

О возможности наблюдения эффектов хиральной симметрии в ферромагнитных наночастицах

© С.Н. Вдовичев, Б.А. Грибков, С.А. Гусев, В.Л. Миронов, Д.С. Никитушкин, А.А. Фраерман, В.Б. Шевцов

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: gusev@ipm.sci-nnov.ru

(Поступила в Редакцию 27 декабря 2005 г.)

Экспериментально исследована статистика „левых“ и „правых“ вихревых состояний намагниченности в системе субмикронных ферромагнитных дисков. Решетки из эллиптических частиц кобальта с планарным размером 750×450 nm и толщиной 25 nm были сформированы с помощью высокоразрешающей электронной литографии. Для визуализации распределений намагниченности в дисках использован метод магнитно-силовой микроскопии. Проведенные измерения свидетельствуют о сохранении магнитной хиральной симметрии в ферромагнитных частицах кобальта данного размера и формы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-02-16827), INTAS (гранты N 03-51-6426, 03-51-4778) и МНТЦ (грант № 2976).

PACS: 75.50.Tt, 75.50.-y.

1. Введение

Ферромагнитные частицы, размеры которых сопоставимы с характерными магнитными масштабами (толщина доменной стенки, обменная магнитная длина), стали в последнее время все чаще находить применение в различных технических устройствах. Например, наноразмерные ферромагнитные частицы могут использоваться в качестве основного элемента таких приборов, как магниторезистивная память или магниторезистивные сенсоры [1,2]. Двумерные системы таких частиц можно применять для управления транспортными свойствами сверхпроводящих устройств: джозефсоновских контактов и сверхпроводящих пленок [3–5]. Одним из главных стимулов большой доли исследований служит реальная возможность использования двумерных массивов наночастиц в качестве среды для сверхплотной магнитной записи [6]. Однако помимо практических приложений ферромагнитные наночастицы могут представлять и фундаментальный интерес с точки зрения изучения магнитных свойств низкоразмерных систем (наноструктур) [7–9]. Одно из возможных направлений таких работ — исследование особенностей у состояний с неоднородным распределением намагниченности.

Известно, что в ферромагнитных дисках, радиус и толщина которых больше некоторого критического значения (для переходных металлов ~ 20 nm), основному состоянию соответствует вихревое распределение намагниченности [10]. Данное состояние можно охарактеризовать двумя топологическими зарядами: знаком завихренности намагниченности (влево или вправо, по или против часовой стрелки, рис. 1) и направлением поляризации кора вихря (перпендикулярной составляющей намагниченности в центре частицы). В обменном приближении магнитный вихрь является четырехкратным вырожденным, т. е. все возможные конфигурации с раз-

личными направлениями завихренности и направлениями кора вихря энергетически эквивалентны. Про такие системы говорят, что они обладают хиральной магнитной симметрией. Однако, как было показано И.Е. Дзялошинским [11] и Т. Moriya [12], в некоторых низкосимметричных кристаллах из-за спин-орбитального взаимодействия хиральная симметрия может нарушаться, что, например, приводит к формированию магнитных геликоидальных сверхструктур. Феноменологически это взаимодействие учитывается добавлением в разложение свободной энергии магнетика инвариантов Лифшица, т. е. слагаемых вида $J(\mathbf{M} \text{rot } \mathbf{M})$ [13], где J — константа

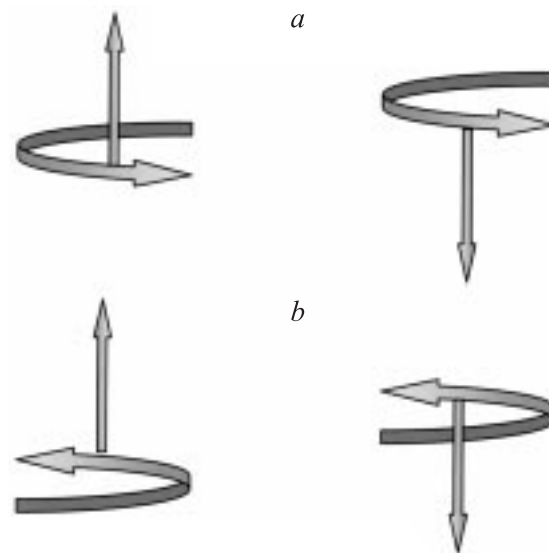


Рис. 1. Схематичное изображение возможных конфигураций для вихревого распределения намагниченности в ферромагнитном диске: „правый“ (a) и „левый“ вихрь (b). Знак направления намагниченности кора „вверх“ или „вниз“ определен по отношению к подложке.

