

01,05

Моделирование вынужденных колебаний намагниченности в системе трех ферромагнитных нанодисков

© Р.В. Горев, Е.В. Скороходов, В.Л. Миронов

Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: gorevrv@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 26 марта 2020 г.

В окончательной редакции 26 марта 2020 г.

Принята к публикации 2 апреля 2020 г.

Проведено микромагнитное моделирование ферромагнитного резонанса (ФМР) в системе, представляющей собой цилиндрический стек, состоящий из трех ферромагнитных нанодисков, в котором вследствие магнитостатического взаимодействия в равновесном состоянии реализуется геликоидальное распределение магнитных моментов. Исследованы особенности перестройки спектра ФМР и пространственной структуры резонансных мод колебаний такой системы во внешнем магнитном поле.

Ключевые слова: микромагнитное моделирование, ферромагнитный резонанс, субмикронные структуры, геликоидальное распределение.

DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49752.22H

1. Введение

В последнее время проводятся интенсивные исследования особенностей динамики намагниченности ферромагнитных наноструктур, представляющих интерес с точки зрения создания новых приборов СВЧ-электроники, таких как датчики магнитного поля, устройства хранения информации [1–3]. Наряду с системами, находящимися в однородном магнитном состоянии [4–9], большое внимание привлекают магнитные системы с неоднородным равновесным распределением намагниченности, таким как вихрь, антивихрь [10–13], скирмион [15–19]. Использование многослойных паттернированных структур дает возможность создавать трехмерные системы с неколлинеарным распределением намагниченности. В частности, недавно нами была предложена и реализована система, состоящая из трех дисков, расположенных один над другим, в которой реализуется геликоидальное распределение магнитного момента [20,21]. Для исследования неоднородных состояний широко применяются методы, основанные на микрополосковых копланарных волноводах, и магнитно-резонансная силовая микроскопия [12,22].

В настоящей работе методом микромагнитного моделирования изучаются особенности ферромагнитного резонанса в системе из трех дисков во внешнем магнитном поле. Проводится анализ перестройки спектра ФМР и модового состава резонансных колебаний при переходе данной системы между состояниями с ферромагнитным и антиферромагнитным упорядочением моментов соседних дисков, а также в состоянии с геликоидальным распределением магнитных моментов.

2. Методика расчета

Рассматриваемая система представляла собой стек сосных круглых ферромагнитных дисков диаметром 100 и толщиной 4 nm, разделенных немагнитными прослойками толщиной 4 nm. Микромагнитное моделирование магнитных состояний и вынужденных колебаний намагниченности данной системы проводилось в пакете Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) [21]. В качестве материала дисков был выбран пермаллой $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (намагниченность насыщения составляла $8 \cdot 10^5$ A/m, постоянная обменного взаимодействия $13 \cdot 10^{-12}$ J/m, параметр диссипации 0.01). В равновесном состоянии в такой системе реализуется геликоидальное распределение намагниченности, в котором углы между средними магнитными моментами соседних дисков составляют 135° (рис. 1). При приложении внешнего магнитного поля $H = 200$ Oe в данной системе реализуется состояние с антиферромагнитным упорядочением магнитных моментов, а при внешнем поле $H > 1000$ Oe состояние с ферромагнитным упорядочением магнитных моментов [23].

На первом этапе система приводилась в состояние равновесия, после чего к ней прикладывалось переменное магнитное поле величиной 1 Oe, направленное параллельно плоскости дисков и перпендикулярно намагниченности диска II, а затем регистрировалась амплитуда установившихся колебаний. Частота возбуждающего СВЧ-поля изменялась в диапазоне от 0 до 15 GHz с шагом 0.1 GHz. В качестве ФМР спектров рассчитывались частотные зависимости средней по системе амплитуды колебаний переменной составляющей намагниченности

