

05,01

Ферромагнитный резонанс в квадратных решетках планарных магнитных элементов крестообразной формы

© Р.В. Горев, М.В. Сапожников, В.Л. Миронов

Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: GorevRV@ipmras.ru

Методами микромагнитного моделирования исследован ферромагнитный резонанс (ФМР) в планарных тонкопленочных структурах, состоящих из магнитных элементов крестообразной формы, упорядоченных в квадратные решетки. Рассчитаны спектры ФМР и пространственные распределения амплитуд резонансных колебаний для случаев вихревого и антивихревого состояний намагниченности в перекрестьях решетки. Резонансные моды имеют форму вращающихся распределений намагниченности. При этом моды, имеющие одинаковые конфигурации намагниченности, но вращающиеся в противоположных направлениях, расщеплены по частоте. Наблюдаемая невязимость распространения резонансных спиновых осцилляций определяется знаком завихренности распределения намагниченности.

Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-12-10254).

DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46660.23NN

1. Введение

Искусственное паттернирование ферромагнитных тонкопленочных образцов методами электронной литографии открывает широкие возможности для создания наноструктур с неоднородным распределением намагниченности [1–4]. Такие структуры представляют как фундаментальный интерес с точки зрения исследований особенностей спин-зависимого электронного транспорта и распространения спиновых волн, так и прикладной интерес, обусловленный возможностями разработки на их основе систем хранения информации, элементов магнитной логики и планарной СВЧ-нанoeлектроники [5–7]. Особый интерес вызывают распределения намагниченности в виде магнитных вихрей и антивихрей в силу их необычных топологических свойств [1–3,8]. Данные распределения характеризуются параметрами завихренности n и спиральности γ [8]. Завихренность определяется направлением вращения вектора намагниченности при обходе по замкнутому контуру вокруг кора и равна $+1$ для вихря и -1 для антивихря. Спиральность связана с углом между радиус-вектором, проведенным из кора, и направлением намагниченности [8]. Вихревые и антивихревые распределения намагниченности экспериментально реализуются в ферромагнитных структурах крестообразной формы [1–3].

Настоящая работа посвящена исследованию спектров ФМР и модового состава спин-волновых резонансов в квадратных решетках, состоящих из элементов крестообразной формы с вихревым и антивихревым состояниями намагниченности.

2. Методика расчетов

Микромагнитное моделирование проводилось на основе численного решения уравнения Ландау–Лифшица–

Гильберта для намагниченности образца с использованием программного пакета Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) [9]. Размеры одного крестообразного элемента решетки составляли $500 \times 500 \times 30$ nm. Ширина плеча креста составляла 100 nm. В расчетах использовались материальные параметры, соответствующие пермаллою ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$): намагниченность насыщения $8 \cdot 10^5$ A/m, постоянная обменного взаимодействия $8.4 \cdot 10^{-12}$ J/m. Выбор материала обусловлен тем, что пермаллой является одним из основных материалов для металлических СВЧ-устройств, так как имеет достаточно малый коэффициент затухания колебаний намагниченности ($\alpha = 0.01$ [10]).

Минимальная моделируемая область образца имела размеры $1 \times 1 \mu\text{m}$ и объединяла в себе 4 крестообразных элемента (рис. 1). Для моделирования решетки элементов применялись периодические граничные условия для минимальной области. Такой выбор области позволяет моделировать распределения намагниченности с периодом, превышающим геометрический период решетки вихрей и антивихрей с чередующейся спиральностью. Размер ячейки численной сетки составлял $5 \times 5 \times 30$ nm. Высота ячейки выбрана таким образом, поскольку в данной работе не обсуждаются волны, распространяющиеся вдоль толщины элементов.

Процедура численного эксперимента заключалась в следующем. Первоначально система приводилась в состояние равновесия, после чего к ней прикладывалось переменное магнитное поле h с амплитудой 0.1 mT под углом 45° к оси плеч крестообразных элементов, и регистрировалась средняя по образцу амплитуда установившихся колебаний намагниченности. Частота возбуждающего СВЧ-поля изменялась в диапазоне от 0 до 15 GHz с шагом 0.1 GHz (в области резонансных пиков — с шагом 0.01 GHz). Внешнее постоянное магнитное поле отсутствовало. Для анализа модового

состава резонансов рассчитывались пространственные распределения колебаний z -компоненты намагниченности $m_z(x, y)$ и амплитуды колебаний $m(x, y)$, рассчитываемые по формуле

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

где m_x , m_y и m_z — амплитуды проекций переменной компоненты намагниченности [11].