взаимодействия, а \mathbf{M} — вектор намагниченности; и в объемных кристаллах, решетка которых обладает центром инверсии, оно запрещено. Однако в ограниченных образцах — наноструктурах — этот запрет может сниматься [14], и, если взаимодействие Дзялошинского в системе есть, оно может быть обнаружено. Существование у ферромагнитных наночастиц вихревых магнитных состояний позволяет использовать их в качестве объекта для изучения эффектов хиральной симметрии в наносистемах. В случае отсутствия корреляции между знаком завихренности и направлением намагниченности кора вихря можно говорить о сохранении хиральной магнитной симметрии в таких частицах, в противном случае — о ее нарушении. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию подобных эффектов в ферромагнитных нанодисках, распределение намагниченности которых представляет собой одиночный конусный вихрь.

2. Эксперимент

Направление намагниченности в сердцевине вихря можно задавать предварительным намагничиванием образца (до насыщения) во внешнем поле, приложенном в направлении, перпендикулярном плоскости диска. Тогда экспериментальная задача сводится к определению знака завихренности и подсчету числа левых и правых вихревых распределений, возникающих при снятии внешнего магнитного поля. Для визуализации распределений намагниченности в частицах можно использовать метод магнитно-силовой микроскопии (МСМ).

В наших экспериментах исследовались квадратные решетки овальных кобальтовых дисков, размером $750 \times 450 \text{ nm}$ и толщиной 25 nm (рис. 2), имеющих форму, близкую к эллиптической. Период решетки составлял примерно 1500 nm . Частицы изготавливались методом высокоразрешающей электронной литографии [15] на кремниевых подложках, покрытых слоем SiO_2 толщиной 50 nm . Способ формирования частиц, их размеры и форма выбирались из следующих соображений. Во-первых, как показывают предварительные исследования с помощью микромагнитного моделирования [16] и наши измерения МСМ [3], основное состояние намагниченности частиц с таким форм-фактором и размером соответствует одновихревому. Однородно намагниченное состояние (вдоль длинной оси) в таких дисках может существовать в нулевом внешнем поле, но оно является метастабильным, и при используемой в данных экспериментах геометрии предварительного намагничивания это состояние практически никогда не возникало.

Во-вторых, эллиптическая форма частиц позволяет определять знак завихренности в одновихревом состоянии при помощи метода МСМ [17,18]. Контраст на МСМ-изображении эллиптической частицы с вихревым распределением намагниченности (рис. 3) аналогичен изображению магнитного квадруполь. По расположению

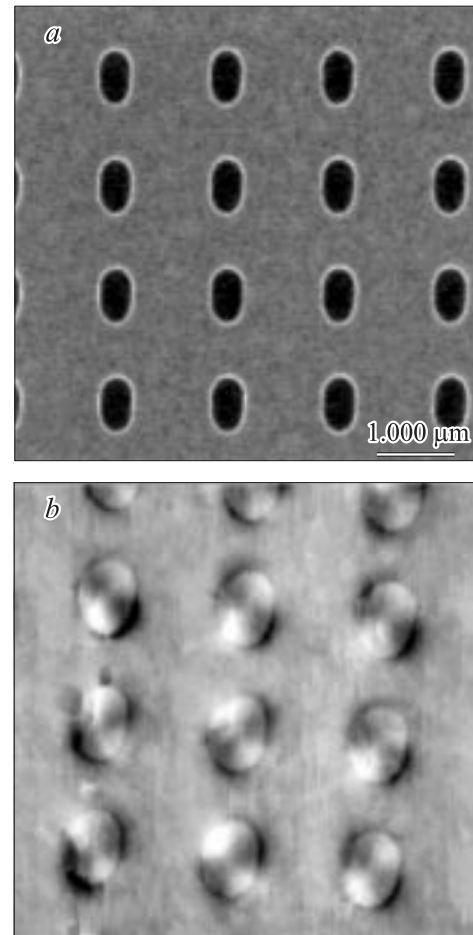


Рис. 2. Экспериментальные изображения участка решетки Сок дисков: *a*) микрофотография, полученная в режиме вторичных электронов в сканирующем электронном микроскопе (*a*); магнитно-силовое изображение (*b*).

