

УДК 537.622.4:537.624.9

УПРАВЛЕНИЕ ХИРАЛЬНОСТЬЮ МАГНИТНЫХ ВИХРЕЙ В СИСТЕМЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ДИСК–НАНОПРОВОЛОКА

© 2024 г. Д. А. Татарский^{a, b, *}, Е. В. Скороходов^a, О. Л. Ермолаева^a,
В. Л. Миронов^a, А. А. Фраерман^a

^aИнститут физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 607680 Россия

^bНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: tatarsky@ipmras.ru

Поступила в редакцию 29.11.2023 г.

После доработки 19.01.2024 г.

Принята к публикации 19.01.2024 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований и микромагнитного моделирования магнитных состояний в одномерном массиве, представляющем собой две цепочки ферромагнитных дисков, сопряженных с ферромагнитной нанопроволокой. Цепочки дисков располагались по разные стороны от нанопроволоки. Методом лоренцевой просвечивающей электронной микроскопии исследованы *in situ* зависимости хиральности магнитных вихрей в дисках от направления магнитного поля, приложенного в плоскости образца вдоль различных направлений. Показано, что при намагничивании образца вдоль нанопроволоки в цепочках дисков, расположенных по разные стороны от нее, реализуются вихревые состояния с противоположной хиральностью. В самой нанопроволоке на границе с дисками формируется антивихрь, так как локальное направление намагниченности в проволоке и в диске антиколлинеарны. При намагничивании перпендикулярно нанопроволоке во всех дисках реализуются состояния с одинаковой хиральностью. В этом случае между дисками в нанопроволоке формируется две взаимно перпендикулярные доменные стенки, а вихрь в диске смещается к одному из краёв вдоль нанопроволоки. Такие массивы с управляемым состоянием хиральности вихрей могут найти применение для создания сфазированных массивов вихревых спин-трансферных наноосцилляторов.

Ключевые слова: магнитный вихрь, хиральность, магнитно-силовая микроскопия, лоренцева просвечивающая электронная микроскопия, численное моделирование.

DOI: 10.31857/S1028096024060089, EDN: DVGASS

ВВЕДЕНИЕ

Вихревое распределение намагниченности в ферромагнитных дисках представляет собой топологический солитон, который характеризуется двумя параметрами: полярностью ядра P (центральная часть магнитного вихря, в которой намагниченность перпендикулярна плоскости диска) и хиральностью оболочки C (периферическая область вихря, намагниченность которой лежит в плоскости диска) [1–4]. В зависимости от этих параметров магнитный вихрь может находиться в четырех различных состояниях с различными комбинациями $P = \pm 1$ и $C = \pm 1$.

В последнее время большое внимание уделяют динамике магнитных вихрей, что связано с разработкой так называемых вихревых спин-трансферных наноосцилляторов (ВСТНО) [5, 6]. В этих устройствах гиротропная мода колебаний магнитного вихря, связанная с прецессией ядра вихря вокруг состояния равновесия, используется для модуляции спин-поляризованного тока через туннельный контакт. Данные устройства являются перспективными для разработки компактных генераторов мегагерцового диапазона частот [7]. Однако для увеличения генерируемой мощности требуется создание массивов, синхронизованных по фазе вихревых спин-трансферных наноосцил-

ляторов, находящихся в одном и том же магнитном состоянии [8]. Поэтому одной из центральных задач является задача управления полярностью и хиральностью магнитных вихрей в больших массивах дисков. Для реализации состояний с одинаковой полярностью применяется процедура перемагничивания дисков в большом перпендикулярном магнитном поле. Управление же хиральностью оболочек представляет собой более трудную задачу. Одним из возможных путей ее решения является использование асимметрии формы дисков. С этой целью изготавливают массивы дисков с обрезанным краем [9–11] или другой несимметричной формы [12]. При намагничивании таких массивов дисков в продольном магнитном поле в них происходит зарождение вихрей с определенной хиральностью оболочек. Однако для применений в вихревых спин-трансферных наноосцилляторах такой способ создания одинаковых состояний не является оптимальным. Дело в том, что несимметричная форма дисков приводит к неизохронности прецессии кора вихря при высоких уровнях накачки [13]. Поэтому есть потребность управления хиральностью оболочек вихрей без существенной деформации формы дисков.

