

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ЗОНДОМ МСМ ЭФФЕКТЫ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ FeCr и Co

А. А. Фраерман, С. Н. Вдовичев, Б. А. Грибков, В. Л. Миронов, Н. И. Полушкин
Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, ГСП-105, Россия

В работе приводятся результаты исследований процессов изменения состояния намагниченности в ферромагнитных наночастицах эллиптической формы под действием магнитного поля зонда магнитно-силового микроскопа (МСМ). Показано, что в наночастицах, полученных методом интерференционного лазерного отжига тонких пленок Fe-Cr, наблюдаются обратимые переключения однодоменного состояния намагниченности. Для частиц Co, сформированных на основе тонких пленок Co методами электронной литографии и ионного травления, обнаружены индуцированные зондом МСМ переходы между однодоменным и вихревым состояниями намагниченности.

Введение

Исследование свойств массивов ферромагнитных наночастиц вызывает повышенный интерес, обусловленный возможностью их применения в качестве среды для записи информации с высокой плотностью. В связи с этим в последние годы большое внимание уделяется изучению магнитного состояния таких частиц методами магнитно-силовой микроскопии и процессов их перемагничивания непосредственно под действием магнитного поля зонда МСМ. Влияние зонда на перемагничивание наночастиц Co и пермаллоя различной формы частично обсуждалось авторами работ [1 – 6]. В настоящей работе приводятся результаты МСМ исследований однодоменного (SD, single domain) и вихревого (SV, single vortex) состояний намагниченности в эллиптических частицах Fe-Cr и Co, а также индуцированных зондом МСМ эффектов перемагничивания, связанных с переходами $SD \Leftrightarrow SD$, $SD \Rightarrow SV$, $SV \Rightarrow SD \Rightarrow SV$, в таких частицах.

Экспериментальная техника

В экспериментах исследовались массивы ферромагнитных наночастиц двух типов - сформированные посредством интерференционного лазерного отжига тонких композитных пленок Fe-Cr [7] и полученные методом электронной литографии с последующим ионным травлением тонких пленок Co [8]. Магнитные свойства полученных структур изучались методами магнитооптической и холловской магнитометрии. Распределение остаточной намагниченности и процессы локального перемагничивания исследовались с помощью комплекса многомодовых сканирующих зондовых микроскопов "Solver" ("NT-MDT", Зеленоград, Россия). МСМ исследования проводились по однопроходной [9] и стандартной двухпроходной tapping/lift mode методикам.

МСМ индуцированное перемагничивание частиц Fe-Cr

Упорядоченные массивы ферромагнитных наночастиц Fe-Cr формировались посредством интерференционного лазерного отжига тонких (10–20 нм) композитных пленок Fe-Cr. Использовался метод четырехпучковой интерференции лазерного излучения [7]. На рис. 1 приведено АСМ- изображение одного из образцов, содержащего массив наночастиц Fe-Cr. Как видно из рисунка, модифицированные области в данном случае имеют эллиптическую форму с характерными размерами 800×280 нм. Проведенные магнитооптические измерения показали, что после лазерного отжига образцы приобретали ярко выраженные ферромагнитные свойства и имели направление легкого намагничивания, совпадающее с длинной осью частиц. Измеряемая петля гистерезиса, при намагничивании таких структур вдоль легкой оси, имеет форму параллелограмма. Поля насыщения H_S составляют ~ 500 Ое, а остаточная намагниченность M_R равна значению намагниченности в насыщении M_S . Как показывают магнитооптические исследования и проведенное моделирование [10], основное состояние частиц Fe-Cr данной конфигурации соответствует однодоменному состоянию намагниченности.

