УДК 621.385.833.2:537.622.4

МАГНИТНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ СЛАБОКОЭРЦИТИВНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

В. Л. Миронов, Д. С. Никитушкин, Б. А. Грибков, С. А. Гусев

Институт Физики микроструктур РАН, ГСП-105, г. Нижний Новгород, Россия
E-mail: mironov@ipm.sci-nnov.ru

Приводятся результаты исследований особенностей формирования контраста, регистрируемого магнитно-силовым микроскопом (МСМ) от слабокоэрцитивных ферромагнитных частиц. Экспериментально для нанодисков Co наблюдались распределения МСМ контраста кольцевой и гауссовой формы. Приводятся результаты компьютерного моделирования, подтверждающие наблюдаемые особенности.

Введение

Уменьшение размеров магнитных элементов является одной из основных тенденций развития современных систем магнитной записи информации. В связи с этим большую актуальность в последнее время приобретают исследования магнитного состояния малых ферромагнитных частиц методами магнитно-силовой микроскопии (МСМ). В частности, одна из сложных проблем – регистрация и интерпретация МСМ контраста от таких объектов [1–4]. Формирование МСМ контраста в данном случае происходит в условиях сильного взаимодействия поля зонда и магнитного момента частицы, что существенно затрудняет интерпретацию экспериментальных результатов. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных МСМ исследований и компьютерного моделирования особенностей МСМ контраста от слабокоэрцитивных частиц Co.

Эксперимент

Упорядоченные массивы ферромагнитных наночастиц эллиптической формы с различным аспектным соотношением формировались посредством электронной литографии и ионного травления тонких пленок Co [5]. Электронно-микроскопические исследования и электронная литография проводились на растровом электронном микроскопе "JEOL – JEM 2000EX II". Магнитное состояние частиц исследовалось с помощью многомодовых сканирующих зондовых микроскопов "Solver PRO" и "Solver HV" (компания НТ-МДТ). В МСМ измерениях применялись магнитные зонды с Co покрытием.

Моделирование МСМ контраста

При моделировании зонд представлялся в виде однородно намагниченного шара. Поле зонда H_t аппроксимировалось полем одиночного диполя [6, 7] с эффективным магнитным моментом $m_t = M_t V_t$ (M_t– остаточная намагниченность материала зонда; V_t – эффективный объем магнитного покрытия зонда, взаимодействую-

ISBN 985645653-3

щего с полем частицы). Анализ экспериментальных данных показывает, что характерный эффективный объем магнитного материала используемых нами зондов из Co (M_t ~ 1400 Гс) составляет порядка 10^5 нм^3. В расчетах предполагалось, что частица имеет однородное распределение намагниченности, при этом направление магнитного момента частицы полностью определяется внешним магнитным полем. В качестве модельных МСМ изображений рассчитывались распределения величины сдвига фазы колебаний кантилевера в магнитном поле образца:

$$\Delta\varphi = -\frac{Q}{k}\frac{\partial F_z}{\partial z},$$

где Q – добротность кантилевера, k – жесткость кантилевера, F_z – Z-компонента силы. Модельные расчеты проводились для частиц Co с характерными размерами ~50 нм, для которых поле коэрцитивности H_c меньше поля зонда МСМ: $H_c << H_t$. Расчеты выполнялись в диполь-дипольном приближении для частиц сферической формы и частиц, имеющих форму круглого диска. Поле частицы представлялось в виде поля точечного диполя с магнитным моментом $m_p = M_p V_p$ (M_p – остаточная намагниченность материала частицы, V_p– объем частицы).

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведено характерное электронно-микроскопическое (СЭМ) изображение участка массива частиц Co. Частицы отличались по форме и имели разброс по размерам. Характерные латеральные размеры частиц составляли 50–70 нм. Высота частиц 20 нм.

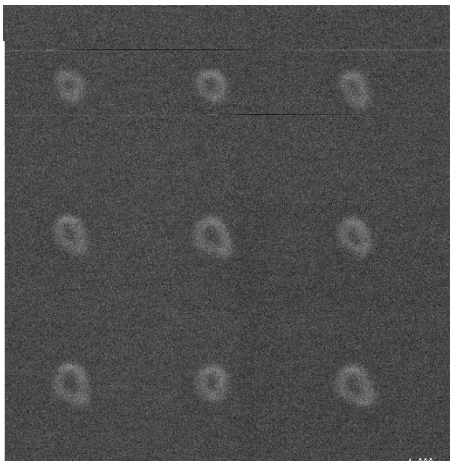

Рис. 1. СЭМ изображение участка массива частиц (метка соответствует 1 мкм)