белых и черных сегментов МСМ-изображения вихря направление завихренности можно определить однозначно.

В-третьих, довольно существенным фактором оказалась необходимость формирования геометрически симметричных дисков. Численное моделирование, которое было проведено авторами работы [19], показывает, что даже очень небольшое нарушение симметрии формы частицы может влиять на направление завихренности одновихревого состояния при снятии внешнего поля. Более того, экспериментально было показано [20], что можно эффективно управлять знаком вихря, если поле предварительного намагничивания имеет компоненту в плоскости ассиметричного ферромагнитного диска. По этой причине для изготовления частиц была использована оригинальная методика электронно-лучевой литографии [15,21], разрешающая способность которой имеет в настоящее время одно из наилучших значений, что обеспечивает создание большого количества идентичных магнитных нанодисков с латеральным размером от 20 nm . Кроме этого, перед основными экспериментами системы ферромагнитных дисков проходили

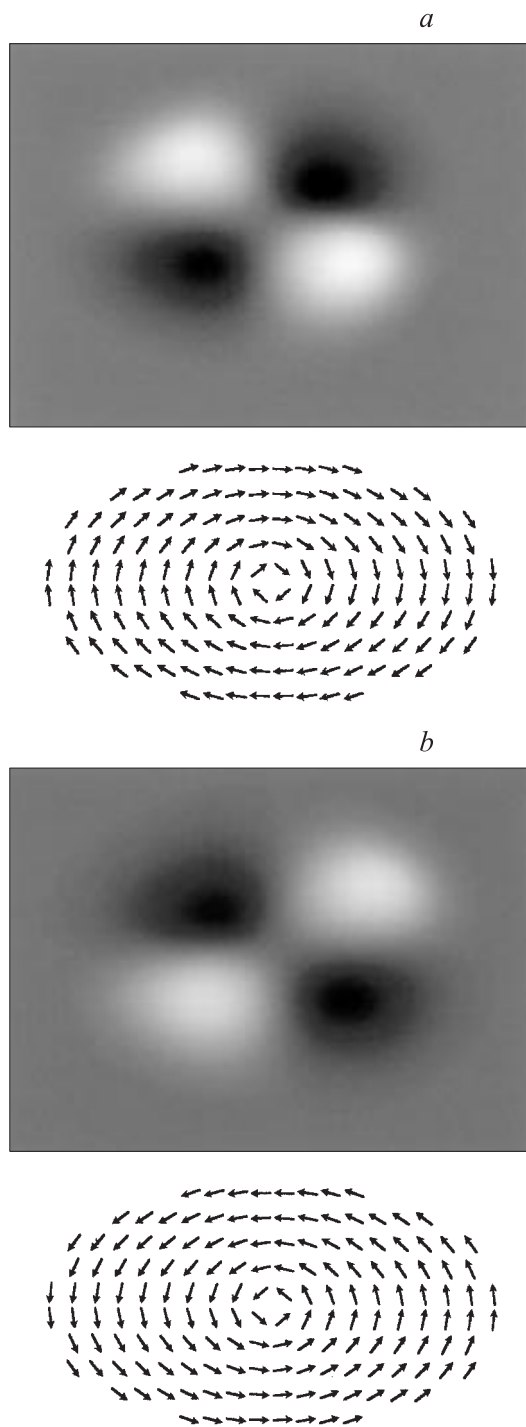


Рис. 3. Смоделированные магнитно-силовые изображения и соответствующие им распределения намагниченности для ферромагнитных дисков с „левым“ (а) и „правым“ (b) вихревыми состояниями.

дополнительный контроль и отбор. Было изготовлено несколько одинаковых решеток частиц по 256 штук (16×16) в каждой. Из них были отбракованы диски, имеющие видимые геометрические дефекты или асимметричную форму, что контролировалось с помощью методов сканирующей электронной и атомно-силовой

