

05,01

Локализованные моды спин-волнового резонанса ферромагнитных микрополосок в поле магнитного зонда

© Р.В. Горев, В.Л. Миронов

Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: GorevRV@ipmras.ru

Приводятся результаты микромагнитного моделирования вынужденных колебаний намагниченности планарных микрополосок из NiFe с анизотропией легкая плоскость и из Co/Pt с перпендикулярной анизотропией типа легкая ось в поле магнитного сферического зонда. Показано, что под воздействием поля зонда в полосках NiFe реализуется связанное состояние „еж“-„антивихрь“, обусловленное латеральными компонентами поля зонда, а в слое Co/Pt реализуется скирмионное состояние намагниченности. Эти эффекты приводят к искажению пространственных распределений колебаний намагниченности микрополосок и к появлению дополнительных резонансов в спектрах колебаний, связанных с модами, локализованными в поле зонда.

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

DOI: 10.21883/FTT.2017.11.45053.10k

1. Введение

В последнее время большое внимание уделяется исследованию локальных мод ферромагнитного резонанса (ФМР), обусловленных воздействием неоднородного поля зонда магнитно-резонансного силового микроскопа (МРСМ) на тонкопленочные ферромагнитные образцы [1–3]. С одной стороны, такое воздействие зонда приводит к нежелательным искажениям характера колебаний намагниченности исследуемых объектов, однако, с другой стороны, в условиях сильного взаимодействия зонда и образца возможна реализация новых методик исследования локальных СВЧ-свойств ферромагнитных структур [4–6]. В настоящей работе методами микромагнитного моделирования исследованы особенности воздействия магнитного сферического зонда на колебания намагниченности тестовых образцов в виде тонкопленочных ферромагнитных микрополосок с анизотропией типа легкая плоскость и с перпендикулярной анизотропией типа „легкая ось“.

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) [7]. В качестве тестовых объектов исследовались прямоугольные микрополоски с размерами $2000 \times 1000 \times 10$ nm. Расчеты проводились для двух различных систем. Первая представляла собой микрополоску из пермаллоя

(Ni₈₀Fe₂₀) со следующими параметрами: намагниченность насыщения $M_{NiFe} = 8 \cdot 10^5$ A/m, обменная константа $A_{NiFe} = 1.3 \cdot 10^{-11}$ J/m. Вторая система представляла собой многослойную структуру Co/Pt с перпендикулярной анизотропией, имеющую следующие параметры: намагниченность насыщения $M_{CoPt} = 8 \cdot 10^5$ A/m, обменная константа $A_{CoPt} = 10^{-11}$ J/m, параметр анизотропии $K = 6 \cdot 10^5$ J/m³ [8,9]. В расчетах параметр диссипации составлял 0.01. В качестве поля модельного МРСМ-зонда было выбрано поле однородно намагниченного по оси z шара из Co (рис. 1). Диаметр зонда соответствовал типичным размерам зондов, используемых в МРСМ [10,11], и составлял 200 nm. Исследовались колебания намагниченности образцов в переменном магнитном поле h величиной 0.1 мТ, направленном в плоскости образца вдоль оси y. В расчетах регистрировались временные зависимости установившихся колебаний всех компонент намагниченности [12]. Частота возбуждающего СВЧ-поля ν изменялась с шагом 0.1 GHz. Для анализа спектров колебаний строились частотные зависимости

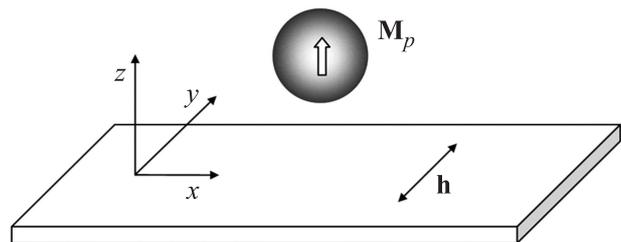


Рис. 1. Схематическое изображение магнитного зонда над ферромагнитной микрополоской.

