

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ (100)-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛЕНКИ

© Ф. А. Мажитова^{1*}, З. В. Гареева²

¹Бакирский государственный университет

Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

²Институт физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра РАН

Россия, Республика Башкортостан, 450075 г. Уфа, пр. Октября, 151.

Тел./факс: +7 (347) 229 96 40.

*Email: ya.filuza2012@yandex.ru

Исследована электрическая поляризация, индуцированная магнитной неоднородностью, возникающей в окрестности границы раздела слоев с различной одноосной магнитной анизотропией в двухслойной (100) – ориентированной обменно-связанной ферромагнитной пленке. Исследовано влияние магнитного поля, приложенного вдоль нормали к поверхности пленки на процессы намагничивания и электрическую поляризацию. Построены диаграммы полевых зависимостей электрической поляризации, определены пороговые магнитные поля, подавляющие электрическую поляризацию.

Ключевые слова: неоднородный магнитоэлектрический эффект, электрическая поляризация, ферромагнитная пленка, кубическая магнитная анизотропия, наведенная одноосная магнитная анизотропия.

Введение

В настоящее время магнитоэлектрическая тематика приобретает все большую актуальность, что связано с перспективными технологическими приложениями материалов, в которых реализуются магнитоэлектрические свойства, а также нетривиальными физическими эффектами, обусловленными взаимодействием нескольких параметров порядка. Известно, что наряду с мультиферроидными материалами, кристаллическая структура которых допускает сосуществование электрического и магнитного упорядочения, существует альтернативная возможность реализации магнитоэлектрических эффектов в окрестности магнитной неоднородности.

Исследование неоднородного магнитоэлектрического эффекта (возникновение электрической поляризации в окрестности магнитной неоднородности), теоретически предсказанного Барьяхтаром [1], в наши дни получило активное развитие. Доменные структуры неблоховского типа, скирмионы, блоховские точки, границы раздела магнитных сред, как было показано в ряде теоретических и экспериментальных работ [2–8] приводят к возникновению электрической поляризации в магнитных по своей природе материалах, неоднородное распределение поляризации также [9] способствует появлению намагниченности в классе мультиферроиков с сильной магнитоэлектрической связью. В то время как проявления неоднородного магнитоэлектрического эффекта в окрестности магнитных доменных границ и скирмионов достаточно активно исследуется, изучению электрических свойств ферромагнитных гетероструктур уделяется недостаточно внимания.

В данной работе исследованы условия реализации электрической поляризации, формирующейся в области границы раздела обменно – связанной ферромагнитной структуры, возможности управления электрической поляризацией под действием магнитного поля, приложенного вдоль нормали к поверхности пленки, изучено влияние комбинированной магнитной анизотропии, с акцентом на ее кубической составляющей на процессы намагничивания и связанные с ними особенности электрической поляризации.

Постановка задачи

Рассмотрим двухслойную ферромагнитную структуру, помещенную во внешнее магнитное поле \mathbf{H} . Систему координат выберем следующим образом: ось

[100] (\mathbf{OX}) ориентируем по нормали к поверхности, ось [001] (\mathbf{OZ}) направим вдоль границы раздела слоев (рис.1). Положение локального вектора намагниченности \mathbf{M} определим сферическими координатами $M = M_0(\cos \theta, \sin \theta \sin \Phi, \sin \theta \cos \Phi)$, где полярный угол θ отсчитывается от положительного направления оси \mathbf{OZ} , азимутальный угол Φ отсчитывается от положительного направления оси \mathbf{OX} . Пленки имеют различную толщину и характеризуются комбинированной анизотропией (естественной кубической и наведенной ростовой магнитной анизотропией). Константы наведенной одноосной магнитной анизотропии пленок в общем случае различаются по знаку и величине.

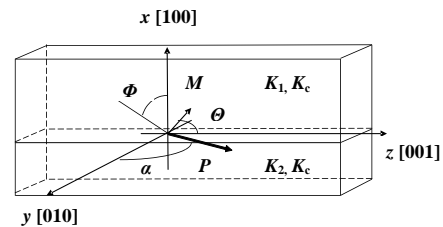


Рис. 1. Геометрия задачи.