В настоящей работе мы предлагаем для управления хиральностью оболочек вихрей в дисках использовать одномерные массивы дисков, сопряженных с ферромагнитной нанопроволокой (НП). При намагничивании такой системы вдоль нанопроволоки направление оболочек зарождающихся вихрей в дисках задается намагниченностью нанопроволоки, обладающей большой анизотропией формы. В этом случае деформация вихревого состояния незначительна по сравнению с дисками с обрезанным краем.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И МИКРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Массив ферромагнитных дисков, сопряженных с нанопроволокой, изготавливали методами электронной литографии и ионного травления. В качестве подложек использовали пластины Si(100) и мембраны аморфного Si_3N_4 (толщиной 30 нм). Исходный слой пермаллоя $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (Py) толщиной 40 нм выращивали на подложках методом магнетронного осаждения. Затем на поверхность пермаллоя с помощью центрифугирования наносили слой позитивного электронного резиста полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 120 нм. Экспонирование резиста производили в растровом электронном микроскопе SUPRA 50 VP с литографической приставкой ELPHY PLUS (Carl Zeiss, Германия). В результате был сформирован массив засвеченных участков в виде

дисков (диаметром 1 мкм), расположенных в контакте с нанопроволокой (ширина 200 нм, длина 10 мкм). После этого незасвеченные участки резиста удалялись в органическом растворителе так, что на поверхности пермаллоя оставалась маска из ПММА. На финальной стадии образец подвергался травлению ионами Ag^+ до полного удаления пермаллоя на незащищенных участках пленки. Скорость травления пермаллоя составляла 4 нм/мин, скорость травления ПММА составляла 10 нм/мин. Изображение участка массива дисков, сопряженных с нанопроволокой, приведено на рис. 1.

Контроль магнитных состояний осуществляли двумя методами: с помощью магнитно-силовой микроскопии (МСМ) и лоренцевой просвечивающей электронной микроскопии (ЛПЭМ). Зондовые измерения проводили с помощью атомно-силового микроскопа SolverPro (NT-MDT Spectrum Instruments). В качестве зондового датчика использовали стандартные кантилеверы NSG-1, покрытые слоем Co толщиной 30 нм. При МСМ-измерениях регистрировали изменение фазы колебаний кантилевера под действием z -компоненты (перпендикулярно поверхности образца) градиента силы F_z , обусловленной магнитостатическим взаимодействием зонда с полем рассеяния образца [14, 15]. Применяли двухпроходную методику, в которой на первом проходе регистрировали рельеф поверхности образца, а на втором проходе – распределение изменения фазы колебаний кантилевера вдоль траектории, огибающей рельеф образца [16].

Направление хиральности магнитных вихрей в дисках исследовали методом ЛПЭМ [17] с использованием микроскопа LIBRA 200 MC (Carl Zeiss, Германия) и аналитического держателя с наклоном вокруг двух осей Gatan Double Tilt Holder. Изображения регистрировали при ускоряющем напряжении 200 кВ в режиме френелевского контраста (метод дефокусировки). В таком режиме магнитная составляющая контраста обуслов-

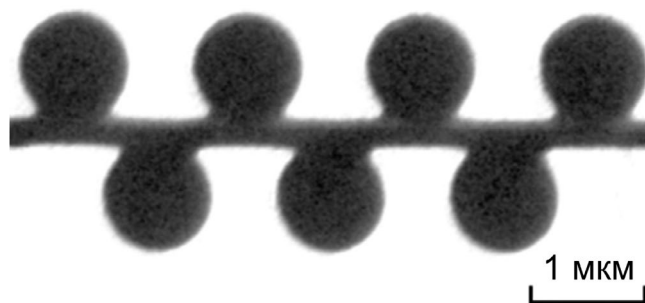


Рис. 1. ПЭМ-изображение участка массива дисков, сопряженных с нанопроволокой, полученное в режиме светлого поля.

лена z -компонентой ротора от распределения намагниченности в образце [18]. Перемагничивание образцов осуществляли за счет возбуждения поля в объективной линзе и наклона образца вокруг той или иной горизонтальной оси [19].

