

О возможности зарождения в магнитных диэлектриках магнитных вихрей и антивихрей с помощью электрического поля

А. П. Пятаков^a, Г. А. Мешков, А. С. Логгинов

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра физики колебаний. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^apyatakov@physics.tsu.ru*

Статья поступила 26.01.2010, подписана в печать 19.03.2010

Теоретически рассмотрено микромагнитное распределение в наночастице диэлектрика. Показано, что наличие в магнитных диэлектриках неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия создает возможность зарождения в них магнитных вихрей и антивихрей с помощью электрического поля. Оценка критического напряжения, необходимого для зарождения вихря в частицах высокотемпературного мультиферроика феррита висмута, дает значение ~ 100 В.

Ключевые слова: неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие, мультиферроики, магнитный антивихрь, магнитные наночастицы.

УДК: 537.611.2, 537.29. PACS: 75.85.+t.

Введение

Разнообразные микромагнитные структуры, наблюдаемые в магнитных средах, являются результатом конкуренции небольшого числа механизмов взаимодействий, включающих в себя магнитостатическую и обменную энергию. Эти два вида взаимодействий порождают магнитные вихри в ферромагнитных нанодисках и наноточках [1–6]. Столь же фундаментально значимой, однако гораздо менее известной является структура типа антивихрь, представляющая собой топологический антипод вихря (рис. 1). Реализация антивихревого состояния — довольно сложная задача, поскольку оно энергетически невыгодно вследствие образования магнитных зарядов на краях частицы. Существуют единичные сообщения о наблюдениях антивихревого состояния в ферромагнетиках сложных конфигураций в виде пересекающихся окружностей [7] или крестообразныхnanoструктур [8].

В магнитных диэлектриках вихревые состояния наблюдаются в виде линий Блоха, разделяющих между собой участки доменной границы с различным направлением разворота намагниченности [9–11], размеры которых также определяются конкуренцией обменного и магнитостатического взаимодействий.

В то же время существует еще одно взаимодействие, пропорциональное пространственным производным от вектора магнитного параметра порядка, которое следует учитывать при рассмотрении микромагнитных структур в магнитных диэлектриках в присутствии внешнего электрического поля, а также в магнитных сегнетоэлектриках (мультиферроиках). Это неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие описывается вкладом в термодинамический потенциал вида $P_i M_j \nabla_k M_l$, где \mathbf{P} и \mathbf{M} — векторы сегнетоэлектрической поляризации и магнитного параметра порядка соответственно [12–21]. Данное взаимодействие ответственно за магнито-индукционную электрическую поляризацию в спиральных мультиферроиках [22] и за эффект движения магнитных доменных границ под действием электрического поля в пленках ферритов гранатов [23].

В настоящей статье показано, что градиент электрического поля, создаваемый, например, иглой сканирующего зондового микроскопа, может привести к образованию в наночастице из магнитного диэлектрика вихревого или антивихревого распределения намагниченности в зависимости от полярности напряжения на игле.

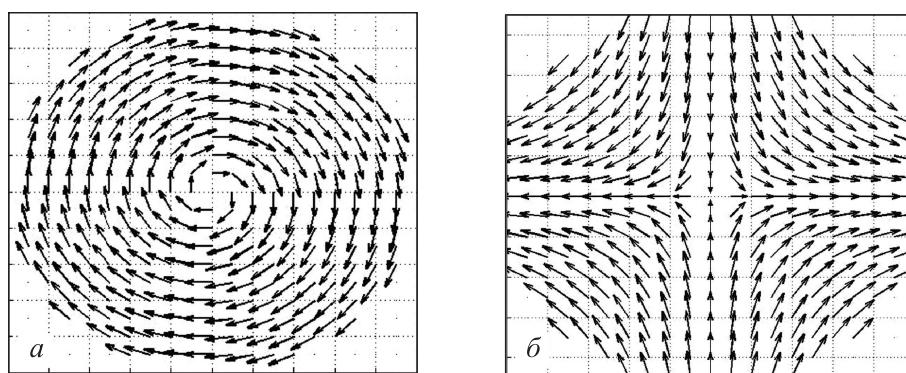


Рис. 1. Микромагнитные распределения в ферромагнитных наноточках: *а* — магнитный вихрь, *б* — магнитный антивихрь

1. Взаимодействия, определяющие микромагнитную структуру в наночастицах диэлектрика

Магнитоэлектрические материалы, будучи большей частью ферримагнетиками и слабыми ферромагнетиками, характеризуются умеренной спонтанной намагниченностью, что приводит к большим по сравнению с ферромагнетиками величинам обменной длины $l_{\text{exch}} = \sqrt{2A/M_s^2}$ и магнитостатической длины $l_{MS} = 2\sqrt{AK}/M_s^2$, где A — обменная жесткость, M_s — намагниченность насыщения, K — константа анизотропии, l_{MS} характеризует максимальный размер однодоменной частицы. Типичные величины для высокотемпературного мультиферроика феррита висмута BiFeO_3 составляют $l_{\text{exch}} = 1.5$ мкм, $l_{MS} = 240$ мкм. Таким образом, диэлектрические магнитные наночастицы должны находиться в состоянии с однородной намагниченностью, поскольку обменное взаимодействие доминирует над магнитостатическим.