$$\mathbf{m} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}.$$

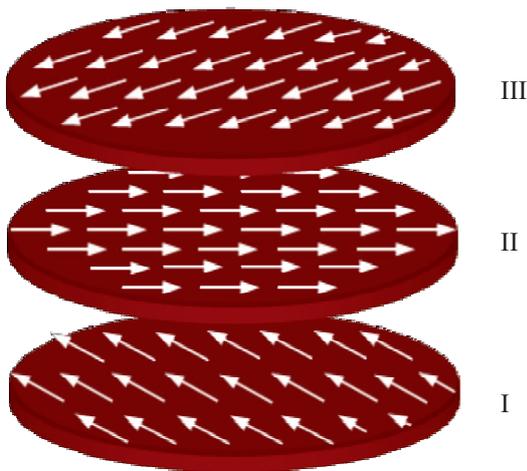


Рис. 1. Система из трех дисков с геликоидальным распределением намагниченности.

Для анализа модового состава резонансов рассчитывались пространственные распределения амплитуды колебаний всех компонент переменной составляющей намагниченности при СВЧ-накачке на резонансных частотах [19,20].

3. Результаты и обсуждение

3.1. Состояние с ферромагнитным упорядочением

При приложении внешнего магнитного поля $H > 1000$ Ое система из трех дисков переходит в состояние с ферромагнитным упорядочением магнитных моментов дисков. Спектр колебаний намагниченности системы в этом состоянии приведен на рис. 2, *a*. Спектр содержит 2 резонансных пика. Пространственные распределения амплитуды колебаний X -компоненты переменной составляющей намагниченности, соответствующие данным резонансам, приведены на рис. 2, *b*. Распределения контраста в дисках соответствуют максимуму положительного отклонения X -компоненты намагниченности, при отрицательном отклонении контраст инвертируется.

Первому резонансу (1) соответствуют краевые моды во всех трех дисках. Максимумы амплитуды колебаний намагниченности расположены на противоположных краях каждого диска (рис. 2, *b*). Все колебания являются синфазными. Резонансу (2) соответствуют спин-волновые моды с тремя полуволнами. Колебания в соседних дисках являются синфазными.

3.2. Состояние с антиферромагнитным упорядочением

При уменьшении внешнего магнитного поля до 200 Ое система переходит в состояние с антиферромагнитным упорядочением магнитных моментов дисков.

При этом моменты дисков I и III направлены вдоль поля, диска II — против поля. Спектр колебаний для данной конфигурации системы представлен на рис. 3, *a*. В спектре наблюдаются четыре заметных резонансных пика (отмечены цифрами (1)–(4)). На рис. 3, *b* представлены пространственные распределения амплитуды резонансных колебаний X -компоненты переменной составляющей намагниченности.

В этом состоянии резонанс (1) соответствует квазиоднородным колебаниям в каждом из дисков. При этом колебания в разных дисках являются синфазными (различный контраст на рисунке обусловлен тем, что для дисков I и III отклонение X -компоненты намагниченности является отрицательным, а для диска II положительным). Резонанс (2) является суперпозицией квазиоднородной моды среднего диска и краевых мод крайних дисков. Внутри дисков I и III разность фаз между колебаниями намагниченности вблизи противоположных краев составляет 90° . Разность фаз между

