

УДК 539.216.2:537.622.4

DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-1-23-26

**ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ И НЕОДНОРОДНЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ  
В НАНОРАЗМЕРНОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛЕНКЕ  
С КОМБИНИРОВАННОЙ ОДНООСНОЙ И КУБИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ В СЛОЯХ**

© Н.В. Шульга, Р.А. Дорошенко

Проведено численное исследование перемагничивания двухслойной обменно-связанной ферромагнитной пластины конечных размеров, обладающей комбинированной одноосной анизотропией (типа «легкая ось» для верхнего слоя и «легкая плоскость» для нижнего) и кубической анизотропией с ориентацией [111]. Показано, что при наличии кубической анизотропии основное состояние намагниченности оказывается однородным в плоскости пленки. Однако существует неоднородность на границе раздела слоев пленки. Эта неоднородность может привести к появлению электрической поляризации, обусловленной магнитоэлектрическим эффектом. Вектор электрической поляризации в этом случае лежит в плоскости пленки. Его модуль увеличивается с ростом кубической анизотропии. Кроме того, при увеличении кубической анизотропии обнаруживается гистерезис электрической поляризации.

Ключевые слова: двухслойная ферромагнитная пленка, неоднородный магнитоэлектрический эффект, электрическая поляризация, гистерезис.

Магнитоэлектрический эффект заключается в управлении электрической поляризацией в материале во внешнем магнитном поле или в изменении намагниченности во внешнем электрическом поле. Интерес к этому явлению обусловлен миниатюризацией современных микронных схем. Это приводит к необходимости решения ряда проблем. Так, использование магнитоэлектрического эффекта для манипулирования магнитными свойствами может способствовать значительному снижению рассеяния энергии по сравнению с такой, например, широко используемой технологией, как индуцированное током переключение намагниченности [1]. В настоящее время невозможно производить большие магнитные поля для характерных длин порядка нанометров. Кроме того, заменяя управление магнитным полем электрическим, можно решить проблему паразитарных магнитных полей [2].

Магнитоэлектрический эффект обнаруживается в мультиферроиках, чья кристаллическая структура позволяет сосуществовать магнитному и ферроэлектрическому упорядочиванию. Другой механизм возникновения электрической поляризации – предсказанный Барьяхтаром

и соавторами [3] и затем широко исследовавшийся [4] неоднородный магнитоэлектрический эффект. Магнитоэлектрический эффект может реализовываться в структурах с неоднородным распределением намагниченности: доменных границах, скирмионах, вблизи границы раздела магнитных сред и в магнитных вихрях.

Как показали наши численные исследования [5–7], в двухслойной обменно-связанной пленке феррита-граната, слои которой обладают анизотропией типа «легкая плоскость» и «легкая ось» возникает вихревая магнитная структура, что приводит к появлению перпендикулярной плоскости пластины электрической поляризации, однако компонента поляризации, лежащая в плоскости пластины, оказывается пренебрежимо мала. Пленки ферритов-гранатов помимо одноосной анизотропии обладают также кубической анизотропией. Исследование для конечной по толщине, но бесконечной в поперечных размерах подобной пластины показало, что благодаря наличию неоднородности на границе между слоями, компонента поляризации, лежащая в плоскости пластины, становится значительной [8]. Поэтому в работе была поставлена цель – изучить влияние кубической

ШУЛЬГА Николай Владимирович – к.ф.-м.н., Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН,  
e-mail: shulga@anrb.ru

ДОРОШЕНКО Рюрик Александрович – д.ф.-м.н., Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН,  
e-mail: dar@anrb.ru

анизотропии на изменение электрической поляризации при перемагничивании пленки.

Исследовалась двухслойная пленка, верхний слой которой обладает одноосной анизотропией типа «легкая ось», а нижний – «легкая плоскость». Кроме того, пластина обладают кубической анизотропией типа [111], чья постоянная одинакова для обоих слоев. Пленка конечных размеров, квадратная в поперечном сечении. Ось координат  $z$  совпадает с осью одноосной анизотропии, перпендикулярна плоскости пленки и ориентирована вдоль оси [111]. Внешнее магнитное поле направлено параллельно оси  $z$ .

