пленок на основе магнитных и мультиферроидных материалов. Наличие новых топологических структур как магнитного, так и полярного типов сказывается как на гистерезисных зависимостях намагниченности и поляризации, так и на величине магнитоэлектрического эффекта, как, например, показано в работе [3].

В связи с этим возникает необходимость поиска оптимальных условий для реализации магнитоэлектрических эффектов и интегрирования качеств мультиферроиков с топологическими свойствами материалов.

Эффективные механизмы создания топологических микромагнитных структур могут быть реализованы за счет взаимодействия Дзялошинского–Мория (ВДМ) [4]. Известно, что ВДМ реализуется в системах, в группе симметрии которых отсутствует операция пространственной инверсии, также ВДМ может быть реализовано в ультратонких пленках с благородными металлами (Co/Pt, Pt/Co/Ir, ...) в области интерфейса [5–15].

В общем случае энергия ВДМ [16] имеет вид

$$F_{DM} = D_{ij}^{(k)} L_{ij}^{(k)}, \quad (1)$$

где  $D_{ij}^{(k)}$  – тензор,

$$L_{ij}^{(k)} = m_i \frac{\partial m_j}{\partial x_k} - m_j \frac{\partial m_i}{\partial x_k} \quad (2)$$

– инвариант Лифшица,  $m_i = M_i/M_s$  – компоненты магнитного или антиферромагнитного вектора,  $x_k$  – координаты ( $i, j, k = 1, 2, 3$ ). Вид тензоров  $D_{ij}^{(k)}$ ,  $L_{ij}^{(k)}$  определяется симметрией кристалла, соответственно, в зависимости от симметрии системы реализуется конкретный вид ВДМ и разновидности киральных магнитных структур, стабилизируемых этим взаимодействием.

Магнитоэлектрический эффект в несобственных мультиферроиках является одним из необычных проявлений магнитной киральности [17, 18]. В таких системах неоднородное распределение намагниченности приводит к возникновению сегнетоэлектрических свойств. В зависимости от симметрии кристалла и вида ВДМ магнитные и сегнетоэлектрические свойства будут проявляться по-разному, что

подтверждают экспериментальные исследования в этой области [2, 17].

В данной работе мы рассмотрим особенности магнитоэлектрического эффекта в наноструктурированных пленках при наличии ВДМ двух типов, которые реализуются в системах с пространственными группами симметрии  $C_{nv}$ ,  $O$  и  $T$ . Мы исследуем возможные полярные структуры, возникающие в окрестности микромагнитных структур при намагничивании и перемагничивании пленок, рассмотрим зависимости результирующей поляризации от приложенного магнитного поля и определим оптимальные условия для переключения полярных состояний.

## 2. МОДЕЛЬ

Рассмотрим тонкую магнитную пленку ограниченного размера, будем считать, что в ней реализуется неоднородный магнитоэлектрический эффект, а за счет спин-орбитальной связи с ориентирующей подложкой в системе возникает взаимодействие Дзялошинского–Мория (рис. 1).

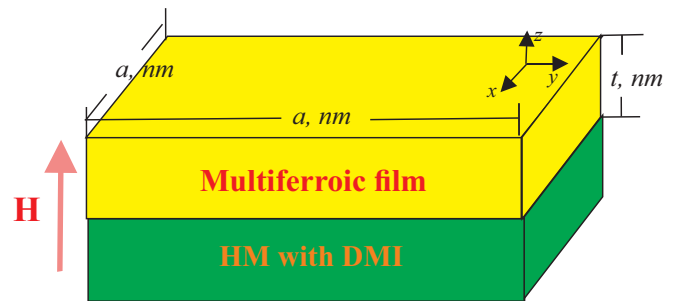


Рис. 1. Схематическое изображение пленки размеров  $a \times a \times t$  на подложке с ВДМ

Энергия такой системы имеет вид

$$F = \iint \left[ A(\partial_\mu m_\alpha)^2 + F_{me} + F_{DM} - Km_z^2 - \frac{1}{2} M_s \mathbf{m} \cdot \mathbf{H}_m - M_s \mathbf{m} \cdot \mathbf{H} - \frac{\mathbf{P}^2}{2\chi_e} \right] d^2r, \quad (3)$$