Полная энергия системы, включающая обменную энергию, энергию кубической и наведенной анизотропии, энергию взаимодействия с внешним магнитным полем, энергию неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия, электростатическую энергию и энергию взаимодействия с электрическим полем имеет вид

$$\begin{aligned}
 E = & \sum_{i=1}^2 \left(A \left[\left(\frac{\partial M_{ix}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial M_{iy}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial M_{iz}}{\partial z} \right)^2 \right] + \right. \\
 & + K_c (M_{ix}^2 M_{iy}^2 + M_{ix}^2 M_{iz}^2 + M_{iz}^2 M_{iy}^2) + \\
 & + K_i (\mathbf{M}_i \mathbf{n})^2 - \mathbf{M}_i \mathbf{H} - \mathcal{J} \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 + \\
 & + \gamma \tilde{\mathbf{P}}_i [(\mathbf{M}_i \nabla) \mathbf{M}_i - \mathbf{M}_i (\nabla \mathbf{M}_i) + \\
 & \left. + \frac{\tilde{P}_{ix}^2 + \tilde{P}_{iy}^2 + \tilde{P}_{iz}^2}{2\gamma} - \tilde{\mathbf{P}}_i \mathbf{E} \right]
 \end{aligned} \quad (1)$$

где A – константа неоднородного обменного взаимодействия, K_1 – константа наведенной анизотропии типа «легкая ось», K_2 – константа наведенной анизотропии

типа «легкая плоскость», K_c – константа кубической анизотропии ($K_c < 0$), J – константа межслойного обменного взаимодействия, P_j ($j=x,y,z$) – компоненты вектора электрической поляризации, χ_e – электрическая поляризуемость, γ – коэффициент неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия, E – электрическое поле.

Устойчивые состояния намагниченности и поляризации в данной системе определяются минимумом термодинамического потенциала (1). Задача нахождения равновесной конфигурации намагниченности (Θ , Φ) была решена численно (с использованием методов многомерной оптимизации [10]) на основе разбиения каждого магнитного слоя на N подслоев, параллельных плоскости образца и обменно – связанных друг с другом. Компоненты локального вектора электрической поляризации \tilde{P} , задающего величину и направление поляризации в i – ом слое ферромагнетика определяются соотношениями:

$$\tilde{P}_y = \chi_e \gamma \sin^2 \theta \frac{d\Phi}{dx} \quad (2)$$

$$\tilde{P}_z = \chi_e \gamma \left(-\frac{d\theta}{dx} \cos \Phi + \sin \theta \cos \theta \sin \Phi \frac{d\Phi}{dx} \right) \quad (3)$$

На основе проведенных расчетов исследованы особенности электрической поляризации системы, обусловленные влиянием кубической анизотропии, при изменении приложенного магнитного поля в зависимости от соотношений констант наведенной магнитной анизотропии. В качестве объектов модельного исследования рассмотрены пленки с параметрами ферритов – гранатов (материалов, допускающих магнитоэлектрический эффект [11]).

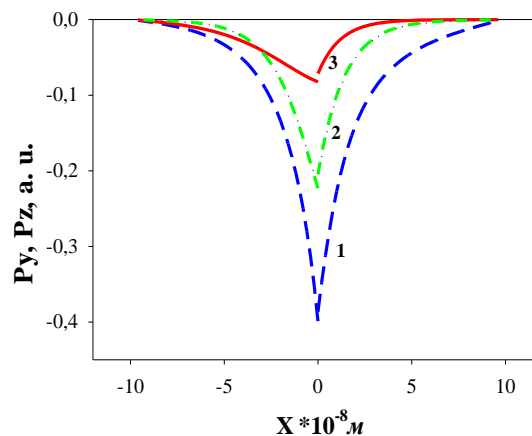
Результаты численных расчетов и их обсуждение

Рассмотрим изменение локальной электрической поляризации по толщине пленки при намагничивании пленки в направлении $\mathbf{H} \parallel [100]$. На рис. 2 показано изменение компонент электрической поляризации P_y , P_z в зависимости от координаты x , при разной величине магнитного поля \mathbf{H} для пленок разных толщин (рис. 2а, 2б). На графиках видно, что в отсутствие магнитного поля электрическая поляризация достигает максимальных значений в области границы раздела слоев, при увеличении магнитного поля поляризация уменьшается. В случае малых толщин пленок электрическая поляризация распределена по всей толщине структуры (рис. 2а), при увеличении толщины пленок электрическая поляризация становится локализованной в области границы слоев (рис. 2б).

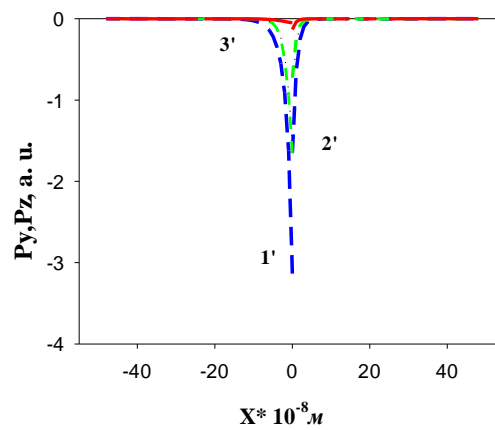
На рис. 3 представлены графики зависимости полной электрической поляризации системы $P = \sqrt{P_y^2 + P_z^2}$ от магнитного поля $\mathbf{H} \parallel [100]$ для разных соотношений между константами наведенной одноосной анизотропии K_1 , K_2 при разной величине константы кубической анизотропии K_c . Компоненты P_y , P_z получены интегрированием уравнений (2, 3) по толщине образца.