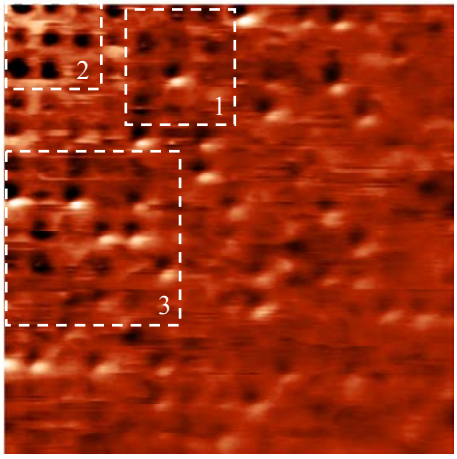

Рис. 2. МСМ изображение участка 5 × 5 мкм массива частиц Co. Квадратами отмечены характерные участки МСМ изображения

Характерное МСМ изображение массива частиц Co полученно в *constant height* режиме (рис. 2). Вследствие неточной установки плоскости образца по отношению к оси зонда высота сканирования постепенно уменьшалась по направлению от правого нижнего угла к левому верхнему. Из рисунка видно, что только часть частиц, имеющих форму вытянутого эллипса, демонстрируют МСМ контраст в виде двух полюсов, соответствующий состоянию однородной намагни-

ISBN 985645653-3

ченности в плоскости образца. Большинство же частиц массива имеют МСМ контраст сложной природы. На рис. 3, а приведено МСМ изображение участка массива частиц, на котором видны особенности (указаны стрелками), характерные для слабокоэрцитивных дисков, у которых магнитный момент следует за полем зонда, оставаясь в плоскости образца. Распределение МСМ контраста от таких частиц имеет кольцевую форму (модельное распределение приведено на рис. 3, б, что было предсказано ранее в работе [8].

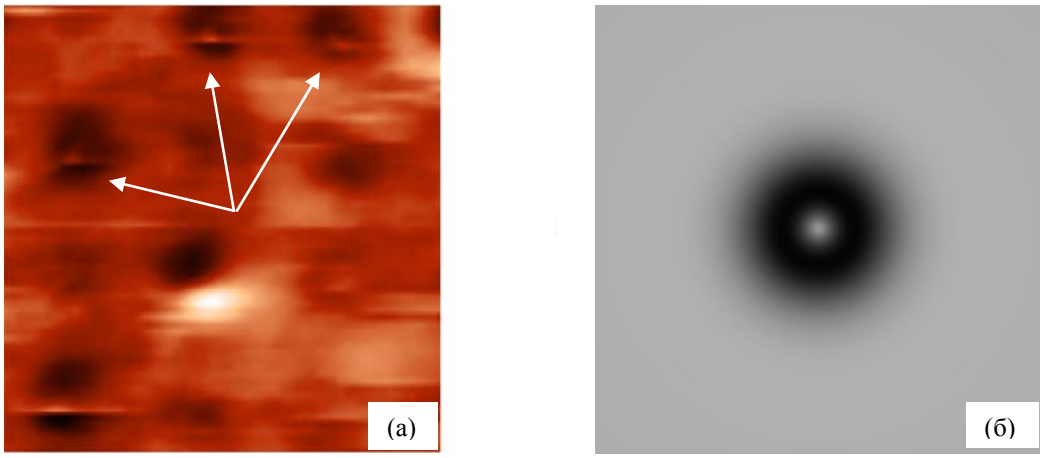

Рис. 3. Экспериментальное (а) и модельное (б) кольцевые распределения МСМ контраста от круглых слабокоэрцитивных нанодисков (участок 1 на рис. 2)

С уменьшением высоты сканирования степень влияния зонда на магнитный момент частицы увеличивается и на МСМ изображении (область 2 на рис. 2) наблюдаются особенности в виде темных полюсов с гауссовым распределением контраста, связанные с тем, что величина магнитного поля зонда становится больше коэрцитивного поля (эффективного поля, обусловленного формой частиц), удерживающего магнитный момент частицы в плоскости диска. При этом магнитный момент частицы поднимается из плоскости образца и полностью ориентируется полем МСМ зонда [8].