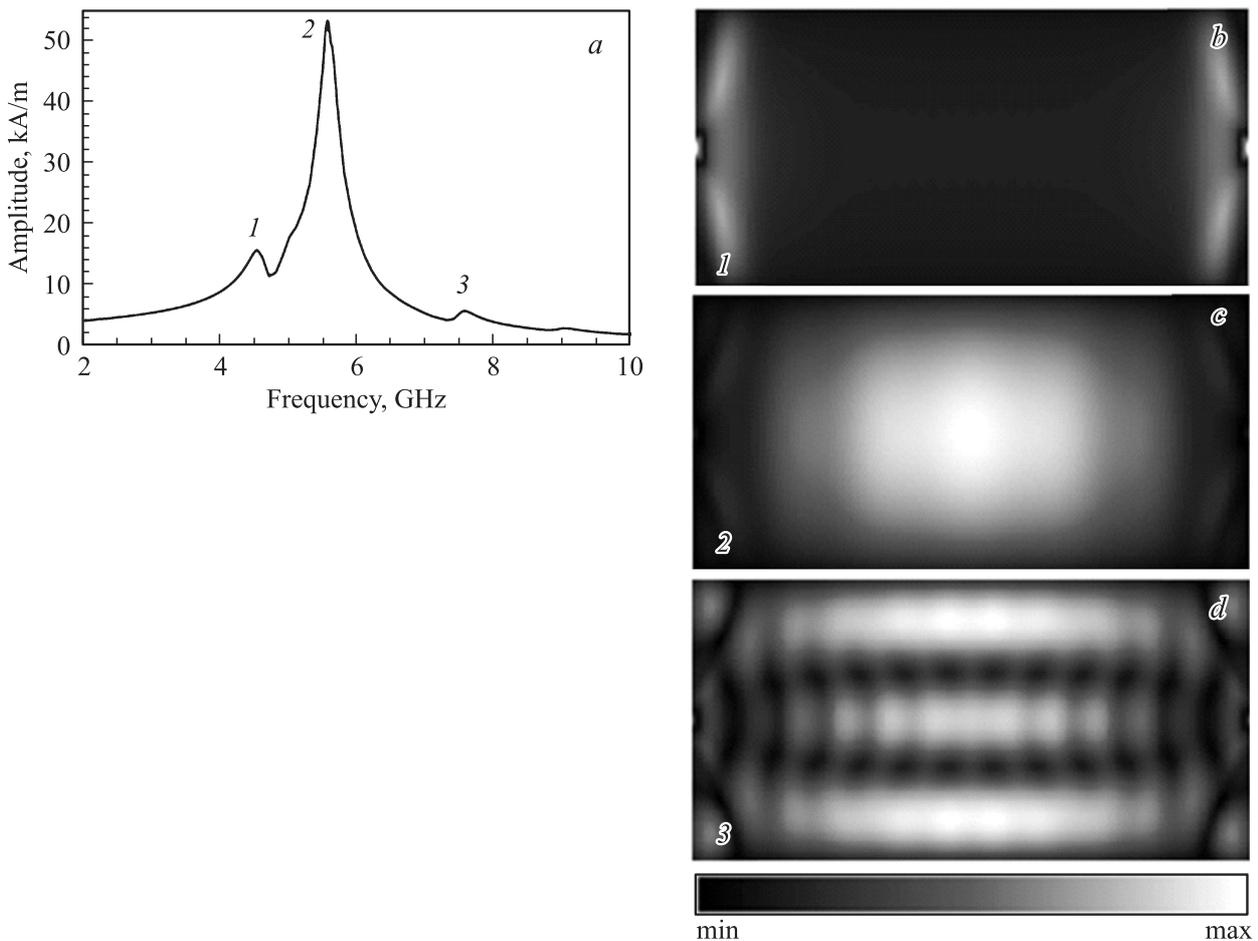


Рис. 2. (a) Спектр колебаний намагниченности однородно намагниченной микрополоски NiFe. (b)–(d) Нормированные пространственные распределения амплитуды колебаний намагниченности, соответствующие резонансным пикам 1–3 в спектре рис. 2, a.

средней по системе амплитуды колебаний переменной составляющей намагниченности

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

Для анализа модового состава резонансов рассчитывались временные реализации пространственных распределений амплитуды колебаний переменной составляющей намагниченности при накачке на резонансных частотах [13,14].