где  $A$  – константа обменного взаимодействия,  $K$  – константа магнитной анизотропии,  $m_\alpha$  – компоненты единичного вектора намагниченности  $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_s$ ,  $\alpha, \mu = x, y, z$ ;  $\mathbf{H}_m$  – поле магнитостатики,  $\mathbf{H}$  – внешнее магнитное поле, мы будем рассматривать ситуацию, когда поле  $\mathbf{H}$  ориентировано по нормали к поверхности пленки;

$$F_{me} = \gamma \mathbf{P} [\mathbf{M}(\nabla \mathbf{M}) - (\mathbf{M} \nabla) \mathbf{M}] \quad (4)$$

– магнитоэлектрическая энергия,  $\gamma$  – параметр неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия,  $F_{DM}$  – энергия Дзялошинского–Мория.

В этом случае электрическая поляризация системы определяется соотношением

$$\mathbf{P} = \gamma\chi_e[\mathbf{M}(\nabla\mathbf{M}) - (\mathbf{M}\nabla)\mathbf{M}]. \quad (5)$$

В настоящее время активно развиваются экспериментальные методики по реализации ВДМ, в том числе в области интерфейсов, в магнетиках вида MnSi, гетероструктурах Fe/W, Co/Pt, Ru/Co/Ru наноструктурах на основе ABO<sub>3</sub>-перовскитов вида SrTiO<sub>3</sub>-SrRuO<sub>3</sub> и др. [8–14].

Вид энергии Дзялошинского–Мория зависит от симметрии системы.

В данной работе мы рассмотрим два типичных вида систем с ВДМ, а именно, системы, симметрия которых описывается пространственной группой  $C_{nv}$ , в основном это ультратонкие магнитные пленки, выращенные на подложках с тяжелыми металлами вида Co/Pt, Co/Pd, Ru/Co/Ru и др., и системы, симметрия которых описывается пространственной группой симметрии  $T$  или  $O$ , к ним принадлежат кристаллы B20, в том числе MnSi, FeGe, пленки SrTiO<sub>3</sub>-SrRuO<sub>3</sub>.

Для систем симметрии  $C_{nv}$  энергия ВДМ имеет вид

$$F_{DM} = t \iint D[(m_x \frac{\partial m_z}{\partial x} - m_z \frac{\partial m_x}{\partial x}) + (m_y \frac{\partial m_z}{\partial y} - m_z \frac{\partial m_y}{\partial y})] d^2r. \quad (6)$$

Для кристаллов B20 классов симметрии  $T$  ( $P23, F23, I23, P2_13, I2_13$ ) и  $O$  ( $P432, F432, F4_132, I432, P4_232, P4_132, P4_332, I4_132$ ) энергия ВДМ имеет вид

$$F_{DM} = t \iint D\mathbf{m} \cdot [\nabla \times \mathbf{m}] d^2r, \quad (7)$$

где  $t$  — толщина нанозлемента.

Рассмотрим магнитную пленку размера  $100 \times 100 \times 30 \text{ нм}^3$  с параметрами материала:  $A = 2.9 \cdot 10^{-12} \text{ Дж/м}$ ,  $K = 1 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$ ,  $M_s = 36.53 \text{ кА/м}^3$ , будем считать, что магнитное поле, которое также может быть индуцировано электрическим током, ориентировано по направлению нормали к поверхности пленки  $\mathbf{H} = (0, 0, H)$ , величина константы Дзялошинского–Мория изменяется в диапазоне  $-0.5 \text{ мДж/м}^2 < D < 0.5 \text{ мДж/м}^2$ .

ВДМ может приводить к стабилизации неоднородных магнитных структур разной топологии. Вид магнитной структуры зависит от симметрии системы, сочетания геометрических факторов (размеров нанозлемента), внутренних параметров системы

( $A, K, M_s, D$ ) и внешних воздействий. При изменении параметров имеют место переходы между магнитными состояниями. В соответствии с концепцией неоднородного МЭЭ в окрестности неоднородного распределения намагниченности реализуется электрическая поляризация.