3. Результаты и обсуждение

Расчеты проводились для двух различных состояний намагниченности в крестообразных элементах — антивихревого (рис. 1, *a*) и вихревого (рис. 1, *b*). В последнем случае вихри намеренно закручены по разным направлениям для иллюстрации того, что спектр ФМР

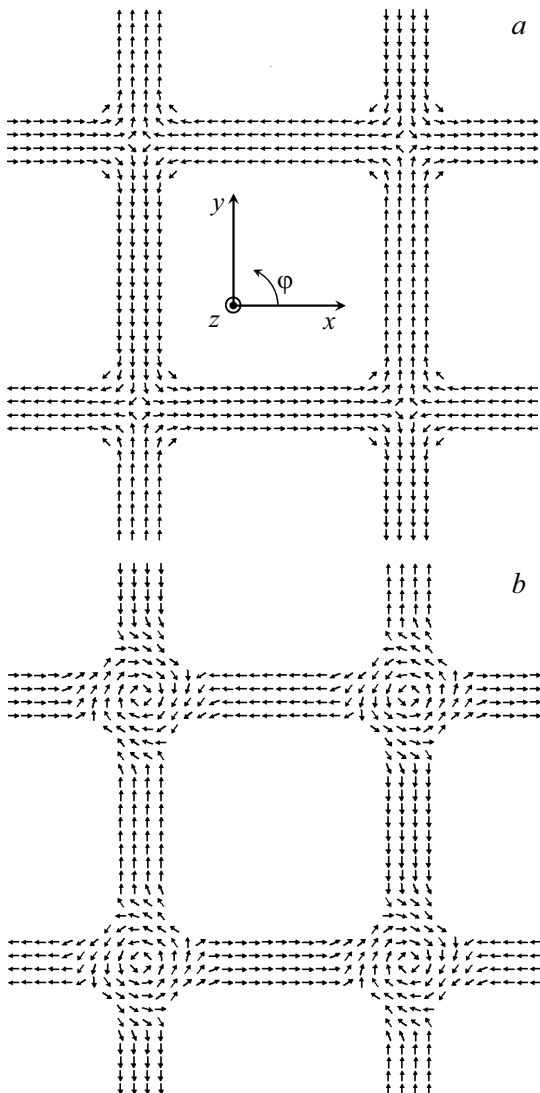


Рис. 1. Распределения намагниченности в минимальной ячейке квадратной сетки для антивихревого (*a*) и вихревого (*b*) состояний.