Функционал энергии системы имеет вид:

$$W = \sum_{i=1}^2 \int_{V_i} dV \{ E_{cub,i} + E_{u,i} + E_{H,i} + E_{d,i} + E_{ex,i} \} - \int_S E_{int} dS. \quad (1)$$

Он включает в себя энергию кубической анизотропии  $E_{cub,i} = \frac{K_c}{M_i^4} \{ 3M_{x,i}^4 + 3M_{y,i}^4 + 4M_{z,i}^4 + 6M_{x,i}^2 M_{y,i}^2 - 12\sqrt{2}M_{x,i}^2 M_{y,i} M_{z,i} + 4\sqrt{2}M_{x,i}^3 M_{z,i} \}$ ,

энергию одноосной магнитной анизотропии образца  $E_{u,i} = \frac{K_i}{M_i^2} M_{z,i}^2$ , энергию Зеемана

$E_{H,i} = -\mathbf{M}_i \mathbf{H}$ , энергию дипольного взаимодействия  $E_{d,i} = -\frac{1}{2} \mathbf{M}_i \mathbf{H}^{(m)}$ , энергию обменного

взаимодействия  $E_{ex,i} = \frac{\alpha_i}{2M_i^2} \left[ \left( \frac{\partial \mathbf{M}_i}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \mathbf{M}_i}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \mathbf{M}_i}{\partial z} \right)^2 \right]$  и энергию межслойного

обменного взаимодействия  $E_{int} = \frac{J}{M_1 M_2} \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2$ .

Здесь  $K_i$  – постоянные одноосной анизотропии слоев,  $M_i$  – намагниченности насыщения слоев,  $\mathbf{H}$  – внешнее магнитное поле,  $\mathbf{H}^{(m)}$  – поле магнитного дипольного взаимодействия,  $\alpha_i$  – константы обменного взаимодействия,  $J$  – константа межслойного обменного взаимодействия.

Для неоднородного распределения намагниченности величина вектора электрической поляризации  $\mathbf{P}$  вычислялась по формуле [9]:

$$\mathbf{P} = \gamma \chi_e \left[ (\mathbf{M} \nabla) \mathbf{M} - \mathbf{M} (\nabla \mathbf{M}) \right], \quad (2)$$

где  $\chi_e$  – электрическая поляризуемость,  $\gamma$  – коэффициент неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия. Далее мы будем рассчитывать вектор поляризации, отнесенный к произведению этих величин, и квадрата намагниченности насыщения:  $\mathbf{P} \rightarrow \mathbf{P} / \gamma \chi_e M_i^2$ , размерность приведенной поляризации –  $\text{см}^{-1}$ . Средняя поляризация вычисляется по формуле:

$$\bar{\mathbf{P}} = \frac{1}{V} \int_V \mathbf{P}(x, y, z) dx dy dz. \quad (3)$$

Задача нахождения равновесного состояния решалась численно. Расчеты производились в пакете программ трехмерного моделирования OOMMF [10] с дискретизацией на прямоугольной сетке с шагом 5 нм по координатам  $x$  и  $y$  и 3 нм по координате  $z$ . Расчет выполнен для параметров двухслойной пленки, характерных для пленки феррита-граната:  $M_1 \approx 30$  Гс,  $M_2 \approx 70$  Гс,  $\alpha \approx 10^7$  эрг/см,  $K_1 \approx 2 \times 10^4$  эрг/см<sup>3</sup>,  $K_2 \approx -7 \times 10^4$  эрг/см<sup>3</sup>,  $J = 1$  см<sup>-1</sup>. Постоянные кубической анизотропии  $K_c$  варьировались от 0 до  $-7 \times 10^3$  эрг/см<sup>3</sup>. Исследуемые образцы представляли собой прямоугольные наностолбики, их поперечные размеры составляли  $200 \times 200$  нм, а толщина 120 нм.

Проводился численный расчет процесса перемагничивания двухслойной ферромагнитной пленки из состояния насыщения вдоль оси  $z$  до состояния насыщения против оси  $z$ , а затем из состояния насыщения против оси  $z$  к состоянию насыщения вдоль оси  $z$ . Как показали наши расчеты, при наличии кубической анизотропии описанной выше конфигурации, в отличие от пленки с одноосной анизотропией, при перемагничивании вихревого распределения намагниченности не возникает. Намагниченность по мере уменьшения магнитного поля отклоняется от направления поля и опускается в плоскость пленки. При этом происходит ее вращение: от направления вдоль диагонали пленки в более высоких полях, до направления вдоль одной из граней пленки, в близких к нулю значений поля. Направление намагниченности в нулевом поле зависит от направления вдоль или против оси  $z$  происходит перемагничивание.