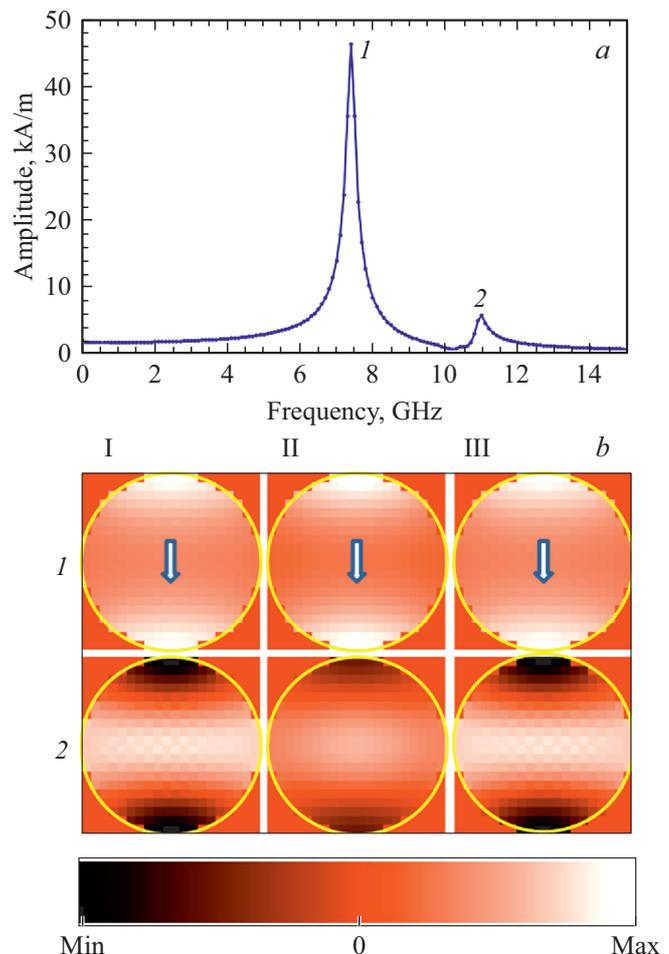


Рис. 2. (а) — Спектр колебаний намагниченности системы в состоянии с ферромагнитным упорядочением магнитных моментов. (б) — Нормированные пространственные распределения амплитуды колебаний X -компоненты переменной составляющей намагниченности, соответствующие резонансам (1) и (2). Римскими цифрами обозначены номера дисков (рис. 1). Стрелками указаны направления магнитных моментов дисков.

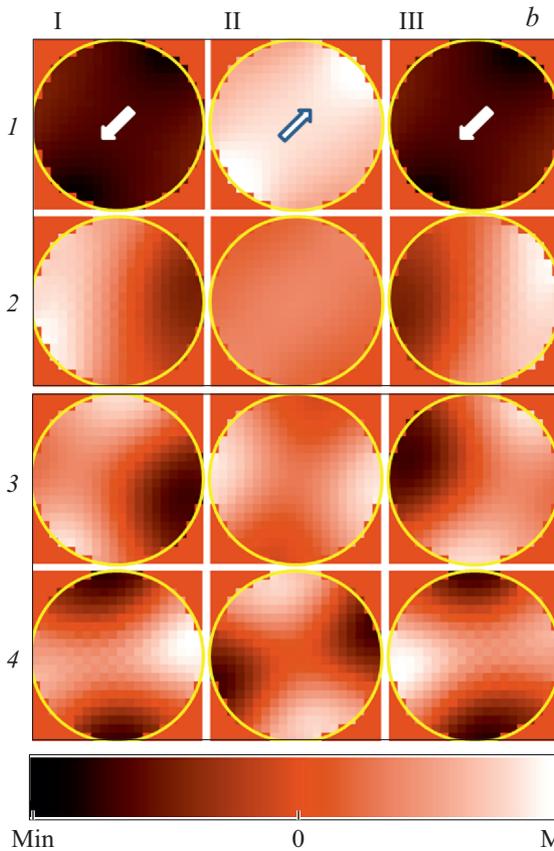
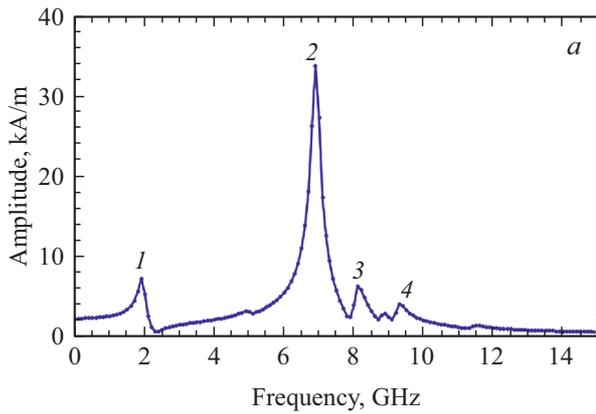


Рис. 3. (a) — Спектр колебаний намагниченности системы в состоянии с антиферромагнитным упорядочением моментов соседних дисков. (b) — Пространственные распределения амплитуды резонансных колебаний X-компоненты переменной составляющей намагниченности. Стрелками указаны направления магнитных моментов дисков.