Характер изменения поляризации зависит от значений константы кубической анизотропии и соотношений между константами одноосной магнитной анизотропии. Изменение константы магнитной анизотропии типа «легкая плоскость» K_2 изменяет положение зависимостей $P(x)$. На графиках (рис. 3) видно, что при уменьшении величины K_2 величина порогового магнитного поля, при котором поляризация принимает

нулевые значения, уменьшается. При малых значениях магнитного поля электрическая поляризация достигает экстремума (рис. 3), расчеты показывают, что при увеличении константы кубической анизотропии экстремум сдвигается в область более высоких магнитных полей. После достижения максимального значения при дальнейшем увеличении магнитного поля электрическая поляризация понижается вплоть до ее исчезновения при пороговых значениях \mathbf{H} . Уменьшение величины константы кубической магнитной анизотропии приводит к понижению величины порогового магнитного поля, подавляющего электрическую поляризацию (рис. 3). Особенности поведения электрической поляризации во внешнем магнитном поле объясняются процессами намагничивания.



(а)



(б)

Рис. 2. Зависимость распределения поляризации P от толщины слоев. Кривая 1 – $H=0$ А/м, кривая 2 – $H=5,5 \cdot 10^4$ А/м, кривая 3 – $H=8 \cdot 10^4$ А/м; кривая 1' – $H=0$ А/м, кривая 2' – $H=4 \cdot 10^4$ А/м, кривая 3' – $H=8 \cdot 10^4$ А/м. А.у. (arbitrary units) – произвольные единицы измерения.

Выводы

В работе проведено исследование электрической поляризации двухслойной ферромагнитной структуры при учете константы кубической анизотропии. Распределение электрической поляризации по толщине пленки зависит от внутренних и внешних параметров системы (размеров слоев, параметров обменных взаимо-

действий, ростовой и естественной (кубической) магнитной анизотропии, внешнего магнитного поля). Путем варьирования толщин слоев, а также изменяя магнитную анизотропию пленок, поляризацию можно локализовать в области границы раздела сред или распространить по всей толщине материала.

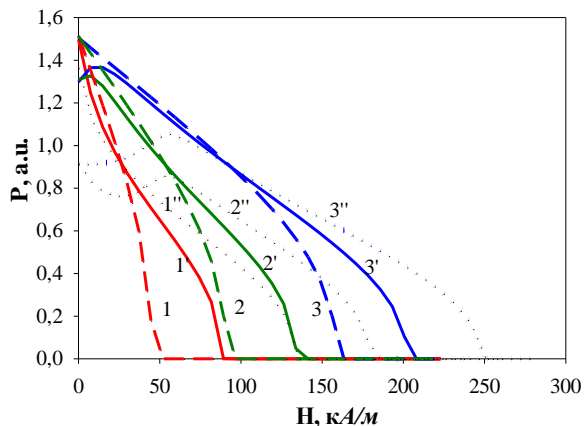


Рис. 3. Интегральная зависимость электрической поляризации от H при разных соотношениях констант одноосной анизотропии для $H \parallel [100]$. Кривая 1 – $K_1=7 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$, $K_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$, кривая 2 – $K_1=2 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$, $K_2 = 4 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$, кривая 3 – $K_1=2 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$, $K_2=7 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$ ($K_C = -10^2 \text{ Дж/м}^3$) (пунктирные линии). Кривые 1', 2', 3' построены для тех же соотношений K_1 , K_2 ($K_C = -2 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$) (сплошные линии), а кривые 1'', 2'', 3'' для $K_C = -8 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$ (точечные линии).

Магнитное поле влияет на распределение поляризации, характер изменения поляризации в магнитном поле зависит от магнитной анизотропии слоев, вели-

чина электрической поляризации уменьшается при увеличении величины магнитного поля. Проведенные расчеты показывают, что магнитное поле, приложенное в направлении нормали к поверхности пленки, понижает величину электрической поляризации после достижения максимального значения. Пороговые поля, подавляющие электрическую поляризацию, могут быть увеличены за счет учета кубической магнитной анизотропии, а также выбора геометрии магнитного поля. В магнитном поле, приложенном вдоль нормали к поверхности пленки, повышение величины порогового магнитного поля достигается за счет увеличения значений константы магнитной анизотропии типа «легкая плоскость».