Единственной силой, способной конкурировать с обменом на нанометровых масштабах, является неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие, которое для случая кубической симметрии может быть представлено в виде [13, 16]

$$F_{ME} = \gamma \cdot \mathbf{P} \cdot (\mathbf{n} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{n}) - (\mathbf{n} \cdot \nabla) \mathbf{n}), \quad (1)$$

где γ — магнитоэлектрическая константа, \mathbf{P} — электрическая поляризация, \mathbf{n} — единичный вектор магнитного параметра порядка.

Так, в мультиферроике феррите висмута конкуренция между обменным и неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействиями приводит к образованию магнитной спирали с периодом 60 нм [13].

2. Оценка критического напряжения, необходимого для зарождения вихря

Как показано в [16], вследствие наличия взаимодействия (1) конфигурация в виде магнитного вихря рождает на его оси линейную плотность электрического заряда

$$Q_L = \pm 2\pi\gamma\chi_e, \quad (2)$$

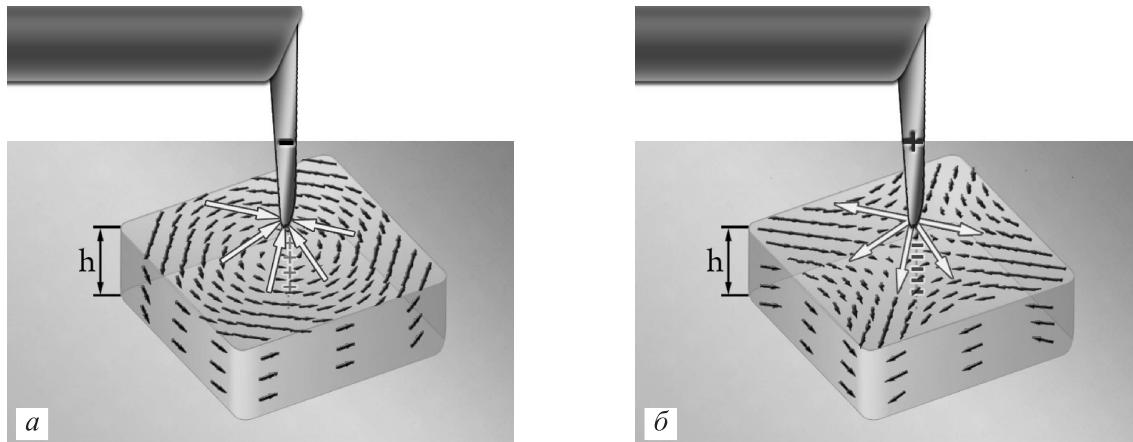


Рис. 2. Магнитная диэлектрическая наночастица под действием неоднородного электрического поля, создаваемого иглой кантileвера: а — электрически индуцированное вихревое состояние; б — электрически индуцированное антивихревое состояние. Электрическая полярность в общем случае зависит от знака магнитоэлектрической константы в (1)

где χ_e — электрическая восприимчивость среды, зна-
ки «±» соответствуют конфигурациям типа вихрь и ан-
тивихрь.

Таким образом, магнитоэлектрическая энергия мо-
жет быть представлена в форме электростатической
энергии заряда (2) в поле точечного электрода с элек-
трическим потенциалом ϕ

$$W_{ME} = q\varphi = 2\pi\gamma \cdot h \cdot \varphi, \quad (3)$$

где q — интегральный заряд, h — высота частицы.

Обменная энергия может быть оценена как

$$W_{\text{exch}} = Ak^2V = A \left(\frac{2\pi}{\Delta} \right)^2 h \Delta^2 = A(2\pi)^2 h, \quad (4)$$

где k — волновой вектор модуляции магнитного па-
раметра порядка, Δ — поперечный размер частицы.

Таким образом, критическое электрическое напря-
жение, которое нужно приложить к электроду, чтобы
зародить вихрь (антивихрь), определяется условием
 $W_{ME} + W_{\text{exch}} = 0$ и может быть найдено как

$$|\varphi_C| = \frac{2\pi A}{\gamma}. \quad (5)$$

Используя значения константы неоднородного маг-
нитоэлектрического эффекта для феррита висмута и пленок ферритов гранатов $\gamma \sim 10^{-6} \sqrt{\text{эрд}/\text{см}}$, по-
лучаем при обменной жесткости $A = 10^{-7}$ эрг/см, ха-
рактерной для диэлектриков, проявляющих магнит-
ные свойства при комнатной температуре, величину
 $\phi_c = \pm 150$ В.