Рассчитаем возможные типы микромагнитных конфигураций, возникающих в пленках с различным ВДМ, с использованием пакета OOMMF [19], размер сетки  $5 \times 5 \times 3 \text{ нм}^3$  и исследуем особенности магнитоэлектрического эффекта в данных системах.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В данном разделе приведены результаты исследования влияния ВДМ на процессы намагничивания и поляризации пленок при циклическом изменении внешнего магнитного поля. Представлены результаты расчета систем, в которых симметрия контактного слоя описывается пространственной группой  $T$ , а энергия ВДМ — соотношением (7), проводится сопоставление полученных результатов для систем симметрии  $C_{nv}$  и ВДМ вида (6).

На рис. 2а показаны примеры четырех топологических микромагнитных структур, которые реализуются в нанозлементах с размерами  $a = 100 \text{ нм}$ ,  $t = 30 \text{ нм}$  при  $D = 0.6 \text{ мДж/м}^2$  в процессе его перемагничивания. Отметим, что исходным состоянием является однородное состояние ( $EA+$ ), в котором вектор намагниченности  $\mathbf{M} = (0, 0, M_s)$  однородно распределен по объему нанозлемента. В процессе размагничивания происходит серия фазовых переходов: 1) из однородного состояния  $EA+$  в скирмион положительной полярности  $Sk+$ , в центре вихря  $\mathbf{M} = (0, 0, M_s)$ , 2) из  $Sk+$  в однородное состояние  $EA-$ ,  $\mathbf{M} = (0, 0, M_s)$ , 3) из  $EA-$  в скирмион с отрицательной полярностью  $Sk-$ , 4) в однородное состояние  $EA+$ . Аналогичная ситуация наблюдается при перемагничивании нанозлемента. С образованием неоднородных магнитных состояний связано возникновение полярных сегнетоэлектрических структур, в которых вектор электрической поляризации также распределен по поверхности нанозлемента. На рис. 2б показано распределение  $P_z$ -компонент нормированной сегнетоэлектрической поляризации  $\mathbf{p} = \mathbf{P}/\gamma\chi_e$ , соответствующих состояниям  $Sk$  и  $EA$ . График зависимости полной поляризации от величины нормированного магнитного поля ( $h = H/M_s$ ) показан на рис. 3.

Похожая картина реализуется в системах симметрии  $C_{nv}$ , однако в отличие от скирмионных со-

