

УДК 539.216.2,537.622.4

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ ОБМЕННО-СВЯЗАННОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛЕНКИ

© 2020 г. Н. В. Шульга<sup>1</sup> \*, Р. А. Дорошенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики молекул и кристаллов – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

\*E-mail: shulga@anrb.ru

Поступила в редакцию 28.11.2019 г.

После доработки 19.12.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Численно исследована электрическая поляризация для вихревого распределения намагниченности в двухслойной обменно-связанной ферромагнитной пленке конечных размеров. Электрическая поляризация такой пленки определяется перпендикулярной компонентой намагниченности. Вклад в электрическую поляризацию отдельных слоев образца различен и зависит от размеров пленки. С уменьшением поперечных размеров пленки величина средней поляризации возрастает. При намагничивании в перпендикулярном направлении средняя поляризация проходит через максимум.

DOI: 10.31857/S0367676520050385

### ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуются магнитоэлектрические свойства ограниченной наноразмерной двухслойной пленки феррита-граната. Как уже было показано ранее [1], в такой пленке в отсутствие внешнего поля наряду с однородным основным состоянием наблюдается вихревое состояние намагниченности. В настоящее время изучается возможность использовать различные структуры, в которых реализуется такое распределение намагниченности, как в системах хранения информации [2], так и для построения логических устройств на их основе [3, 4].

Требуемая для таких приложений возможность переключения между различными состояниями вихря может осуществляться при наличии магнитоэлектрического эффекта электрическим полем [5]. Одно из проявлений неоднородного магнитоэлектрического эффекта в пленках ферритов-гранатов – появление электрической поляризации на магнитной неоднородности. В настоящей статье исследуется электрическая поляризация, индуцированная вихревым распределением намагниченности и ее изменение при намагничивании пленки внешним магнитным полем.

### МОДЕЛЬ РАСЧЕТА

Рассмотрим двухслойную пленку, слои которой обладают одноосной анизотропией разных знаков. Пленка конечных размеров, квадратная

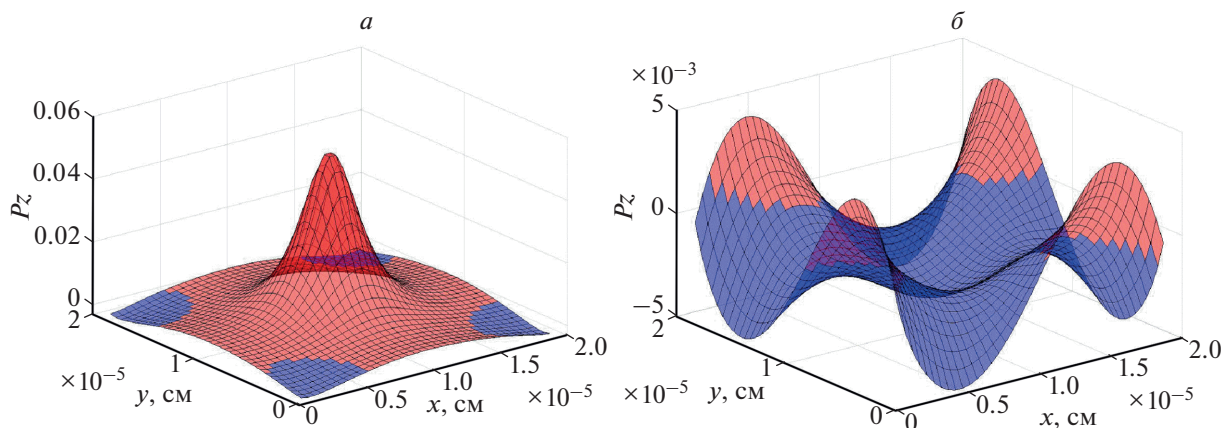
в поперечном сечении в форме наностолбика. Ось координат  $z$  совпадает с осью анизотропии. Внешнее магнитное поле направлено параллельно оси  $z$ . Таким образом, функционал энергии системы включает энергии одноосной магнитной анизотропии образца и поверхностной анизотропии, энергию дипольного взаимодействия, энергию Зеемана и энергию обменного взаимодействия.

Задача нахождения равновесного состояния такой системы решалась численно. Расчеты были проведены с использованием пакета программ трехмерного моделирования OOMMF [7] с дискретизацией на прямоугольной сетке с шагом 5 нм по координатам  $x$  и  $y$  и 3 нм по координате  $z$ . Вычисления проведены для параметров пленки, характерных для пленки феррита-граната. Поперечные размеры образцов варьировались от  $200 \times 200$  до  $500 \times 500$  нм.