Моделирование магнитных состояний проводили посредством численного решения уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта с помощью программного пакета MuMax3 [20]. В расчетах использовали следующие материальные параметры пермаллоя: намагниченность насыщения $M = 800$ кА/м, обменная константа $J = 13 \times 10^{-12}$ Дж/м, константа анизотропии $K = 0$, параметр затухания $\alpha = 1$. Для расчетов использовали прямоугольную сетку размером $512 \times 512 \times 1$ узлов. Размер ячейки составлял $3.25 \times 4.20 \times 40$ нм. Шаг сетки в латеральном направлении меньше обменной длины, которая для выбранных параметров пермаллоя составляет $l_{ex} \approx 5.7$ нм. Моделирование проводили для элементарной ячейки массива (рис. 2) с периодическими граничными условиями по оси x .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментально исследовали состояния в цепочке дисков радиусом $R = 0.5$ мкм, расположенных на нанопроволоке шириной $W = 200$ нм (рис. 2). Расстояние от центра дисков до нанопроволоки равнялось радиусу, чтобы диски краем касались нанопроволоки. Диски с разных сторон от нанопроволоки были сдвинуты на расстояние $S = 0.8$ мкм. В исходном состоянии хиральность дисков в такой системе распределена случайно.

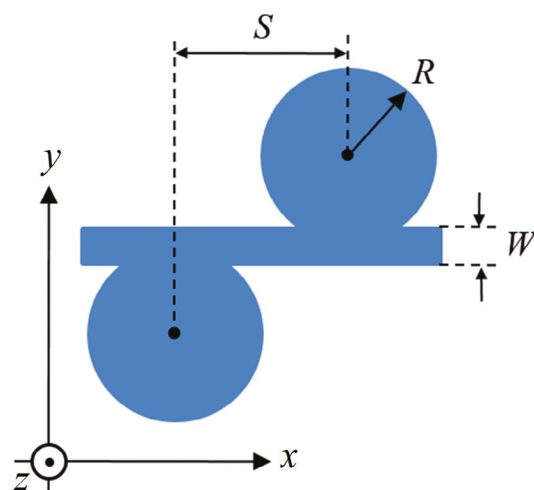


Рис. 2. Эскиз элементарной ячейки одномерного массива дисков, сопряженных с нанопроволокой.

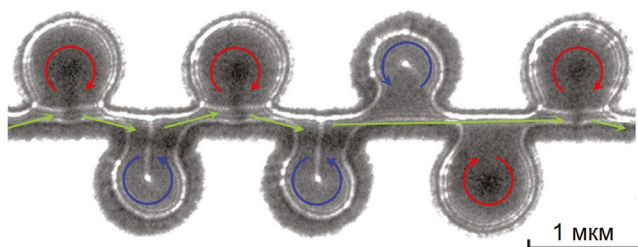


Рис. 3. ЛПЭМ-изображение участка массива дисков с нанопроволокой в исходном состоянии до намагничивания. Стрелками качественно показано распределение намагниченности.

На рис. 3 приведено ЛПЭМ-изображение массива дисков в исходном состоянии до намагничивания. Видно, что часть дисков находится в