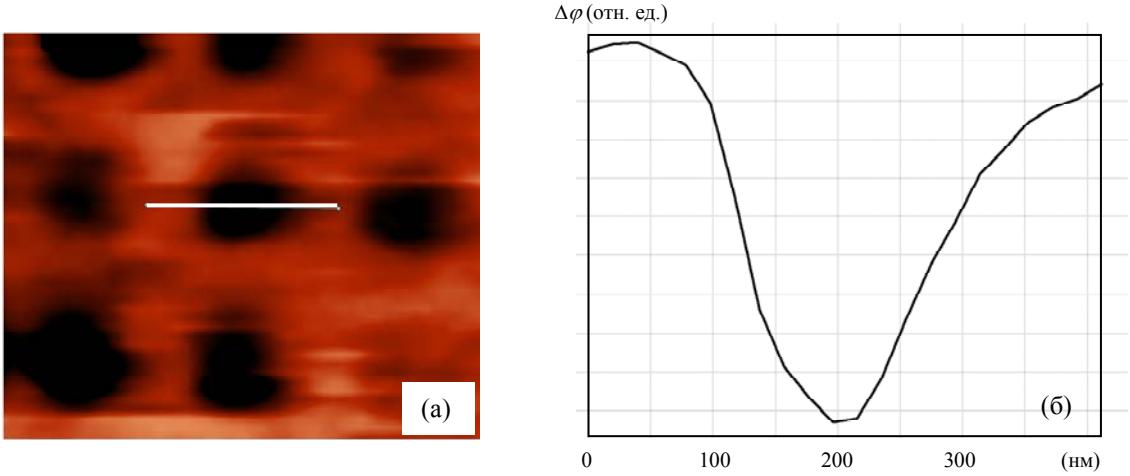

Рис. 4. МСМ изображение (а) и поперечное сечение распределения МСМ контраста вдоль линии (б) для частицы Co в условиях сильного взаимодействия зонд-частица при малых высотах сканирования. Участок 2 на рис. 2

ISBN 985645653-3

При наложении внешнего магнитного поля $H_{вх} > H_t$ происходит стабилизация МСМ изображения слабокоэрцитивных частиц, так что МСМ изображение соответствует изображению частиц, однородно намагниченных в плоскости образца в направлении приложенного поля (рис. 5, а, б).

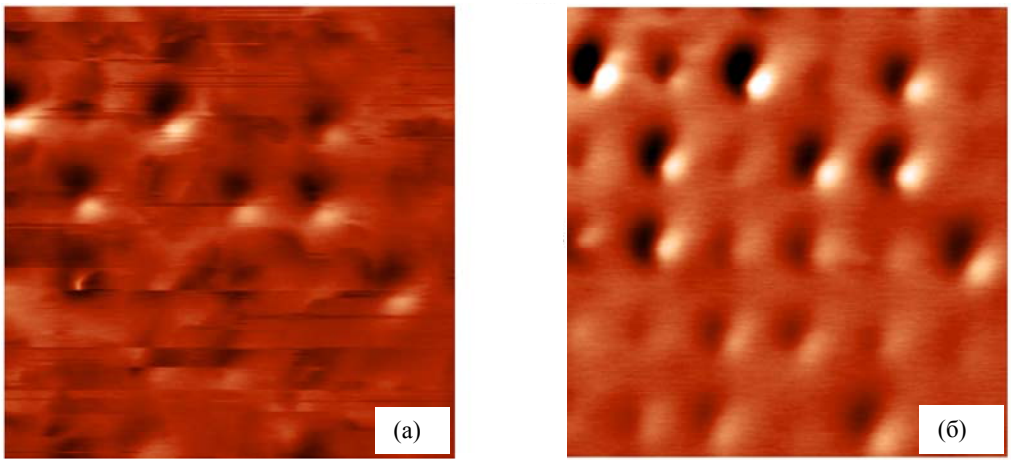

Рис. 5. МСМ изображение участка частиц Co без поля (а) и во внешнем магнитном поле (б); размер кадра 2 × 2 мкм. Участок 3 на рис. 2

Заключение

Таким образом, в работе проведены МСМ исследования малых ферромагнитных частиц Co с характерными латеральными размерами 50–70 нм и высотой 20 нм. Моделирование МСМ контраста от сверхмалых слабокоэрцитивных ферромагнитных наночастиц показало, что наблюдаемые в эксперименте особенности МСМ контраста обусловлены сильным взаимодействием поля зонда с исследуемыми частицами. Показано, что наложение внешнего магнитного поля приводит к перераспределению и стабилизации магнитного фазового контраста от слабокоэрцитивных частиц.

Благодарность

Авторы выражают благодарность С. Н. Вдовичеву, А. Ю. Климову, В. В. Рогову за предоставленные образцы, а также А. А. Фраерману за многочисленные полезные обсуждения.

Работа частично поддержана РФФИ (проект 05-02-17153) и РАН в рамках программы “Низкоразмерные квантовые структуры”.

Литература

1. Rasa M., Philipse A.P. // J. Magn. Magn, Mater. 2002. 252, 101.
2. Rasa M., Kuipers B.W., Philipse A.P. // J. Colloid Interface Sci.2002. 250, 303.
3. Koch, R.H. te Velde , Palasantzas G. // J.Th.M.De Hosson, Appl. Phys. Lett.2004. 84, 556.
4. Koch, R.H. te Velde , Palasantzas G. // J.Th.M.De Hosson, Appl. Surf. Sci.2004. 226, 185.
5. Fraerman A.A., Gusev S.A., Mazo L.A. et al. // Phys. Rev.2002, B 65, 064424.
6. Hartmann U. // Phys. Lett.1989. A 137, 475.
7. Kebe Th., Carl A. // J. Appl. Phys.2004. 95, 775.
8. Миронов В.Л., Никитушкин Д.С., Петров Д.С. и др. // Труды X симпозиума ″Нанофизика и наноэлектроника - 2006″, (Н. Новгород, 13-17 марта 2006 г.). С. 231–232. (принята к печати в журнале «Поверхность», 2007 г.)

ISBN 985645653-3