Вектор электрической поляризации  $\vec{P}$  для кристаллов кубической симметрии, к которым относятся ферриты-гранаты, вычисляется по формуле [8]:

$$\vec{P} = \gamma\chi_e [(\vec{M}\nabla)\vec{M} - \vec{M}(\nabla\vec{M})], \quad (1)$$

где  $\chi_e$  – электрическая поляризуемость,  $\gamma$  – коэффициент неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия. Далее мы будем рассчитывать вектор поляризации, отнесенный к произведе-



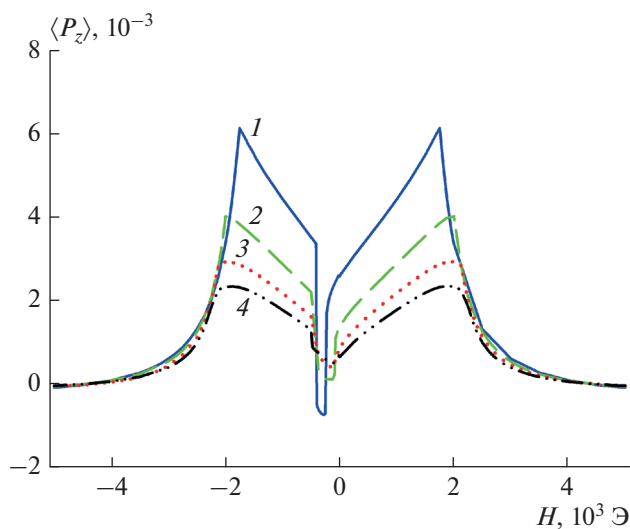
**Рис. 1.** Зависимости  $z$ -составляющей поляризации от координат  $x$  и  $y$ :  $a$  – на нижней границе пленки;  $b$  – на верхней границе пленки.

дению этих величин и квадрата намагниченности насыщения:  $\bar{P} \rightarrow \bar{P}/\gamma\chi_e M_i^2$ . Средняя поляризация вычисляется по формуле:

$$\langle \bar{P} \rangle = \frac{1}{V} \int \bar{P}(x, y, z) dx dy dz. \quad (2)$$

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вследствие наличия ядра вихря появляется отличная от нуля  $z$ -компонента поляризации. Если не учитывать влияние ядра вихря, средняя поляризация образца была бы равна нулю, поскольку



**Рис. 2.** Зависимости  $z$ -составляющей усредненной по объему образца поляризации от величины внешнего магнитного поля для пленок с поперечными размерами: 1 –  $200 \times 200$ , 2 –  $300 \times 300$ , 3 –  $400 \times 400$ , 4 –  $500 \times 500$  нм и толщиной 120 нм.

такое распределение намагниченности порождает радиальное распределение поляризации.

Для образца с малыми поперечными размерами слой, обладающий анизотропией “легкая ось”, дает вклад в среднюю по образцу поляризацию меньший, чем слой, обладающий анизотропией “легкая плоскость” (см. рис. 1а и 1б). Однако с увеличением поперечных размеров пленки вклад слоя с анизотропией “легкая ось” увеличивается. Кроме того, наличие этого слоя делает вихревое распределение устойчивым.

Рассмотрим теперь поведение исследуемой системы при изменении внешнего магнитного поля. Предполагается, что вначале образец намагничен до насыщения вдоль оси  $z$ . Затем внешнее поле начинает уменьшаться. На рис. 2 представлены зависимости  $\langle P_z \rangle$  от величины внешнего магнитного поля для четырех образцов с различными поперечными сечениями. Видно, что для всех образцов величина  $\langle P_z \rangle$  при уменьшении внешнего магнитного поля увеличивается. Чем меньше размеры образца, тем в меньшем поле будет достигнут максимум  $\langle P_z \rangle$ . После достижения максимума  $\langle P_z \rangle$  в слое типа “легкая плоскость” начинает формироваться вихревое распределение намагниченности.

Вблизи нуля в отрицательном магнитном поле средняя поляризация  $\langle P_z \rangle$  достигает локального минимума. Чем меньше поперечные размеры образца, тем сильнее уменьшается  $\langle P_z \rangle$ . При этом намагниченность большей части слоя с анизотропией типа “легкая плоскость” уже развернулась по полю, но в центре ядра все еще присутствует намагниченность, ориентированная вдоль оси  $z$ , что и приводит к резкому уменьшению средней поляризации. После того как намагниченность в

ядре вихря в обоих слоях развернулась в направлении внешнего поля,  $\langle P_z \rangle$  продолжает увеличиваться, пока не достигает максимума в отрицательном поле, а потом снижается до нуля при насыщении образца.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численно исследована электрическая поляризация, индуцированная вихревым распределением намагниченности в двухслойной обменно-связанной ферромагнитной пленке. Для образцов с малыми поперечными размерами вклад в среднюю поляризацию слоя с анизотропией “легкая ось” незначителен. Однако его наличие определяет направление намагниченности в ядре и делает вихревое образование устойчивым. При перемагничивании пленки из состояния насыщения средняя поляризация сначала увеличивается, пока не достигнет максимума. Чем меньше поперечные

размеры образца, тем в меньшем поле достигается максимум.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shul'ga N.V., Doroshenko R.A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2019. V. 471. P. 304.
2. *Geng D.G., Jin Y.M.* // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 423. P. 84.
3. *Prinz G.A.* // Science. 1998. V. 282. P. 1660.
4. *Vigo-Cotrino H., Guimaraes A.P.* // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 441. P. 14.
5. *Kumar D., Barman S., Barman A.* // Sci. Rep. 2014. V. 4. Art. № 4108.
6. *Meshkov G.A., Pyatakov A.P., Belanovsky A.D. et al.* // J. Magn. Soc. Japan. 2012. V. 36. P. 46.
7. *Donahue M.J., Porter D.G.* OOMMF User's Guide. Version 1.0 NISTIR 6376. Gaithersburg: National institute of standards and technology, 1999.
8. *Mostovoy M.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. Art. № 067601.