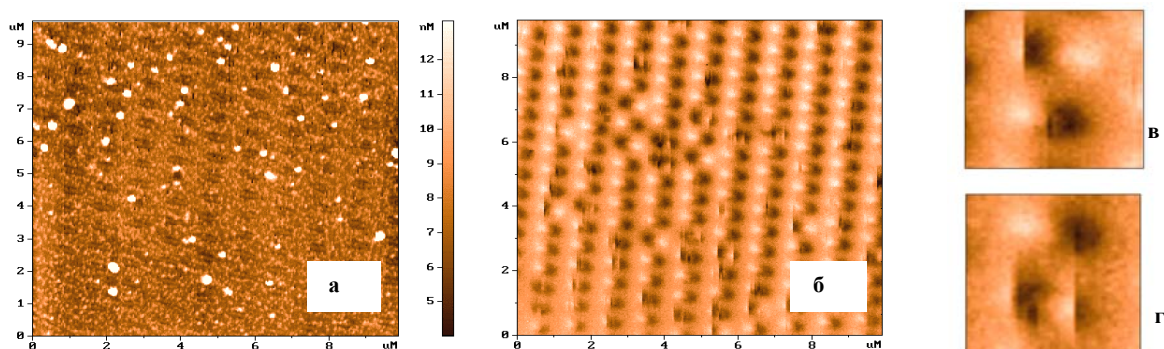


Рис. 1. АСМ- и МСМ изображения массива Fe-Cr частиц

На рис. 1,а приведено МСМ изображение (2 pass lift mode) массива частиц Fe-Cr, содержащее особенности, связанные с индуцированным зондом перемагничиванием частиц. Сканирование производилось в направлении сверху вниз, слева направо. Наблюдаются три характерные группы частиц. Частицы первой группы во время сканирования изменяют направление намагниченности на противоположное (рис. 1,в). Другая часть частиц дважды меняет направление намагниченности во время сканирования образца (рис. 1,г). И наконец существует группа частиц, которые не изменяют состояние намагниченности. При использовании МСМ зондов с большим собственным магнитным моментом наблюдается перемагничивание практически всех частиц массива (рис. 2,а).

Отсутствие эффектов переключения в некоторых частицах связано с неоднородностью образца. Как показал анализ МСМ изображений, переключение происходит только тогда, когда зонд располагается над белым полюсом частицы (одноименным с полюсом зонда). Одиночный акт перехода $SD \Rightarrow SD$ в частицах Fe-Cr показан на рис. 2,б,в.

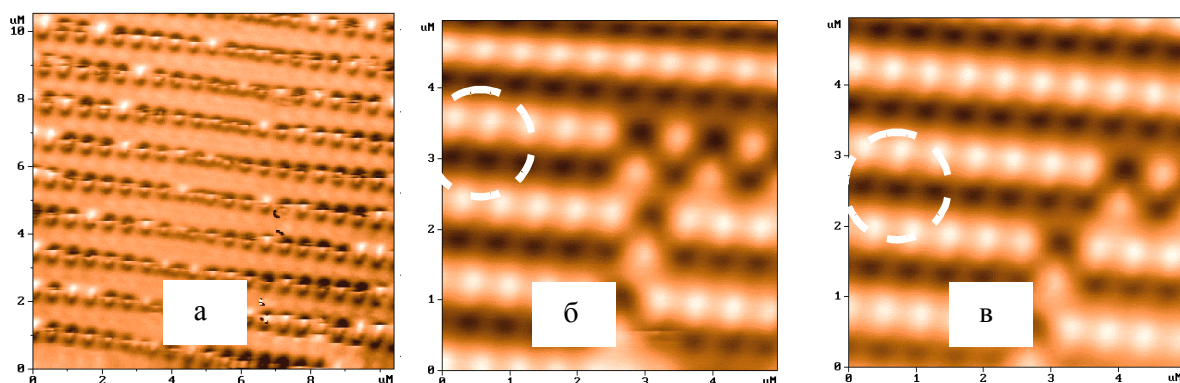


Рис. 2. Эффекты перемагничивания частиц Fe-Cr

Была проведена серия экспериментов по управляемому перемагничиванию частиц Fe-Cr зондом MCM. На рис. 3 приведены последовательные MCM изображения участка структуры Fe-Cr, показывающие процесс управляемого перемагничивания частиц. Переключение $SD \Rightarrow SD$ инициировались при проходе зонда на малой высоте над одноименным полюсом частицы.