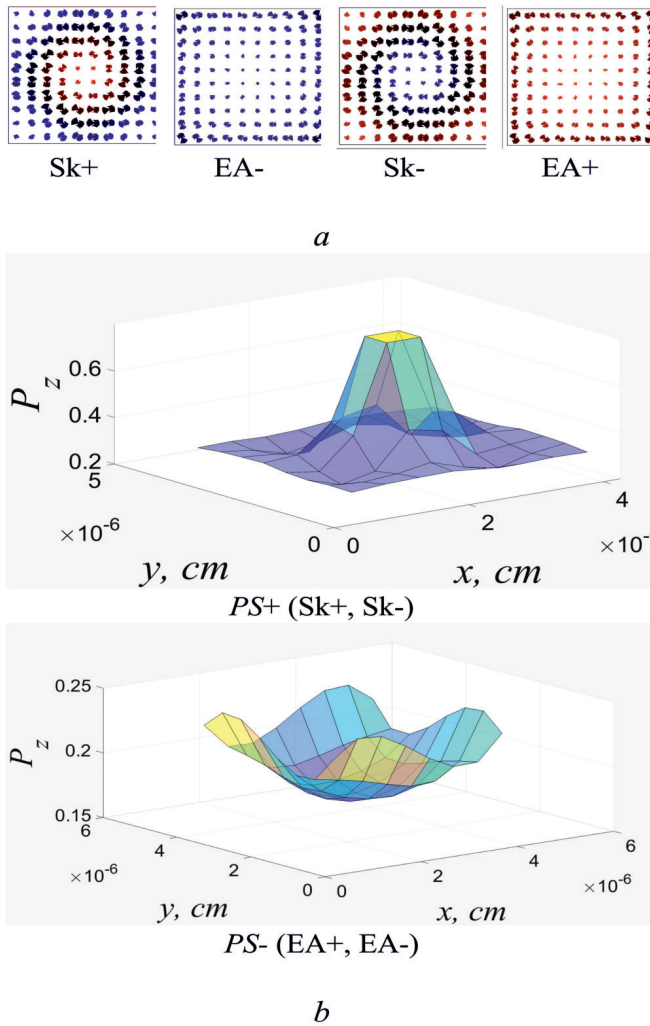


Рис. 2. а) микромагнитные состояния ( $Sk+$ ,  $EA-$ ,  $Sk-$ ,  $EA+$ ), реализуемые в нанозементе при изменении магнитного поля  $h = H/M_s$ ; б) полярные состояния  $PS+$ , соответствующие магнитным конфигурациям  $Sk+$ ,  $Sk-$ , полярные состояния  $PS-$ , соответствующие магнитным конфигурациям  $EA-$ ,  $EA+$ ;  $D = 0.6$  мДж/м<sup>2</sup>,  $a = 50$  нм,  $t = 30$  нм

стояний  $Sk+/Sk-$  и соответствующих им однополярных состояний  $PS+$  при ВДМ вида (6) промежуточными состояниями будут 180-градусные доменные границы  $DW+/DW-$ , соответствующие им полярные состояния будут иными — биполярными [20].

Отметим, что ВДМ может приводить к стабилизации неоднородных магнитных структур разной топологии. Вид магнитной структуры и связанной с ней сегнетоэлектрической структуры, реализующейся при наличии магнитоэлектрического взаимо-

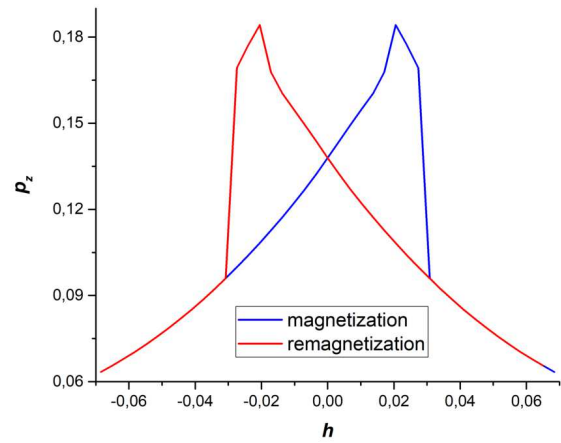


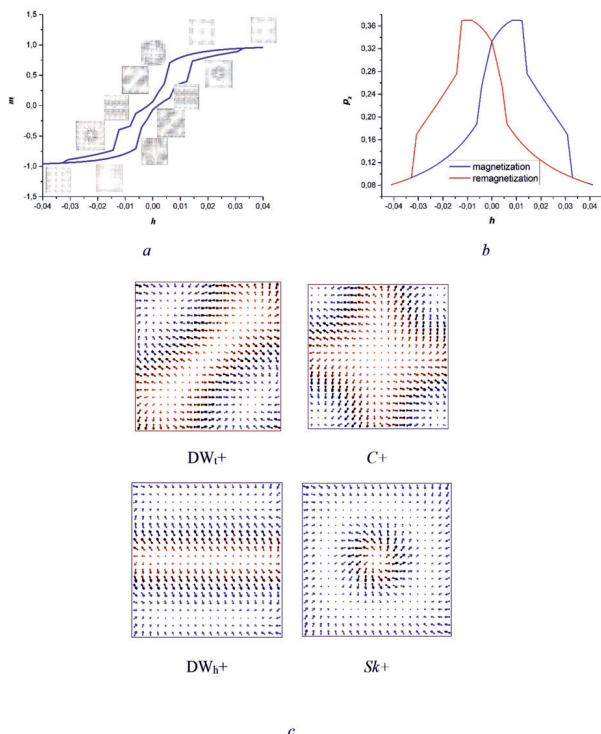
Рис. 3. График зависимости электрической поляризации  $p_z = P_z/\gamma\chi_e$  от магнитного поля  $h = H/M_s$ ,  $D = 0.6$  мДж/м<sup>2</sup>,  $a = 50$  нм,  $t = 30$  нм

действия в системе, зависит от сочетания геометрических факторов (размеров наноземента), внутренних параметров системы ( $A, K, M_s, D$ ) и внешних воздействий.