колебаниями в первом и третьем диске составляет 180° . В свою очередь, разность фаз между колебаниями в центральном и в крайних дисках составляет 90° .

Резонанс (3) обусловлен краевыми модами во всех дисках. В дисках I и III локализованные вблизи краев колебания находятся в противофазе, а в центральном диске (II) в фазе. Резонанс (4) соответствует неоднородными колебаниям во всех дисках, при которых максимумы и минимумы колебаний расположены вблизи края

диска в области перпендикулярных диаметров. Направления, в которых происходит локализация колебаний, определяется ориентацией намагниченности в каждом из дисков. Разность фаз между колебаниями на противоположных краях диска составляет 0° , а между областями перпендикулярных диаметров составляет 180° .

3.3. Геликоидальное состояние

Спектр колебаний намагниченности системы в геликоидальном состоянии (внешнее поле отсутствует)

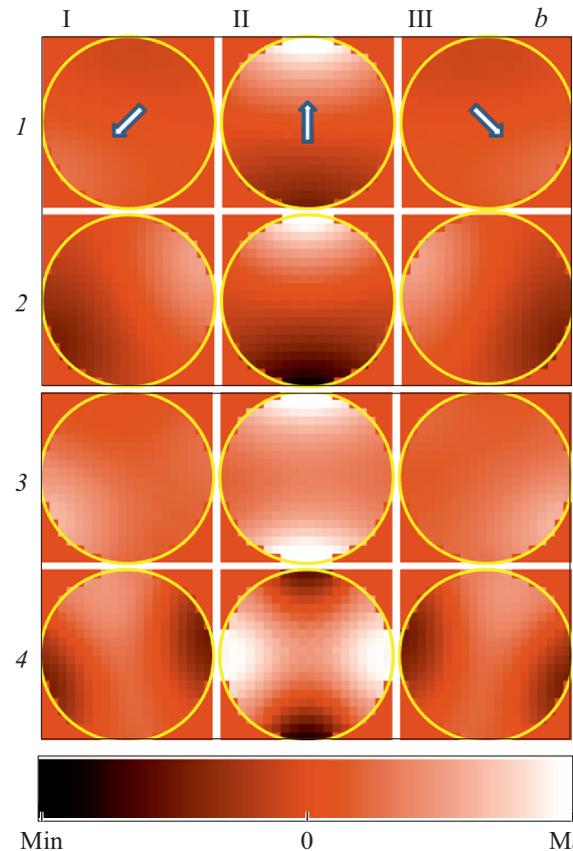
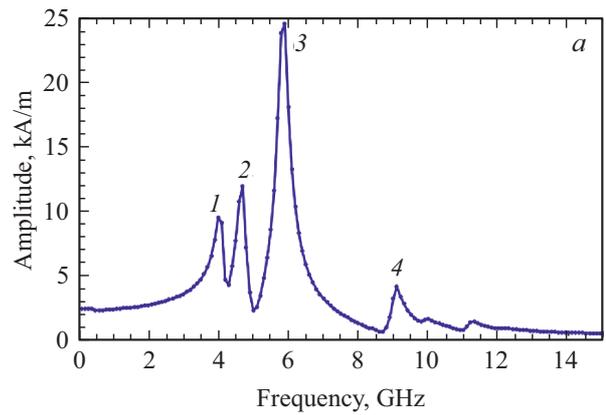


Рис. 4. (a) — Спектр колебаний намагниченности системы в геликоидальном состоянии. (b) — Пространственные распределения амплитуды колебаний X-компоненты переменной составляющей намагниченности. Стрелками указаны направления магнитных моментов дисков.