микроскопии (АСМ). Системы магнитных частиц, содержащие большое количество дефектных дисков, не использовались в основном эксперименте, а в прошедших эту первую ступень отбора решетках фиксировались координаты отбракованных частиц. Для дополнительной проверки качества формы отобранных частиц были проведены МСМ-исследования остаточных состояний нанодисков после намагничивания их вдоль различных направлений в плоскости образца. Направление поля при намагничивании было выбрано параллельно длинной оси частиц в первой серии предварительных экспериментов и параллельно короткой оси во второй. После намагничивания наночастиц вдоль длинной оси до насыщения и уменьшения внешнего поля до нуля количество образовавшихся „левых“ и „правых“ вихрей было примерно одинаково (50/50%). Такая же статистика сохранялась и при исследовании остаточных состояний после намагничивания вдоль короткой оси. Следует также отметить, что смена направления поля при намагничивании на противоположное не влияло на получаемый результат. Таким образом, был сделан вывод о том, что возможные дефекты формы частиц, которые не удастся визуализировать, несущественны и не будут влиять на получаемые остаточные состояния наночастиц при намагничивании по нормали к плоскости дисков в ходе основного эксперимента. В результате всех этих процедур был отобран участок одной из решеток, который содержал 100 одинаковых частиц и участвовал в основных измерениях.

Для АСМ/МСМ-исследований изготовленных ферромагнитных наночастиц применялся комплекс сканирующих зондовых микроскопов „Solver PRO“ (NT-MDT, Зеленоград, Россия). В МСМ-экспериментах использовались кремниевые зонды, покрытые тонкой (около 30 nm) пленкой кобальта (NT-MDT, MicroMasch, Таллинн, Эстония). Предварительно зонды намагничивались вдоль оси иглы в поле 20 kOe. МСМ-эксперименты проводились в стандартной двухпроходной моде с амплитудой колебаний на втором проходе порядка 40–50 nm и „lift height“ 70–100 nm.

В ходе основных измерений для предварительного намагничивания в направлении, перпендикулярном плоскости образца, прикладывалось внешнее магнитное поле величиной 20 kOe, что превышает поле насыщения для кобальтовой пленки (~ 12 kOe), из которой формировались ферромагнитные частицы. Отклонение внешнего поля от нормали к поверхности образца не превышало 5 градусов.

3. Результаты и выводы

На экспериментальном МСМ-изображении (рис. 2, b) показано типичное остаточное состояние небольшого участка массива наночастиц. При сопоставлении их с модельными изображениями (рис. 3) хорошо видно, что распределение намагниченности в каждой частице соответствует одновихревому. Нами было проведено две

серии экспериментов, отличающихся направлением намагничивающего поля: в первой поле имело направление „вверх“ (от подложки, направление $p \uparrow$), во второй — к подложке (условно „вниз“, направление $p \downarrow$). Для увеличения размера выборки в каждой серии было проведено несколько актов намагничивания и подсчета статистики вихревых состояний. Прежде всего, было обнаружено, что примерно половина частиц изменяет направление завихренности за одиночный акт намагничивания. Следует также отметить, что корреляций в состоянии соседних частиц не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии (слабости) взаимодействия между соседними ферромагнитными дисками. Этот факт позволяет предположить, что частицы перемагничиваются независимо друг от друга, следовательно, можно статистически обрабатывать сразу весь массив частиц, не проводя эксперименты с одной частицей. Все МСМ-изображения были получены на одном и том же участке массива частиц. Таким образом, можно судить о вероятности появления „левых“ и „правых“ вихревых распределений при заданном направлении поляризации кора вихря.

Статистическая обработка полученных МСМ-изображений, проведенная в предположении о бимодальности распределения [22], дает следующие значения вероятности реализации „правых“ вихрей при различных направлениях намагничивающего поля: $p \uparrow = 0.49 \pm 0.02$, $p \downarrow = 0.51 \pm 0.03$. Соответственно для „левых“ вихрей $p \uparrow = 0.51 \pm 0.02$, $p \downarrow = 0.49 \pm 0.03$. Большая ошибка в случае $p \downarrow$ обусловлена меньшей выборкой.

Таким образом, проведенные первые эксперименты пока свидетельствуют в пользу эквивалентности разнонаправленных вихрей в ферромагнитных частицах кабальта данного размера и формы. Следует отметить, что метод исследования, использованный в настоящей работе, основан на определении заселенности состояний наночастиц с различным направлением завихренности. Предполагалось, что в случае различной энергии этих состояний их заселенность при распаде неустойчивого перпендикулярно намагниченного состояния будет различной. Поскольку предварительное намагничивание проводилось при комнатной температуре, вероятно, что из-за температурных флуктуаций, особенно сильных при больших магнитных полях, возможны переходы между состояниями с различной завихренностью. Поэтому окончательный ответ на вопрос об эквивалентности „левых“ и „правых“ вихрей в ферромагнитных наночастицах должны дать эксперименты по их намагничиванию при низких температурах.