Известно, что в монодоменной наночастице (нанозементе) в отсутствие ВДМ при наличии магнитной анизотропии вида РМА (perpendicular magnetic anisotropy) изменение размерных факторов (aspect ratio  $a/t$ ) приводит к фазовым переходам из однодоменного состояния типа  $EA$  в вихревое состояние и впоследствии в состояние  $EP$  («легкая плоскость») [21]. ВДМ также может индуцировать переходы такого рода, причем тип киральных структур (магнитных вихрей или доменных границ) и связанных с ними полярных состояний зависит от симметрии системы и соответствующего вида ВДМ (соответствующий пример показан на рис. 2).

Процессы циклического намагничивания сопровождаются процессами образования доменных структур, на которые также оказывает влияние ВДМ. На рис. 4 показаны гистерезисные зависимости намагненности и поляризации, которые реализуются в образцах с размерами  $a = 100$  нм,  $t = 30$  нм при  $D = 0.4$  мДж/м<sup>2</sup>. На кривой магнитного гистерезиса (рис. 4а) на соответствующих участках показаны реализующиеся в этом случае магнитные топологические структуры — однородное состояние, скирмион, горизонтальная доменная граница (ДГ), наклонная ДГ, крестообразная ДГ, различающихся полярностью ( $EA\pm, Sk\pm, DW_h\pm, DW_t\pm, C\pm$ ); на рис. 4б

приведена гистерезисная зависимость полной поляризации от магнитного поля; на рис. 4с показаны киральные структуры положительной полярности; на рис. 5 приведены полярные структуры, соответствующие магнитным киральным структурам обеих полярностей, в проекции на плоскость поверхности пленки.

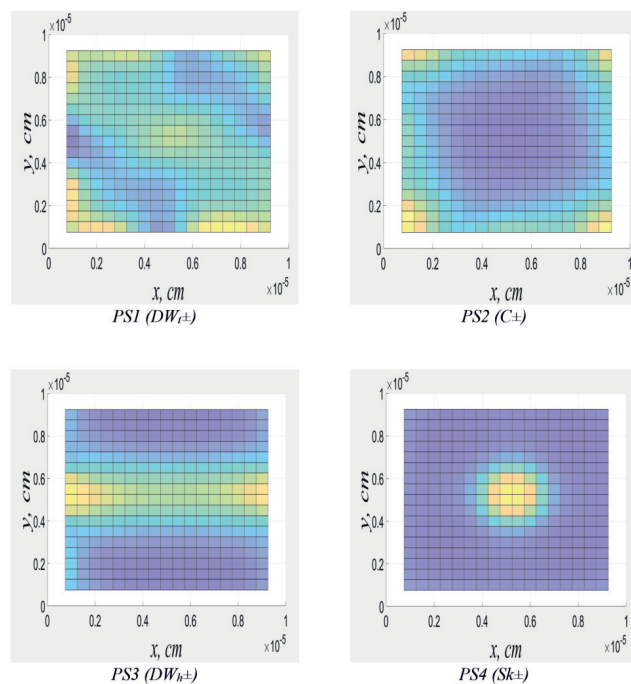


**Рис. 4.** а) Микромагнитные состояния ( $Sk+$ ,  $EA-$ ,  $Sk-$ ,  $EA+$ ), реализуемые в наноземеле при изменении магнитного поля; б) полярные состояния  $PS+$ , соответствующие магнитным конфигурациям  $Sk+$ ,  $Sk-$ , полярные состояния  $PS-$ , соответствующие магнитным конфигурациям  $EA-$ ,  $EA+$ ;  $D = 0.4 \text{ мДж/м}^2$ ,  $a = 100 \text{ нм}$ ,  $t = 30 \text{ нм}$

Сравнивая с результатами, полученными для систем симметрии  $C_{nv}$  и ВДМ вида (6) [20], отметим, что в системах с  $T$ -симметрией реализуется микромагнитное состояние  $DW_t\pm$  и связанное с ним полярное состояние  $PS1$ , которые отсутствуют в случае  $C_{nv}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование магнитоэлектрических эффектов, проявляющихся в процессе намагничивания и перемагничивания наноструктурированных магнитных пленок со взаимодействием Дзялошинского–Мория. Рассчитаны гистерезис-