3. Результаты и обсуждение

Вначале нами исследовался ФМР в микрополоске NiFe в отсутствие зонда. Для создания однородного состояния к ней прикладывалось постоянное магнитное поле величиной 30 мТ, направленное вдоль длинной стороны (вдоль оси x). Спектр колебаний намагниченности показан на рис. 2, a. Данный спектр имеет три характерных резонансных пика. Первый пик соответствует моде колебаний намагниченности, локализованной вблизи края микрополоски (рис. 2, b). Второй

резонанс на частоте 5.5 GHz представляет собой суперпозицию стоячих магнитостатических и обменных спиновых волн с различными волновыми векторами k_x (рис. 2, c) [14]. Третий резонанс представляет собой суперпозицию стоячих спиновых волн с различными волновыми векторами k_x и k_y (рис. 2, d).

При подводе зонда к образцу поле зонда вначале вызывает небольшие возмущения намагниченности микрополоски, а при достаточно малых расстояниях зонд-образец (< 40 nm) приводит к эффектам перемагничивания [15]. Как результат, под действием латеральных компонент поля зонда в микрополоске формируется неоднородное состояние „еж“-„антивихрь“ (распределение намагниченности на участке микрополоски в окрестности зонда приведено на рис. 3, a). Воздействие зонда приводит к сдвигу основного резонанса в низкочастотную область спектра (рис. 3, b). При этом к резонансу краевых мод добавляется низкочастотный резонанс антивихревого состояния (рис. 3, c), а также происходит деформация основной моды колебаний (рис. 3, d) и спин-волнового резонанса (рис. 3, f). Кроме того, в ФМР-спектре появляется дополнительный резо-