Сначала была перемагничена одна частица (рис. 3,а), затем другая (рис 3 б), потом третья (рис. 3,в), а после этого вторая частица была переведена в исходное состояние. MCM изображения, приведенные на рис. 3, получены с помощью однопроходного MCM метода.

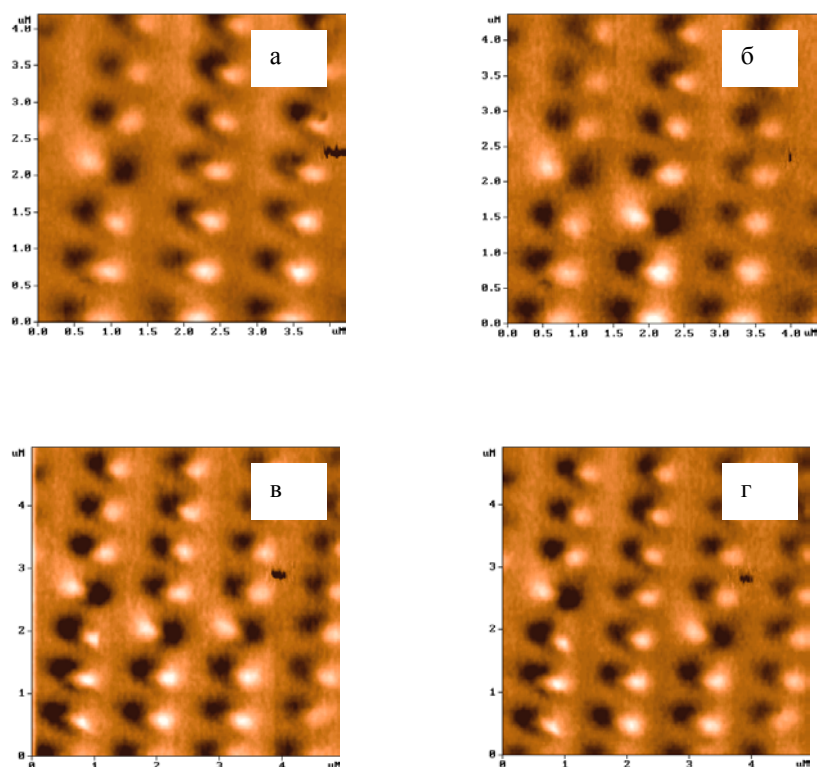


Рис. 3. Индуцированное MCM зондом перемагничивание частиц Fe-Cr

МСМ индуцированные переходы между однодоменным и вихревым состоянием в наночастицах Со

Эллиптические наночастицы Со с различным соотношением полуосей и различной толщины формировались посредством электронной литографии и ионного травления тонких пленок Со [8]. Как показали проведенные исследования, в эллиптических частицах Со могут реализовываться как однодоменное SD, так и SV состояния намагниченности в зависимости от соотношения толщины и латеральных размеров частиц. На рис. 4 приведены АСМ- и соответствующие МСМ-изображения одного и того же участка структуры, содержащей частицы Со.

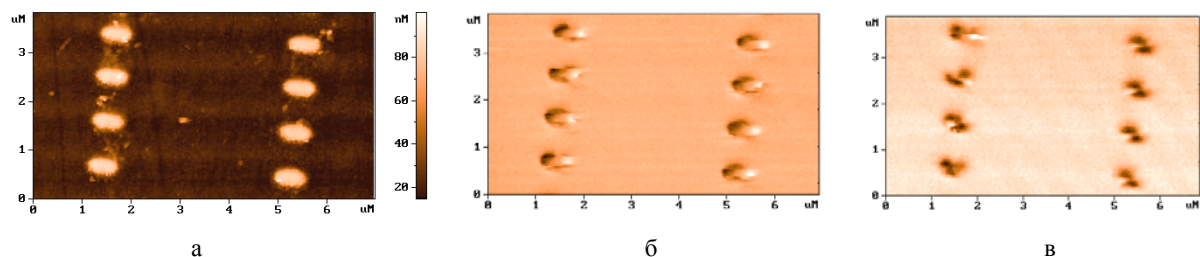


Рис. 4. АСМ- и соответствующие МСМ-изображения Со наночастиц ($0.4 \times 0.6 \mu\text{m}$)