Более строгий подход к расчету критического напря-
жения должен учитывать конечный размер ядра вихря
(центральной области, в которой спины выходят из
плоскости). Однако оценка (5) остается справедливой
и в этом случае при условии, что под напряжени-
ем (5) подразумевается наименьшее напряжение, при
котором на периферии частицы зарождается вихревое
состояние, под зарядом (3) — заряд, распределенный по
поверхности цилиндра, окружающего ядро вихря, а под
параметром Δ в (4) — диаметр ядра.

Заключение

Таким образом, неоднородное электрическое поле может порождать распределение намагниченности, соответствующее, в зависимости от полярности напряжения на электроде, вихрю или антивихрю (рис. 2). Эта возможность помимо фундаментальной значимости представляет интерес как прототип электрически переключаемой магнитной системы с двумя логическими состояниями.

Авторы выражают благодарность профессорам А. К. Звездину, Д. И. Хомскому и М. В. Мостовому за интерес к работе и ценные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-02-01068-а).

Список литературы

1. *Guslienko K.Yu.* // J. Nanosc. Nanotechn. 2008. **8**. P. 2745.
2. *Pribiag V.S., Krivorotov I.N., Fuchs G.D.* et al. // Nature Physics. 2007. **3**. P. 498.
3. *Waeyenberge B. Van, Puzic A., Stoll H.* et al. // Nature. 2006. **444**. P. 461.
4. *Tanase M., Petford-Long A.K., Heinonen O.J.* et al. // Phys. Rev. B. 2009. **79**. P. 014436.
5. *Prosandeev S., Ponomareva I., Kornev I., Bellaiche L.* // Phys. Rev. Lett. 2008 **100**. P. 047201.
6. *Yamada K., Kasai Sh., Nakatani Y.* // Nat. Mater. 2007. **6**, N 4. P. 270.
7. *Shigeto K., Okuno T., Mibu K.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. **80**. P. 4190.
8. *Mironov V.L., Ermolaeva O.L., Gusev S.A.* et al. // Phys. Rev. B. 2010. **81**. P. 094436.
9. *Звездин А.К., Попков А.Ф., Четкин М.В.* // УФН. 1992. **162**. С. 151.
10. *Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б., Борищевский О.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. **85**. С. 232.
11. *Логгинов А.С., Николаев А.В., Онищук В.Н.* // Письма в ЖЭТФ 1997. **66**. С. 398.
12. *Барыахтар В.Г., Львов В.А., Яблонский Д.А.* // Письма в ЖЭТФ. 1983. **37**. С. 565.
13. *Попов Ю.Ф., Звездин А.К., Воробьев Г.П.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1993. **57**. С. 65.
14. *Sparavigna A., Strigazzi A., Zvezdin A.* // Phys. Rev. B 1994. **50**. P. 2953.
15. *Khalfina A.A., Shamtsutdinov M.A.* // Ferroelectrics. 2002. **279**. P. 19.
16. *Mostovoy M.* // Phys. Rev. Lett. 2006. **96**. P. 067601.
17. *Logginov A.S., Meshkov G.A., Nikolaev A.V.* et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2007. **310**. P. 2569.
18. *Dzyaloshinskii I.* // EPL. 2008. **83**. P. 67001.
19. *Mills D., Dzyaloshinskii I.E.* // Phys. Rev. B. 2008. **78**. P. 184422.
20. *Звездин А.К., Мухин А.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2009. **89**. P. 385.
21. *Звездин А.К., Пятаков А.П.* // УФН, 2009. **179**, № 8. P. 419.
22. *Cheong S.-W., Mostovoy M.* // Nature Materials. 2007. **6**. P. 13.
23. *Logginov A.S., Meshkov G.A., Nikolaev A.V.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. **93**. P. 182510.

On the possibility of vortex and antivortex nucleation in magnetic dielectrics

A. P. Pyatakov^a, G. A. Meshkov, A. S. Logginov

*Department of Oscillation Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^a*pyatakov@physics.msu.ru.*

The micromagnetic distribution in magnetic dielectric nanoparticle is considered theoretically. It is shown that the existence of inhomogeneous magnetoelectric interaction in magnetic dielectrics provides the possibility to stabilize the vortex and antivortex state in magnetic nanoparticle by electric field. The critical voltage necessary for nucleation of magnetic vortex/antivortex state is estimated for room temperature multiferroics bismuth ferrite ~ 100 V.

Keywords: inhomogeneous magnetoelectric interaction, multiferroics, magnetic antivortex, magnetic nanodots.
PACS: 75.85.+t.

Received 26 January 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

Сведения об авторах

1. Пятаков Александр Павлович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-41-38, e-mail: pyatakov@physics.msu.ru.
2. Мешков Георгий Александрович — аспирант; тел.: (495) 939-41-38, e-mail: georgy.meshkov@gmail.com.
3. Логгинов Александр Сергеевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-11-52, e-mail: aslogginov@phys.msu.ru.