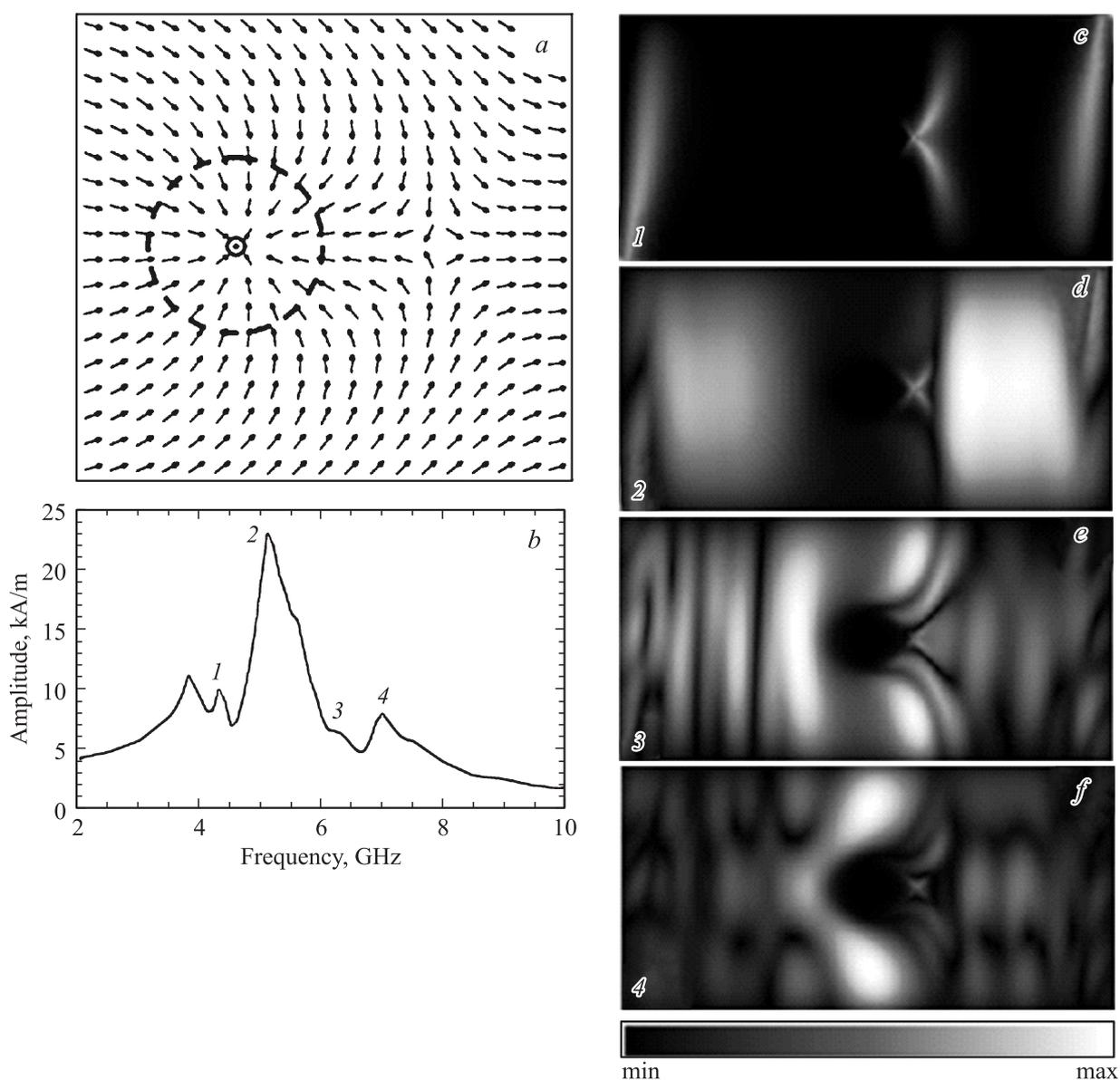


Рис. 3. (a) Распределение намагниченности на участке ($450 \times 450 \text{ nm}$) микрополоски NiFe непосредственно в области под зондом МРСМ. Положение зонда над образцом обозначено пунктирным контуром. (b) Спектр колебаний намагниченности полоски NiFe в поле зонда. (c)–(f) Нормированные пространственные распределения амплитуды колебаний намагниченности, соответствующие резонансным пикам 1–4 спектра на рис. 3, b.

нансный пик 3, связанный с модой колебаний, показанной на рис. 3, e.

Аналогичные эффекты наблюдаются в микрополоске Co/Pt с перпендикулярной намагниченностью. В отсутствие зонда в однородно намагниченном состоянии спектр колебаний полоски содержит ряд резонансов различного порядка (рис. 4, a). Основной резонанс (пик 1) соответствует квазиоднородной прецессии намагниченности (рис. 4, b). Два другие являются спин-волновыми резонансами более высокого порядка (рис. 4, c, d). Поле зонда вначале вызывает небольшие возмущения намагниченности микрополоски, а при малом расстоянии между зондом и образцом приводит к эффектам пе-

ремагничивания [16]. Для рассматриваемых параметров системы критическое расстояние составляло 40 nm . При этом симметрия магнитного поля зонда способствует формированию в полоске Co/Pt скирмионного состояния (рис. 5, a). Такое воздействие зонда приводит к сдвигу основного резонанса в высокочастотную область спектра (рис. 5, b) и к искажению пространственного распределения колебаний в основной моде (рис. 5, c). Кроме того, эффект перемагничивания приводит к появлению в спектре ФМР дополнительного интенсивного резонансного пика (пик 2, рис. 5, b), связанного с модой колебаний намагниченности показанной на рис. 5, d.