Основное состояние в таких частицах соответствовало одновихревому. При сканировании данного образца с использованием двухпроходного МСМ метода наблюдались эффекты перехода частиц из вихревого состояния в однодоменное, сопровождающиеся резким увеличением МСМ контраста (рис. 4,б). Следует отметить, что переход $SV \Rightarrow SD$ наблюдается только при движении зонда в центральной области частицы (сканирование производилось вдоль длинной оси эллиптической частицы). При прохождении МСМ зонда вблизи края частицы наблюдался обратный переход $SD \Rightarrow SV$ из однодоменного состояния в вихревое. Такие процессы могут быть использованы для изменения направления завихренности. Элементарный акт изменения знака завихренности намагниченности в частице ($SV \Rightarrow SD \Rightarrow SV$) показан на рис. 5.

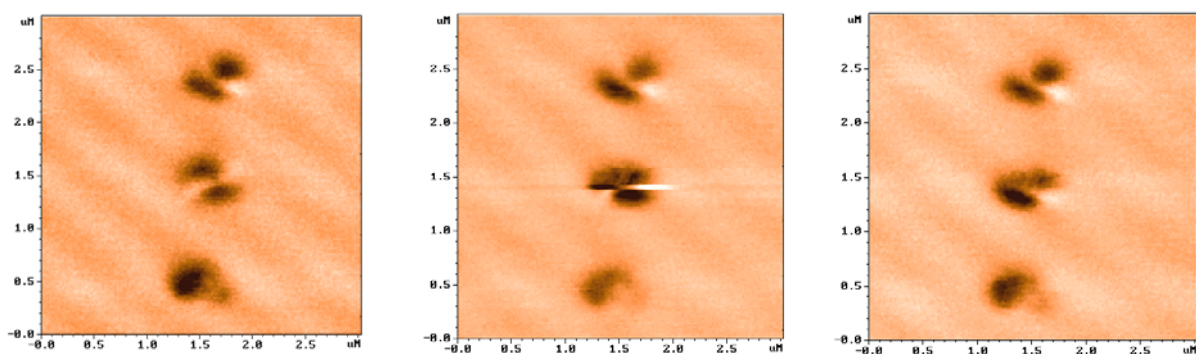


Рис. 5. Изменение знака направления завихренности в Со наночастице (центральная частица). Три последовательных скана с одного места. Размер частиц $0.4 \times 0.6 \mu\text{m}$

Эффекты перемагничивания наблюдались также в частицах Со с латеральными размерами $0.5 \times 1 \mu\text{m}$, для которых характерно многовихревое состояние намагниченности. В качестве примера на рис. 6 приведены МСМ изображения частиц, иллюстрирующие переходы из однодоменного во многовихревое состояние (рис. 6,б) и процесс перестройки мно-

говихревого состояния под действием магнитного поля зонда МСМ (рис. 6).