Список литературы

- [1] S.S. Parkin, K.P. Roche, M.G. Samant, P.M. Rice, R.B. Bayers, R.E. Scheuerlein, E.J. Sullivan, S.L. Brown, J. Bucchigano, D.W. Abraham, Y. Lu, M. Rooks, P.L. Trouilloud, R.A. Wanner, W.J. Gallagher. *J. Appl. Phys.* **85**, 5828 (1999).
- [2] J.N. Chapman, R.P. Aitchison, K.J. Kirk, S.Mc Vitie, J.C. Kools, M.F. Gillies. *J. Appl. Phys.* **83**, 5321 (1998).

- [3] С.Н. Вдовичев, Б.А. Грибков, С.А. Гусев, Е. Ильичев, А.Ю. Климов, Ю.Н. Ноздрин, Г.Л. Пахомов, В.В. Штолытц, А.А. Фраерман. *Письма в ЖЭТФ* **80**, 758 (2004).
- [4] D.J. Morgan, J.B. Ketterson. *Phys. Rev. Lett.* **80**, 3614 (1998).
- [5] D.Y. Vodolazov, B.A. Gribkov, S.A. Gusev, A.Yu. Klimov, Yu.N. Nozdrin, V.V. Rogov, S.N. Vdovichev. *Phys. Rev. B* **72**, 064 509 (2005).
- [6] N. Weiss, T. Cren, M. Epple, S. Rusponi, G. Baudot, S. Rohart, A. Tejada, V. Repain, S. Rousset, P. Ohresser, F. Scheurer, P. Bencok, H. Brune. *Phys. Rev. Lett.* **95**, 157 204 (2005).
- [7] A.A. Fraerman, S.A. Gusev, I.R. Karetnikova, L.A. Mazo, I.M. Nefedov, Yu.N. Nozdrin, M.V. Sapozhnikov, I.A. Shereshevsky, L.A. Suhodoev. *Phys. Rev. B* **65**, 64 424 (2002).
- [8] J.M. Vargas, W.C. Nunes, L.M. Socolovsky, M. Knobel, D. Zanchet. *Phys. Rev. B* **72**, 184 428 (2005).
- [9] G. Gubbiotti, G. Carlotti, T. Okuno, M. Grimsditch, L. Giovannini, F. Montoncello, F. Nizzoli. *Phys. Rev. B* **72**, 184 419 (2005).
- [10] R.P. Cowburn, D.K. Koltsov, A.O. Adeyeye, M.E. Welland, D.M. Ticker. *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1042 (1999).
- [11] И.Е. Дзялошинский. *ЖЭТФ* **32**, 1547 (1957).
- [12] Т. Мориya. *Phys. Rev. Lett.* **4**, 228 (1960).
- [13] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред*. Наука, М. (1982).
- [14] A.N. Bogdanov, U.K. Robler. *Phys. Rev. Lett.* **87**, 037 203 (2001).
- [15] С.Н. Вдовичев, А.Н. Господчиков, Б.А. Грибков, С.А. Гусев. Сб. тр. совещ. „Нанофизика и наноэлектроника 2005“. Нижний Новгород (2005). Т. 1. С. 171.
- [16] <http://math.nist.gov/oommf>.
- [17] A. Fernandez, C.J. Cerjan. *J. Appl. Phys.* **87**, 1395 (2000).
- [18] A.A. Fraerman, B.A. Gribkov, S.A. Gusev, V.L. Mironov, S.N. Vdovichev. Сб. тр. совещ. „SPM-2004“. Нижний Новгород (2004). С. 201.
- [19] M. Grimsditch, P. Vavassori, V. Novosad, V. Metlushko, H. Shima, Y. Otani, K. Fukamichi. *Phys. Rev. B* **65**, 172 419 (2002).
- [20] M. Schneider, H. Hoffmann, J. Zweck. *Appl. Phys. Lett.* **79**, 3113 (2001).
- [21] S.A. Gusev, L.A. Mazo, S.N. Vdovichev. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Reviews and Shot Notes to Nanomeeting-2005* (2005). P. 471.
- [22] Д. Худсон. *Статистика для физиков*. Мир, М. (1967).