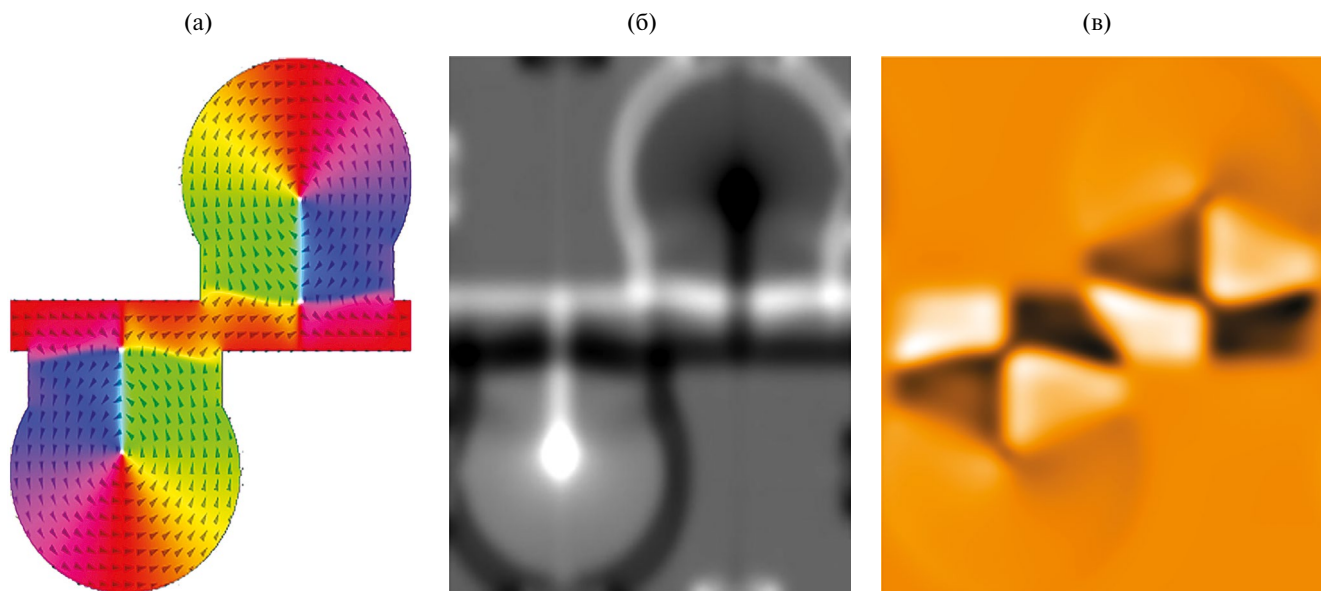


Рис. 4. Модельное распределение намагниченности (а) и соответствующие модельные распределения френелевского (б) и магнитно-силового контрастов (в) в дисках с различной хиральностью вихревых оболочек.

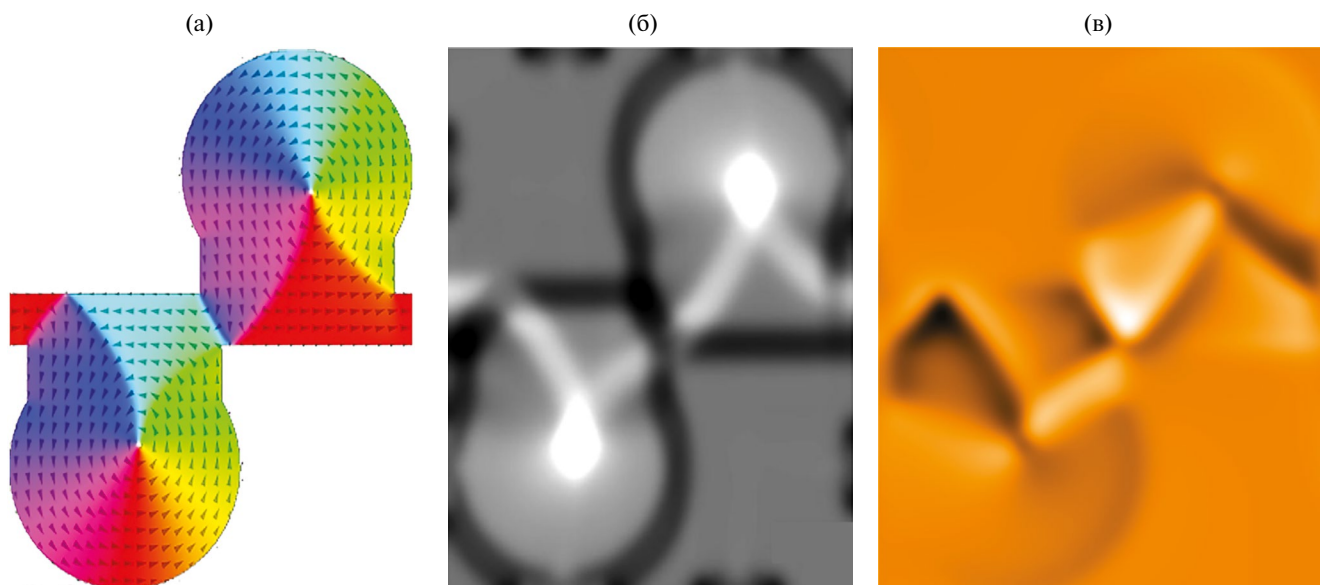


Рис. 5. Модельное распределение намагниченности (а) и соответствующие модельные распределения френелевского (б) и магнитно-силового контрастов (в) в дисках с одинаковой хиральностью вихревых оболочек.