**Рис. 5.** График зависимости электрической поляризации  $p_z = P_z/\gamma\chi_e$  от магнитного поля  $h = H/M_s$ ,  $D = 0.4 \text{ мДж/м}^2$ ,  $a = 100 \text{ нм}$ ,  $t = 30 \text{ нм}$

ные зависимости намагниченности и электрической поляризации, возникающей в окрестности магнитных неоднородностей при изменении магнитного поля, ориентированного в направлении нормали к поверхности пленки. На основе проведенных расчетов определены условия, необходимые для реализации магнитных структур различной топологии и соответствующих им полярных структур. Построены проекционные портреты, позволяющие осуществить отображение магнитных топологических структур на сегнетоэлектрические (полярные) структуры. Проанализировано влияние ВДМ на магнитные конфигурации и полярные состояния наноструктур. Показано, что тип сегнетоэлектрических состояний (однополярных, биполярных) определяется магнитной конфигурацией, которая, в свою очередь, зависит от ВДМ и симметрии системы.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №19-52-80024), а также в рамках государственного задания по выполнению научных исследований лабораториями (приказ MN-8/1356 от 20.09.2021).

## ЛИТЕРАТУРА

1. S. Manipatruni, D. N. Nikonov, C. C. Lin, T. A. Gosavi, H. Liu, B. Prasad, Y. L. Huang, E. Bonturim, R. Ramesh and I. A. Young, *Nature* **565**, 7737 (2019).
2. G. Tian, W. Yang, D. Chen, G. Fan, Z. Hou, M. Alexe and X. Gao, *Nat. Sci. Rev.* **6**, 684 (2019).
3. M. Y. Liu, T. L. Sun, X. L. Zhu, X. Q. Liu, H. Tian and X. M. Chen, *J. Amer. Cer. Soc.* **104**, 6393 (2021).
4. A. Fert, N. Reyren and V. Cros, *Nat. Rev. Mater.* **2**, 7 (2017).
5. L. Caretta, E. Rosenberg, F. Buttner, T. Fakhrol, P. Gargiani, M. Valvidares, Z. Chen, P. Reddy, D. A. Muller and C. Ross, *Nat. Commun.* **11**, 1 (2020).
6. S. Rohart and A. Thiaville, *Phys. Rev. B* **88**, 184422 (2013).
7. C. O. Avci, E. Rosenberg, L. Caretta, F. Buttner, M. Mann, C. Marcus, D. Bono, C. A. Ross and G. Beach, *Nat. Nanotech.* **14**, 561 (2019).
8. D. H. Kim, M. Haruta, H. W. Ko, G. Go, H. J. Park, T. Nishimura, D. Y. Kim, T. Okuno and Y. Hirata, *Nat. Mater.* **18**, 685 (2019).
9. M. Heide, G. Bihlmayer, S. Blügel, *Phys. Rev. B* **78**, 140403 (2008).
10. A. Soumyanarayanan, N. Reyren, A. Fert and C. Panagopoulos, *Nature* **539**, 509 (2016).
11. A. Samardak, A. Kolesnikov, M. Steblyi, L. Chebotkevich, A. Sadovnikov, S. Nikitov, A. Talapatra, J. Mohanty and A. Ognev, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 19 (2018).
12. L. Wang, Q. Feng, Y. Kim, et al., *Nat. Mater.* **17**, 1087 (2018).
13. J. Lu, L. Si, Q. Zhang, C. Tian, et al., *Adv. Mater.* **33**, 2102525 (2021).
14. S. Muhlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii and P. Böni, *Science* **323**, 915 (2009).
15. O. Cortes, M. Beg and V. Nehruji, *New J. Phys.* **20**, 113015 (2018).
16. I. Dzyaloshinsky, *N. J. Phys. Chem. Sol.* **4**, 241 (1958).
17. А. К. Звездин, А. П. Пятаков, *УФН* **179**, 897 (2009).
18. M. Mostovoy, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 067601 (2006).
19. M. J. Donahue, US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, (1999).
20. Z. V. Gareeva, N. V. Shulga and R. A. Doroshenko, *Europ. Phys. J. Plus* **137**, 454 (2022).
21. K. L. Meltov and K. Y. Guslienko, *J. Magn. Magn. Mater.* **242**, 1015 (2002).