Поскольку в исследуемой пленке отсутствует вихревое распределение намагниченности, перпендикулярная плоскости пленки компонента поляризации  $P_z$  оказывается пренебрежимо малой. Однако благодаря неоднородности на границе слоев пленки значительной становится

компонента средней поляризации

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \text{ лежащая в плоскости пленки.}$$

На рис. 1 приведено изменение приведенной компоненты намагниченности  $M_{z,i}/M_i$  при перемагничивании пленки из состояния насыщения вдоль оси  $z$  до состояния насыщения против оси  $z$ . Видно, что с уменьшением внешнего поля магнитная неоднородность на границе раздела слоев возрастает.

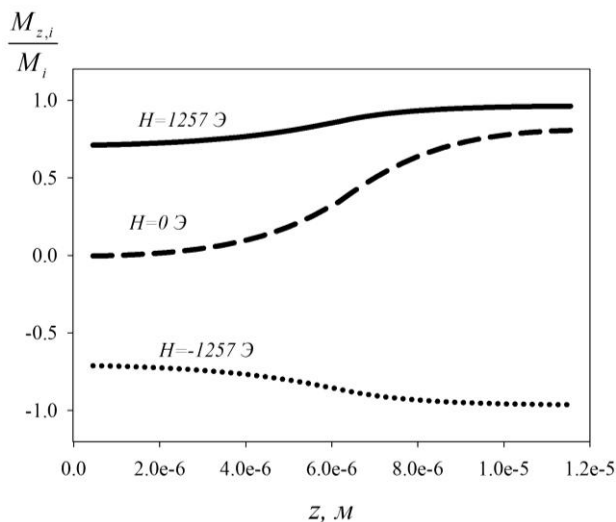


Рис. 1. Зависимость приведенной компоненты намагниченности  $\frac{M_{z,i}}{M_i}$  от толщины пленки при различных значениях внешнего магнитного поля,  $K_c = -7 \times 10^3$  эрг/см<sup>3</sup>

Соответствующие зависимости для лежащей в плоскости пленки поляризации  $P$  приведены на рис. 2.

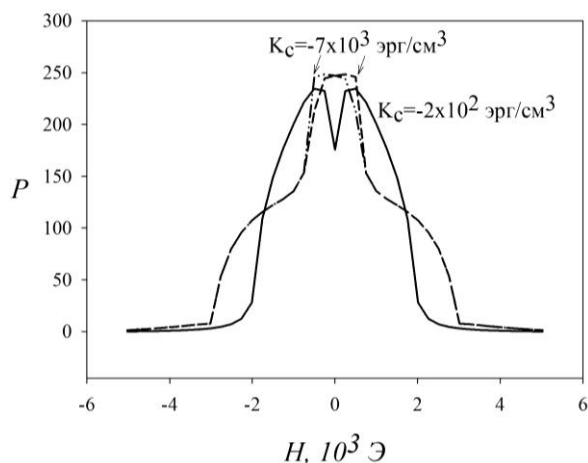


Рис. 2. Зависимость компоненты поляризации  $P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$ , лежащей в плоскости пленки от величины внешнего магнитного поля

С увеличением кубической анизотропии величина поляризации  $P$ , лежащей в плоскости пленки, начинает возрастать. Как видно, при малых значениях кубической анизотропии гистерезис поляризации, обнаруженный при вихревом распределении намагниченности [7], на данном рисунке практически не виден. Однако при уменьшении кубической анизотропии до  $-7 \times 10^3$  эрг/см<sup>3</sup> обнаруживается гистерезис поляризации – максимумы кривых на зависимостях поляризации от величины внешнего магнитного поля вблизи нулевого поля в зависимости от того, направлено ли изначально внешнее магнитное поле вдоль или противоположно оси  $z$ , смещается в область отрицательных либо положительных полей.