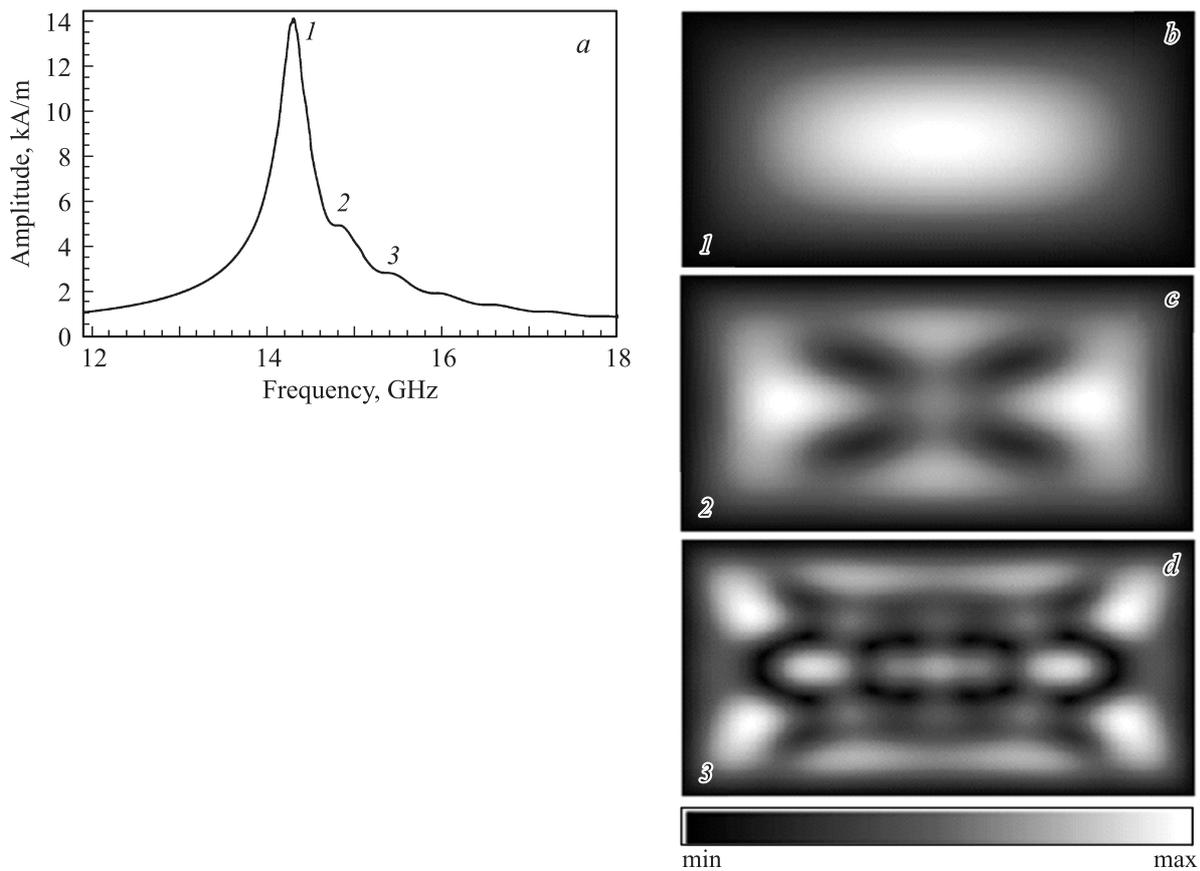


Рис. 4. (a) Спектр колебаний намагниченности однородно намагниченной микрополоски Co/Pt. (b)–(d) Нормированные пространственные распределения амплитуды колебаний намагниченности, соответствующие резонансным пикам 1–3 в спектре рис. 4, a.