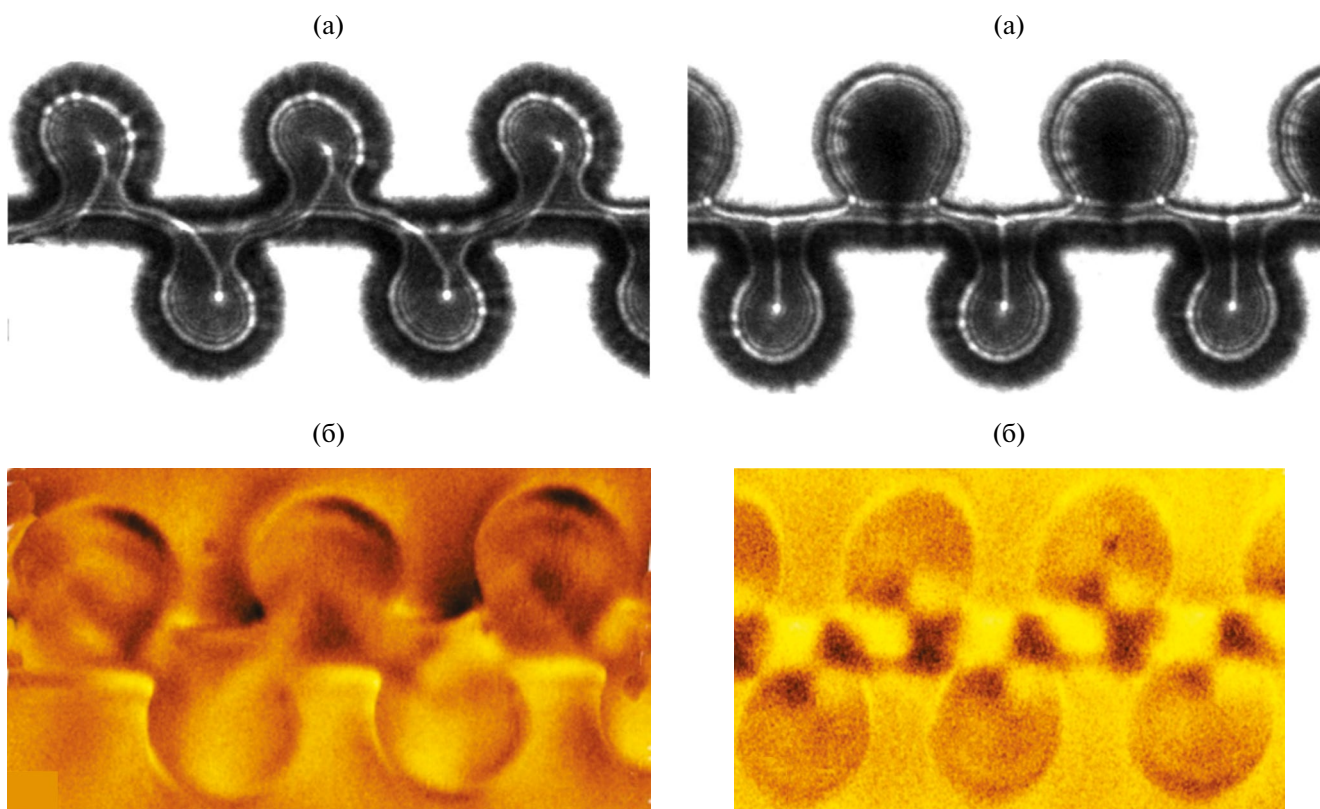


Рис. 6. ЛПЭМ- (а) и МСМ-изображения (б) участка цепочки дисков с нанопроволокой после намагничивания вдоль оси Y .

Рис. 7. ЛПЭМ- (а) и МСМ-изображения (б) участка цепочки дисков с нанопроволокой. после намагничивания вдоль оси X .