приведен на рис. 4, *a*. Спектр содержит 4 интенсивных резонансных пика. Пространственные распределения амплитуды колебаний X -компоненты переменной составляющей намагниченности, соответствующие данным резонансам, приведены на рис. 4, *b*.

Как видно из рис. 4, *b*, в резонанс (1) в основном дают вклад колебания намагниченности только центрального диска, которые представляют собой краевую моду. Колебания намагниченности локализованы на противоположных краях диска и имеют разность фаз 90° . Резонанс (2) соответствует суперпозиции краевых мод каждого диска. Разность фаз между колебаниями на противоположных краях дисков составляет также 90° . Резонанс (3) имеет более сложную структуру. Намагниченности I и III дисков колеблются в фазе, а колебания намагниченности диска II сдвинуты по фазе на 90° . Между колебаниями намагниченности у разных краев внутри I и III дисков есть разность фаз 90° , а у диска II разность фаз между колебаниями отсутствует. Резонанс (4) представляет собой неоднородные колебания, при которых максимумы и минимумы расположены на противоположных диаметрах. Направления, в которых происходит локализация колебаний, определяются направлением намагниченности в каждом из дисков.

Разность фаз между колебаниями намагниченности у противоположных краев диска составляет 0° или 180° . Заметим, что амплитуда колебаний намагниченности в среднем диске (II) больше, чем в крайних дисках I и III. Это связано с тем, что во втором диске более эффективно возбуждаются магнитные колебания из-за ортогональности магнитного момента диска и магнитного СВЧ-поля накачки.

4. Заключение

Таким образом, представлены результаты численного моделирования вынужденных колебаний намагниченности в системе с сильным магнитостатическим взаимодействием, состоящей из трех ферромагнитных нанодисков, разделенных немагнитной прослойкой. Показано, что характер резонансных колебаний данной системы зависит от внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости дисков. При намагничивании в сильном магнитном поле в системе реализуется ферромагнитное упорядочение магнитных моментов дисков и в спектре наблюдаются два резонанса, соответствующие колебаниям намагниченности, локализованным вблизи краев дисков. При уменьшении поля система переходит вначале в состояние с антиферромагнитным упорядочением магнитных моментов, а затем в состояние с геликоидальным распределением магнитных моментов, при этом происходит расщепление спектра ФМР и наблюдается формирование четырех резонансных мод коллективных колебаний намагниченности системы, что может быть изучено методами магнитно-резонансной силовой микроскопии.