### Литература

1. Matsukura F., Tokura Y., H. Ohno H. Control of magnetism by electric fields // Nature Nano-Technology. 2015. V. 10. P. 209–220.
2. Tannous C., Gieraltowski J. Electronic control of magnonic and spintronic devices // J. of Materials Science: Materials in Electronics. 2015. V. 26. P. 4675–4682.
3. Барьяхтар В.Г., Львов В.А., Яблонский Д.А. Теория неоднородного магнитоэлектрического эффекта // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37, № 12. С. 565–567.
4. Пятаков А.П., Сергеев А.С., Николаева Е.П., Косых Т.Б., Николаев А.В., Звездин К.А., Звездин А.К. Микромагнетизм и топологические дефекты в магнитоэлектрических средах // Успехи физических наук. 2015. Т. 185. С. 1077–1088.
5. Shulga N.V., Doroshenko R.A. Electric polarization in two-layer bounded ferromagnetic film // J. of magnetism and magnetic materials. 2019. V. 471. P. 304–309.
6. Шульга Н.В., Дорошенко Р.А. Неоднородный магнитоэлектрический эффект в наноразмерной ферромагнитной пленке с поверхностной анизотропией // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120, № 7. С. 695–701.
7. Шульга Н.В., Дорошенко Р.А. Гистерезис электрической поляризации в двухслойной ферромагнитной пленке при вихревом распределении намагниченности // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 120, № 7. С. 695–701.
8. Gareeva Z.V., Mazhitova F.A., Doroshenko R.A., Shulga N.V. Electric polarization in bi-layered ferromagnetic film with combined magnetic anisotropy // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2016. V. 414. P. 74–77.
9. Mostovoy M. Ferroelectricity in spiral magnets // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. № 6. P. 067601-1-067601-4.

10. Donahue M.J., Porter D.G. OOMMF User's Guide. Version 1.0 NISTIR 6376. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1999. 94 p.

### References

1. Matsukura F., Tokura Y., Ohno H. Control of magnetism by electric fields. *Nature Nano-Technology*, 2015, vol. 10, pp. 209–220.

2. Tannous C., Gieraltowski J. Electronic control of magnonic and spintronic devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, vol. 26, pp. 4675–4682.

3. Barjahtar V.G., Lvov V.A., Jablonsky D.A. Theory of non-uniform magneto electric effect. *JETP Letters*, 1983, vol. 37, no. 12, pp. 565–567.

4. Pyatakov A.P., Sergeev A.S., Nikolaeva E.P., Kosykh T.B., Nikolaev A.V., Zvezdin K.A., Zvezdin A.K. Micromagnetism and topological defects in magnetoelectric media. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2015, vol. 185, pp. 1077–1088.

5. Shulga N.V., Doroshenko R.A. Electric polarization in two-layer bounded ferromagnetic film. *Journal*

of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, vol. 471, pp. 304–309.

6. Shulga N.V., Doroshenko R.A. Nonuniform magnetoelectric effect in a nanosized ferromagnetic film characterized by surface anisotropy. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2019, vol. 120, no. 7, pp. 695–701.

7. Shulga N. V., Doroshenko R. A. Hysteresis of the electric polarization in a two-layer ferromagnetic film with a vortical distribution of magnetization. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2020, vol. 121, no. 6, pp. 583–588.

8. Gareeva Z.V., Mazhitova F.A., Doroshenko R.A., Shulga N.V. Electric polarization in bi-layered ferromagnetic film with combined magnetic anisotropy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 414, pp 74–77.

9. Mostovoy M. Ferroelectricity in spiral magnets. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, no. 6, pp. 067601-1 – 067601-4.

10. Donahue M.J., Porter D.G. OOMMF User's Guide. Version 1.0 NISTIR 6376. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999. 94 p.



## MAGNETIZATION AND INHOMOGENEOUS MAGNETOELECTRIC EFFECT IN A NANO-SIZED TWO-LAYER FERROMAGNETIC FILM WITH A COMBINED UNIAXIAL AND CUBIC ANISOTROPY IN LAYERS

© N.V. Shulga, R.A. Doroshenko

Institute of Molecule and Crystal Physics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre  
of the Russian Academy of Sciences,  
151, prospekt Oktyabrya, 450075, Ufa, Russian Federation

A numerical study of the magnetization reversal of a two-layer exchange-coupled ferromagnetic plate of finite dimensions, which has a combined uniaxial anisotropy (of the "easy axis" type for the upper layer and «easy plane» for the lower one) and cubic anisotropy with orientation [111]. It is shown that, in the presence of cubic anisotropy, the ground state of magnetization turns out to be uniform in the plane of the film. However, there is discontinuity at the interface between the film layers. This inhomogeneity can lead to the appearance of electric polarization due to the magnetoelectric effect. The electric polarization vector in this case lies in the plane of the film. Its modulus increases with increasing cubic anisotropy. In addition, with an increase in cubic anisotropy, a hysteresis of electrical polarization is observed.

Key words: two-layer ferromagnetic film, inhomogeneous magnetoelectric effect, electric polarization, hysteresis.