состоянии с “правой” хиральностью, в то время как другая часть — с “левой” хиральностью. На рис. 4 и 5 приведены модельные распределения

намагниченности во фрагментах массива и соответствующие модельные ЛПЭМ- и МСМ-изображения.

В эксперименте образец намагничивали полем объективной линзы просвечивающего электронного микроскопа. Поле объективной линзы направлено по нормали к образцу, вдоль оптической оси микроскопа. Для намагничивания вдоль нанопроволоки или перпендикулярно ей необходимо наклонить образец вокруг одной или другой оси в плоскости образца. Следует отметить, что, помимо компоненты внешнего магнитного поля в плоскости образца, всегда существует нормальная компонента, которая дополнительно снимает вырождение по полярности ядер вихрей. В дальнейшем будем считать, что ось x направлена вдоль проволоки, а ось y ей перпендикулярна и находится в плоскости образца (рис. 2). После намагничивания по оси y диски переходят в состояние, в котором магнитные вихри с разных сторон нанопроволоки имеют одинаковую хиральность оболочки. ЛПЭМ- и МСМ-изображения такого массива приведено на рис. 6. Распределение контраста в дисках показывает, что все вихри закручены против часовой стрелки. На МСМ-изображении (рис. 6б) виден слабый контраст в виде чуть более светлых или темных треугольников, который находится в качественном соответствии с расчетным (рис. 5в).

С другой стороны, после намагничивания по оси x диски переходят в состояние, в котором магнитные вихри с разных сторон нанопроволоки закручены в разные стороны. На границе между диском и нанопроволокой формируется “антивихрь”. ЛПЭМ- и МСМ-изображения, соответствующие этому состоянию приведены на рис. 7. Распределение МСМ контраста имеет характерный для “антивихря” вид и существенную интенсивность (рис. 4в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели экспериментальные исследования и микромагнитное моделирование магнитных состояний в одномерном массиве, состоящем из ферромагнитных дисков, сопряженных с нанопроволокой. Показано, что в данной системе хиральностью оболочек магнитных вихрей можно управлять с помощью внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости образца. При намагничивании вдоль нанопроволоки в дисках, расположенных по разные стороны от нанопроволоки, реализуются вихревые состояния с противоположной хиральностью. При намагничивании в направлении поперек нанопроволоки во всех дисках реализуются состояния с одинаковой хиральностью. Подобные системы могут быть использованы при создании массивов вихревых

спин-трансферных наноосцилляторов, находящихся в одном и том же магнитном состоянии, что важно с точки зрения фазовой синхронизации автоколебаний в таких устройствах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-12-00271). Измерения проведены на оборудовании ЦКП “Физика и технология микро- и наноструктур” (ИФМ РАН).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Usov N.A., Peschany S.E.* // J. Magn. Magn. Mater. 1994. V. 12. P. 13.
[https://www.doi.org/10.1016/0304-8853\(93\)90428-5](https://www.doi.org/10.1016/0304-8853(93)90428-5)
2. *Gusliencko K.Y., Novosad V., Otani Y., Shima H., Fukamichi K.* // Phys. Rev. B. 2001. V. 65. P. 024414.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.65.024414>
3. *Metlov K.L., Gusliencko K.Y.* // J. Magn. Magn. Mater. 2002. V. 242–245. P. 1015.
[https://www.doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)01360-9](https://www.doi.org/10.1016/S0304-8853(01)01360-9)
4. *Cowburn R.P., Koltsov D.K., Adeyeye A.O., Welland M.E., Tricker D.M.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 1042.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.1042>
5. *Pribiag V., Krivorotov I., Fuchs, G., Braganca P., Oza-tay P., Sankey J., Ralph D., Buhrman R.* // Nat. Phys. 2007. V. 3. P. 498.
<https://www.doi.org/10.1038/nphys619>
6. *Skirdkov P., Belanovsky A., Zvezdin K.A., Zvezdin A.K., Locatelli N., Grollier J., Cros V.* // SPIN. 2012. V. 2. P. 1250005.
<https://www.doi.org/10.1142/S2010324712500051>
7. *Dussaux A., Georges B., Grollier J., Cros V., Khvalkov-skiy A.V., Fukushima A., Konoto M., Kubota H., Yakushiji K., Yuasa S., Zvezdin K.A., Ando K., Fert A.* // Nat. Comms. 2010. V. 1. P. 8.
<https://www.doi.org/10.1038/nphys619>
8. *Ruotolo A., Cros V., Georges B., Dussaux A., Grollier J., Deranlot C., Guillemet R., Bouzehouane K., Fusil S., Fert A.* // Nat. Nanotech. 2009. V. 4. P. 528.
<https://www.doi.org/10.1038/nnano.2009.143>
9. *Schneider M., Hoffmann H., Zweck J.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 3113.
<https://www.doi.org/10.1063/1.1410873>
10. *Kimura T., Otani Y., Masaki H., Ishida T., Antos R., Shibata J.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 132501.
<https://www.doi.org/10.1063/1.2716861>
11. *Dumas R.K., Gredig T., Li C.-P., Schuller I.K., Liu K.* // Phys. Rev. B. 2009. V. 80. P. 014416.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.80.014416>
12. *Udalov O., Sapozhnikov M., Karashtin E., Gribkov B., Gusev S., Skorohodov E., Rogov V., Klimov A., Fraer-man A.* // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. P. 094416.
<https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.094416>