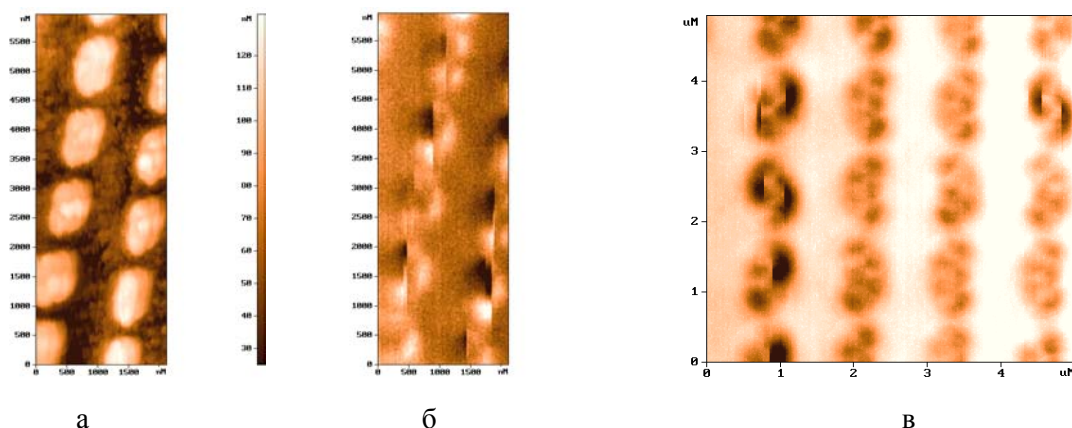


Рис. 6. МСМ индуцированные эффекты перемагничивания в Co наночастицах ($0.5 \times 1 \mu\text{m}$)

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что на магнитное состояние наноразмерных частиц эллиптической формы существенное влияние оказывает магнитное поле зонда магнитно-силового микроскопа. В частицах Fe-Cr наблюдались инициированные МСМ зондом обратимые переключения $SD \Rightarrow SD$ состояния намагнитченности. В частицах Co наблюдались обратимые переходы $SV \Rightarrow SD \Rightarrow SV$, сопровождающиеся изменением знака завихренности магнитного вихря. Для крупных частиц Co наблюдались эффекты перестройки многовихревого состояния в однодоменное и обратно. Как показали проведенные исследования, характер процессов перемагничивания существенно зависит от геометрической формы частиц (толщина и соотношение полуосей эллипса), величины магнитного момента зонда и от высоты прохода зонда над структурой. Данные процессы могут быть использованы в технологиях записи информации с высокой плотностью.

Авторы благодарны В.Б. Шевцову и Д.С. Никитушкину за помощь в проведении МСМ измерений, С.А. Гусеву, Г.Л. Пахомову за помощь в изготовлении образцов и А.Г. Темиряеву за крайне полезные консультации. Данная работа выполнена при поддержке РФФИ, номера грантов 02-02-16764, 04-02-16827, 04-02-17048.

Литература

1. Kleiber M., Kümmerlen F., Löhndorf M., Wadas A., Weiss D., Wiesendanger R. // Phys. Rev. B. 2002. V. 58, № 9. P. 5563.
2. Zhu X., Grütter P., Metlushko V., Ilic B. // J. Appl. Phys. 2002. V. 91, № 10. P. 7340.
3. Zhu X., Grütter P., Metlushko V., Ilic B. // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. P. 024423.
4. Fernandez A., Gibbons M.R., Wall M.R., Cerjan C.J. // J. Magn. Magn. Mater. 1998. V. 190. P. 71.
5. Fernandez A., Cerjan C.J. // J. Appl. Phys. 2000. V. 87, № 3. P. 1395.
6. Okuno T., Shigeto K., Ono T., Mibu K., Shinjo T. // J. Magn. Magn. Mater. 2002V. 240. P. 1.
7. Alexeev A.M., Verevkin Yu.V., Vostokov N.V., Petryakov V.N., Polushkin N.I., Popkov A.F., Salaschenko N.N. // JETP letters. 2001. № 73. P. 214 (in Russian).
8. Fraerman A.A., Gusev S.A., Mazo L.A., Nefedov I.M., Nozdrin Yu.N., Karetnikova I.R., Sapozhnikov M.V., Shereshevsky I.A., Sukchodoev L.V. // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. P. 064424-1 – 064424-5.
9. Polushkin N.I., Gribkov B.A., Mironov V.L. // Материалы совещания “Micro- and nano electronics - 2003”. Звенигород. 2003. Октябрь 6-10. P. 01-21.
10. <http://math.nist.gov/oommf>.