Финансирование работы

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (проект № 18-02-00247) и в рамках государственного задания (контракт № 0035-2019-0022-C-01).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Nanomagnetism: Applications and Perspectives / Ed. C. Fermon, M. Van de Voorde. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim, Germany (2017).
- [2] B. Pigeau, G. de Loubens, O. Klein, A. Riegler, F. Lochner, G. Schmidt, L.W. Molenkamp, V.S. Tiberkevich, A.N. Slavin. *Appl. Phys. Lett.* **96**, 132506 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3373833>
- [3] P.M. Braganca, B.A. Gurney, B.A. Wilson, J.A. Katine, S. Maat, J.R. Childress. *Nanotechnology* **21**, 235202 (2010). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/23/235202>
- [4] L. Giovannini, F. Montoncello, F. Nizzoli, G. Gubbiotti, G. Carlotti, T. Okuno, T. Shinjo, M. Grimsditch. *Phys. Rev. B* **70**, 172404 (2004). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.172404>
- [5] G. Gubbiotti, G. Carlotti, T. Okuno, M. Grimsditch, L. Giovannini, F. Montoncello, F. Nizzoli. *Phys. Rev. B* **72**, 184419 (2005). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.184419>
- [6] I. Neudecker, K. Perzlmaier, F. Hoffmann, G. Woltersdorf, M. Buess, D. Weiss, C.H. Back. *Phys. Rev. B* **73**, 134426 (2006). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.134426>
- [7] F. Montoncello, L. Giovannini, F. Nizzoli, P. Vavassori, M. Grimsditch, T. Ono, G. Gubbiotti, S. Tacchi, G. Carlotti. *Phys. Rev. B* **76**, 024426 (2007). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.024426>
- [8] V.V. Naletov, G. de Loubens, G. Albuquerque, S. Borlenghi, V. Cros, G. Faini, J. Grollier, H. Hurdequint, N. Locatelli, B. Pigeau, A.N. Slavin, V.S. Tiberkevich, C. Ulysse, T. Valet, O. Klein. *Phys. Rev. B* **84**, 224423 (2011). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.224423>
- [9] V. Castel, J. Ben Youssef, F. Boust, R. Weil, B. Pigeau, G. de Loubens, V.V. Naletov, O. Klein, N. Vukadinovic. *Phys. Rev. B* **85**, 184419 (2012).
- [10] P.В. Горев, В.Л. Миронов, Е.В. Скороходов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* **3**, 37 (2016). DOI: 10.7868/S0207352816030082
- [11] P.В. Горев, В.Л. Миронов. *ФТТ* **59**, *11*, 2154 (2017). DOI: 10.21883/FTT.2017.11.45053.10k
- [12] A. Volodin, C. Van Haesendonck, E.V. Skorokhodov, R.V. Gorev, V.L. Mironov. *Appl. Phys. Lett.* **113**, 122407 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5040072>
- [13] R. Dutra, D.E. Gonzalez-Chavez, T.L. Marcondes, R.L. Sommer, S.O. Parreiras, M.D. Martins. *Phys. Rev. B* **99**, 014413 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.014413>
- [14] R.P. Cowburn, D.K. Koltsov, A.O. Adeyeye, M.E. Welland, D.M. Tricker. *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1042 (1999). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.1042>

- [15] V.L. Mironov, O.L. Ermolaeva, S.A. Gusev, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, B.A. Gribkov, O.G. Udalov, A.A. Fraerman, R. Marsh, C. Checkley, R. Shaikhaidarov, V.T. Petrashov. *Phys. Rev. B* **81**, 094436 (2010).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.094436>
- [16] X.Z. Yu, Y. Onose, N. Kanazawa, J.H. Park, J.H. Han, Y. Matsui, N. Nagaosa, Y. Tokura. *Nature* **465**, 901 (2010).
DOI: 10.1038/nature09124
- [17] S. Mühlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, P. Böni. *Science* **323**, 915 (2009).
DOI: 10.1126/science.1166767
- [18] М.В. Сапожников, О.В. Ермолаева, Е.В. Скороходов, Н.С. Гусев, М.Н. Дроздов. *Письма в ЖЭТФ* **107**, 378 (2018). <https://doi.org/10.7868/S0370274X18060073>
- [19] A.A. Fraerman, B.A. Gribkov, S.A. Gusev, A.Yu. Klimov, V.L. Mironov, D.S. Nikitushkin, V.V. Rogov, S.N. Vdovichev, B. Hjorvarsson, H. Zabel. *JAP* **103**, 073916 (2008).
<https://doi.org/10.1063/1.2903136>
- [20] M.J. Donahue, D.G. Porter. Interagency Report No. NISTIR 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- [21] E.V. Skorohodov, R.V. Gorev, R.R. Yakubov, E.S. Demidov, Yu.V. Khivintsev, Yu.A. Filimonov, V.L. Mironov. *J. Magn. Mater.* **424**, 118 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.024>
- [22] П.Д. Ким, В.А. Орлов, В.С. Прокопенко, С.С. Замай, В.Я. Принц, Р.Ю. Руденко, Т.В. Руденко. *ФТТ* **57**, 29 (2015).
- [23] С.Н. Вдовичев, Б.А. Грибков, А.Ю. Климов, В.Л. Миронов, И.М. Нефедов, В.В. Рогов, А.А. Фраерман, И.А. Шерешевский, С.А. Гусев. *Письма в ЖЭТФ* **94**, 418 (2011).
<https://doi.org/10.1134%2FS0021364011170164>

Редактор Ю.Э. Китаев