13. Татарский Д.А., Миронов В.Л., Фраерман А.А. // ЖЭТФ. 2023. Т. 163. С. 366.
<https://www.doi.org/10.31857/S0044451023030082>
14. Rugar D., Mamin H.J., Guethner P., Lambert S.E., Stern J.E., McFadyen I., Yogi T. // J. Appl. Phys. 1990. V. 68. P. 1169.
<https://www.doi.org/10.1063/1.346713>
15. Thiaville A., Miltat J., Garcia J.M. Magnetic Microscopy of Nanostructures. Berlin: Springer Verlag, 2005.
16. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004.
17. Schneider M., Hoffmann H., Zweck J. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. P. 2909.
<https://www.doi.org/10.1063/1.1320465>
18. McVitie S., Cushley M. // Ultramicroscopy. 2006. V. 106. P. 423.
<https://www.doi.org/10.1016/j.ultramic.2005.12.001>
19. Tatarskiy D.A., Gusev N.S., Gusev S.A. // Ultramicroscopy. 2023. V. 253. P. 113822.
<https://www.doi.org/10.1016/j.ultramic.2023.113822>
20. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., van Waeyenbergh B. // AIP Adv. 2014. V. 4. P. 107133.
<https://www.doi.org/10.1016/j.ultramic.2023.113822>

Chirality Control of Magnetic Vortices in Ferromagnetic Disk–Nanowire System

D. A. Tatarskiy^{1, 2, *}, E. V. Skorokhodov¹, O. L. Ermolaeva¹, V. L. Mironov¹, A. A. Fraerman¹

¹*Institute for physics of microstructures, Nizhny Novgorod, 607680 Russia*

²*Lobachevsky University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

*e-mail: tatarskiy@ipmras.ru

The results of experimental studies and micromagnetic modeling of magnetic states in a one-dimensional array are presented. The array has the form of a chain of ferromagnetic disks coupled with a ferromagnetic nanowire made of the same material. The disks are located on opposite sides of the nanowire, which makes it possible to obtain distributions when the chiralities of the magnetic vortex shells in neighboring disks alternate, which can find application in vortex spin nanooscillators. Using the application in situ of a magnetic field to an excited objective lens using Lorentz transmission electron microscopy, it is shown that in this system it is possible to control the chiralities of the shells of magnetic vortices, which is realized by magnetization in the sample plane along various azimuthal directions. When wire magnetized along a nanowire, vortex states with opposite chiralities are realized in disks located on opposite sides of it. An antivortex is formed in the nanowire itself at the boundary with the disk, since the local direction of magnetization in the wire and in the disk are antiparallel. When magnetized perpendicular to the nanowire, states with the same chirality are realized in all disks. In this case, two perpendicular domain walls are formed between the disks in the nanowire, and the vortex in the disk is shifted to one of the edges along the nanowire.

Keywords: magnetic vortex, chirality, magnetic force microscopy, Lorentz transmission electron microscopy, numerical simulation.