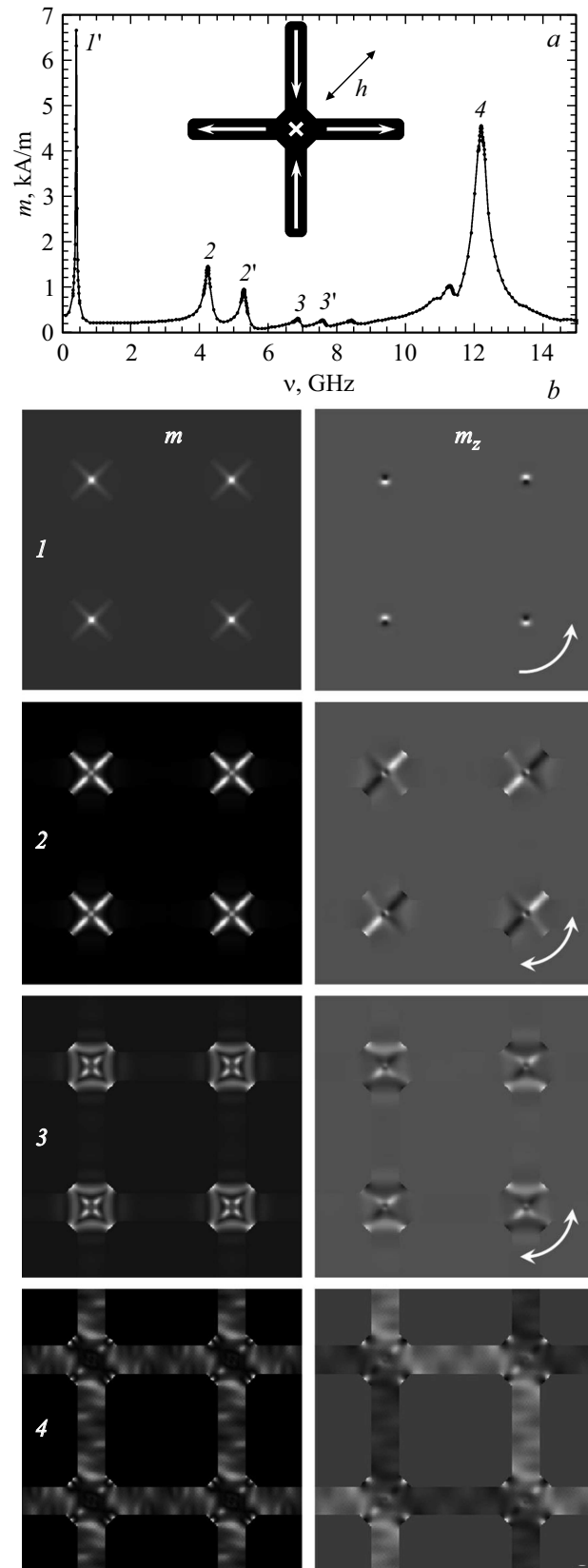


Рис. 2. *a* — ФМР-спектр квадратной решетки с антивихревым распределением намагниченности. *b* — распределения амплитуд m и m_z переменной составляющей намагниченности, соответствующие пронумерованным резонансным пикам ФМР-спектра.

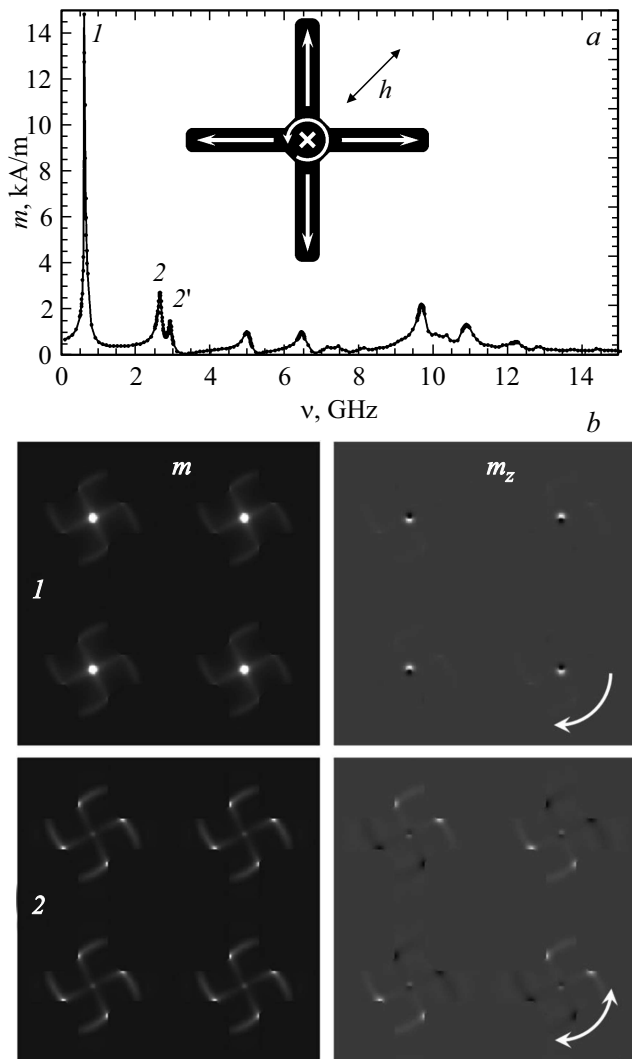


Рис. 3. *a* — ФМР спектр квадратной решетки с вихревым распределением намагниченности. *b* — распределения амплитуд m и m_z переменной составляющей намагниченности, соответствующие пронумерованным резонансным пикам ФМР-спектра.

не зависит от завихренности. Для обоих случаев коры были направлены против оси z (от нас).

Спектр ФМР-решетки с антивихревыми состояниями и пространственные распределения амплитуд колебаний, соответствующие резонансным модам, представлены на рис. 2. Классифицировать большую часть резонансов в этой системе удобнее всего по направлению вращения распределения намагниченности вокруг центра симметрии (центра коры): $+\varphi$ (осциллирующее распределение намагниченности вращается против часовой стрелки, если смотреть в направлении коры) и $-\varphi$ (мода осциллирует вращается по часовой стрелке, если смотреть в направлении коры). Пик $1'$ соответствует прецессии коры антивихря и его окружения. Эта прецессия происходит по направлению $+\varphi$. Для следующих резонансов наблюдается расщепление. Моды 2 и $2'$ имеют

похожую пространственную структуру, но отличаются направлением вращения — мода, соответствующая пику 2 , вращается в направлении $-\varphi$, а соответствующая пику $2'$, — в направлении $+\varphi$. Для пиков 3 и $3'$ ситуация аналогична. Пик 4 соответствует квазиоднородному резонансу [12–13] намагниченности плеч креста.