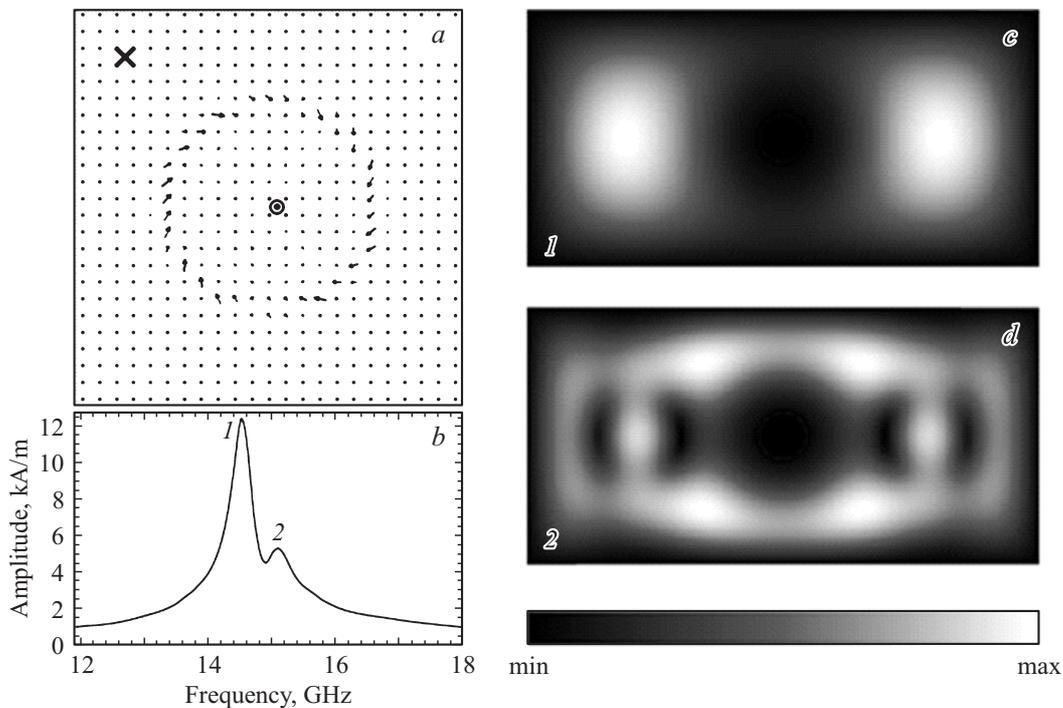


Рис. 5. (a) Распределение намагниченности на участке микрополоски Co/Pt (размером 700×700 nm) непосредственно под зондом МРСМ. Намагниченность в центральной области направлена вверх (в направлении оси z), а на периферии — в противоположном направлении. (b) Спектр колебаний намагниченности полоски Co/Pt в поле зонда. (c)–(d) Нормированные распределения амплитуды колебаний намагниченности, соответствующие резонансным пикам 1 и 2 в спектре рис. 5, b.

4. Заключение

Таким образом, нами проведено микромагнитное моделирование эффектов влияния неоднородного поля магнитного зонда МРСМ на спектры и пространственную структуру мод колебаний намагниченности в микрополосках из NiFe с анизотропией типа легкая плоскость и микрополосках из многослойных структур Co/Pt с перпендикулярной анизотропией типа легкая ось. Показано, что при малых расстояниях зонд-образец наблюдается локальное перемагничивание образцов. При этом в полосках пермаллоя реализуется связанное состояние „еж“-„антивихрь“, обусловленное латеральными компонентами поля зонда, а в ФМР-спектре появляется дополнительный резонанс, связанный с локализованной модой колебаний намагниченности. В полоске Co/Pt реализуется скирмионное состояние намагниченности, что сопровождается появлением дополнительного резонанса, связанного с колебаниями намагниченности в поле зонда. Данные эффекты необходимо учитывать при проведении МРСМ-исследований ферромагнитных пленок с различным типом анизотропии.

Список литературы

- [1] A. Suter, D.V. Pelekhov, M.L. Roukes, P.C. Hammel. *J. Magn. Res.* **154**, 210 (2002).
- [2] I. Lee, Yu. Obukhov, G. Xiang, A. Hauser, F. Yang, P. Banerjee, D.V. Pelekhov, P.C. Hammel. *Nature* **466**, 845 (2010).
- [3] H.-J. Chia, F. Guo, L.M. Belova, R.D. McMichael. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 087206 (2012).
- [4] I. Lee, Yu. Obukhov, A.J. Hauser, F.Y. Yang, D.V. Pelekhov, P.C. Hammel. *J. Appl. Phys.* **109**, 07D313 (2011).
- [5] C. Du, R. Adur, H. Wang, S.A. Manuilov, F. Yang, D.V. Pelekhov, P.C. Hammel. *Phys. Rev. B* **90**, 214428 (2014).
- [6] C. Du, I. Lee, R. Adur, Yu. Obukhov, C. Hamann, B. Buchner, J. McCord, D.V. Pelekhov, P.C. Hammel. *Phys. Rev. B* **92**, 214413 (2015).
- [7] M.J. Donahue, D.G. Porter. Interagency Report No. NISTIR 6376. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. (<http://math.nist.gov/oommf/>).
- [8] M. Yu, Y. Liu, D.J. Sellmyer. *J. Appl. Phys.* **87**, 6959 (2000).
- [9] S.H. Liou, S. Huang, E. Klimek, R.D. Kirby, Y.D. Yao. *J. Appl. Phys.* **85**, 4334 (1999).
- [10] F. Guo, L.M. Belova, R.D. McMichael. *Phys. Rev. Lett.* **110**, 017601 (2013).
- [11] H. Lavenant, V. Naletov, O. Klein, G. de Loubens, L. Casado, J.M. De Teresa. *Nanofabrication*, **1**, 65 (2014).
- [12] Р.В. Горев, В.Л. Миронов, Е.В. Скороходов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* **3**, 37 (2016).
- [13] Р.В. Горев, Е.В. Скороходов, В.Л. Миронов. *ФТТ* **58**, 2135 (2016).
- [14] 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).
- [15] В.Л. Миронов, О.Л. Ермолаева, А.А. Фраерман. *Изв. РАН. Сер. физ.* **72**, 1558 (2008).
- [16] V.L. Mironov, B.A. Gribkov, S.N. Vdovichev, S.A. Gusev, A.A. Fraerman, O.L. Ermolaeva, A.B. Shubin, A.M. Alexeev, P.A. Zhdan, C. Binns. *J. Appl. Phys.* **106**, 053911 (2009).