ЛИТЕРАТУРА

1. Barjahtar V. G., Lvov V. A., Jablonsky D. A. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37. С. 565.
2. Mostovoy M. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 067601.
3. Gareeva Z. V., Doroshenko R. A., Shulga N. V., Harbusch K. // J. Magnetism Magn. Mater. 2009. V. 321. P. 1163.
4. Кабыченков А. Ф., Лисовский Ф. В., Мансвегова Е. Г. // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. С. 304.
5. Logginov A. S., Meshkov G. A., Nikolaev A. V., Nikolaeva E. P., Pyatakov A. P., Zvezdin A. K. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 182510.
6. Pyatakov A. P., Sechin D. E., Sergeev A. S. // EPL. 2011. V. 93. P. 17001.
7. Logginov A.S., G.A. Meshkov G.A., A.V. Nikolaev A.V., A.P. Pyatakov A.P., V.A. Shust V.A. Zhdanov A.G., Zvezdin A.K. // J. Magnetism Magn. Mater. 2007. V. 310. P. 2569–2571.
8. Калинин А. Н., Скориков В. М. // Журн. неорг. химии. 2010. Т. 55. С. 1903–1919.
9. Tokura, Y., Seki, S. // Adv. Mater. 2010. V. 22. P. 1554–1565.
10. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical Recipes in C. Cambridge: Cambridge University, 1992. 994 p.
11. Krichevtzov B. B., Pisarev R. V., Selitzky A. G. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41. С. 259.

Поступила в редакцию 03.02.2015 г.

ELECTRIC POLARIZATION OF A (100)-ORIENTED BI-LAYERED FERROMAGNETIC FILM© F. A. Mazhitova^{1*}, Z. V. Gareeva²¹*Bashkir State University
32 Zaki Validi St., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*²*Institute of Molecule and Crystal Physics,
Ufa Research Center, Russian Academy of Sciences
151 Oktyabrya Ave., 450075 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (347) 229 96 40.

*Email: ya.filuza2012@yandex.ru

In the article, the electric polarization generated by magnetic inhomogeneity arising in a vicinity of the interface between layers with different uniaxial magnetic anisotropy in a (100)-oriented bi-layered exchange coupled ferromagnetic film has been investigated. It has been shown that cubic magnetic anisotropy in the layers allocates the plane of magnetization rotation across magnetic inhomogeneity and correspondingly the direction of electric polarization. The influence of magnetic field applied along normal to the surface on magnetization processes and electric polarization has been studied. The field dependent electric polarization diagrams have been constructed and the threshold fields suppressing electric polarization have been determined.

Keywords: *inhomogeneous magnetoelectric effect, electric polarization, ferromagnetic film, cubic magnetic anisotropy, induced uniaxial magnetic anisotropy.*

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Barjahtar V. G., Lvov V. A., Jablonsky D. A. Pis'ma v ZhETF. 1983. Vol. 37. Pp. 565.
2. Mostovoy M. Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96. Pp. 067601.
3. Gareeva Z. V., Doroshenko R. A., Shulga N. V., Harbusch K. J. Magnetism Magn. Mater. 2009. Vol. 321. Pp. 1163.
4. Kabychenkov A. F., Lisovskii F. V., Mansvetova E. G. Pis'ma v ZhETF. 2013. Vol. 97. Pp. 304.
5. Logginov A. S., Meshkov G. A., Nikolaev A. V., Nikolaeva E. P., Pyatakov A. P., Zvezdin A. K. Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. Pp. 182510.
6. Pyatakov A. P., Sechin D. E., Sergeev A. S. EPL. 2011. Vol. 93. Pp. 17001.
7. Logginov A.S., G.A. Meshkov G.A., A.V. Nikolaev A.V., A.P. Pyatakov A.P., V.A. Shust V.A. Zhdanov A.G., Zvezdin A.K. J. Magnetism Magn. Mater. 2007. Vol. 310. Pp. 2569–2571.
8. Kalinkin A. N., Skorikov V. M. Zhurn. neorg. khimii. 2010. Vol. 55. Pp. 1903–1919.
9. Tokura, Y., Seki, S. Adv. Mater. 2010. Vol. 22. Pp. 1554–1565.
10. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical Recipes in C. Cambridge: Cambridge University, 1992.
11. Krichevtzov B. B., Pisarev R. V., Selitzky A. G. Pis'ma v ZhETF. 1985. Vol. 41. Pp. 259.

Received 03.02.2015.