Спектр ФМР и изображения резонансных мод для решетки крестообразных элементов в вихревом состоянии представлены на рис. 3. Пик 1 (рис. 3, *a*) выглядит аналогично пику $1'$ (рис. 2, *a*), но в данном случае прецессия коры происходит в направлении $-\varphi$. Пики 2 и $2'$ соответствуют резонансам областей, в которых намагниченность переходит от вихревого распределения в перекрестье к однородному распределению в плече. Мода 2 вращается в направлении $-\varphi$, а мода $2'$ — в направлении $+\varphi$. Следует обратить внимание, что для случая антивихревого распределения намагниченности моды, вращающиеся в направлении $-\varphi$, находятся ниже по частоте, чем вращающиеся в направлении $+\varphi$. Прецессия коры и его окружения в этом случае происходит в направлении $+\varphi$. Для вихревого распределения наблюдается обратная ситуация: наименьшую частоту имеют моды, вращающиеся в направлении $+\varphi$, а прецессия коры и его окружения происходит в направлении $-\varphi$. Направления вращения мод зависят от направления коры и не зависят от знака спиральности для вихревого состояния. Поскольку направления коров вихря и антивихря в расчетах совпадали, такое различие в резонансных частотах, по-видимому, связано с различной завихренностью вихревого и антивихревого распределений намагниченности.

4. Заключение

Таким образом, проведено микромагнитное моделирование ФМР в решетках магнитных крестообразных элементов с вихревым и антивихревым состояниями намагниченности. Для обоих магнитных состояний наблюдается возбуждение мод, вращающихся вокруг центра коры. Эти моды расщеплены по частотам и отличаются направлением вращения ($+\varphi$ и $-\varphi$). Направление резонансной прецессии коры, а также соотношение резонансных частот вращающихся мод и направление их вращения определяются знаком завихренности и не зависят от знака спиральности вихревого и антивихревого распределений намагниченности.

Список литературы

- [1] K. Shigeto, T. Okuno, K. Mibu, T. Shinjo, T. Ono. Appl. Phys. Lett. **80**, 4190 (2002).
- [2] Hao Wang C.E. Campbell. Phys. Rev. B **76**, 220407(R) (2007).
- [3] 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).

- [4] M.V. Sapozhnikov, R.V. Gorev, E.A. Karashtin, V.L. Mironov. *JMMM*, **446**, 1 (2018).
- [5] S.S.P. Parkin, K.P. Roche, M.G. Samant, P.M. Rice, R.B. Beyers, R.E. Scheuerlein, E.J. O'Sullivan, S.L. Brown, J. Bucchigano, D.W. Abraham, Yu Lu, M. Rooks, P.L. Trouilloud, R.A. Wanner, W.J. Gallagher. *JAP* **85**, 5828 (1999).
- [6] J.-G. Zhu. *Proc. IEEE* **96**, 11, 1786 (2008).
- [7] R.L. Stamps, S. Breikreutz, J. Akerman, A.V. Chumak, Y. Otani, G.E.W. Bauer, J.-U. Thiele, M. Bowen, S.A. Majetich, M. Klaui, I.L. Prejbeanu, B. Dieny, N.M. Dempsey, B. Hillebrands. *J. Phys. D* **47**, 333001 (2014).
- [8] Naoto Nagaosa, Yoshinori Tokura. *Nature Nanotechnology* **8**, 899 (2013).
- [9] M.J. Donahue, D.G. Porter. Interagency Report NISTIR 6376. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg; <http://math.nist.gov/oommf/>
- [10] D. Zhang, J.J. Yue, Z.X. Kou, L. Lin, Y. Zhai, H.R. Zhai. *AIP Adv.* **6**, 056125 (2016).
- [11] Р.В. Горев, В.Л. Миронов, Е.В. Скороходов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* **3**, 37 (2016).
- [12] E.V. Skorohodov, R.V. Gorev, R.R. Yakubov, E.S. Demidov, Yu.V. Khivintsev, Yu.A. Filimonov, V.L. Mironov. *JMMM* **424** 118 (2017).
- [13] Р.В. Горев, Е.В. Скороходов, В.Л. Миронов. *ФТТ* **58**, 11, 2135 (2016).

Редактор Т.Н. Василевская