

Гистерезисные свойства наночастиц по данным магнитной силовой микроскопии

А.А. Бухараев¹, Д.В. Овчинников¹, Н.И. Нургазизов¹, Р. Вейзендангер²

¹*Казанский физико-технический институт КНЦ РАН, Казань, Россия*

²*Institut für Angewandte Physik, Hamburg, Deutschland*

e-mail: dovchinnikov@dionis.kfti.kcn.ru

В последнее время отмечается бурный рост систем цифровой записи информации. Несмотря на все большее применение сред, основанных на оптическом методе хранения, идет интенсивный поиск и исследование магнитных сред для записи и чтения информации. В связи с этим наблюдается повышенный интерес к магнитным поверхностным структурам нанометровых размеров, что объясняется их особыми магнитными свойствами, отличными от свойств массивных материалов. Для исследования подобных структур все чаще применяется метод сканирующей зондовой микроскопии. Этот метод находит столь широкое применение не только из-за своих уникальных характеристик в достижении сверхвысокого разрешения (вплоть до атомного) и высокой чувствительности, но и благодаря своим возможностям измерения различных свойств поверхности. Применяя иглу с магнитным покрытием, с помощью магнитного силового микроскопа (МСМ) можно исследовать магнитные свойства поверхностных структур с очень высоким разрешением.

В данной работе были проведены исследования магнитных свойств отдельно лежащих на поверхности кварцевого стекла частиц Ni, полученных методом коалесценции в результате отжига напыленной никелевой пленки. Определение формы и размеров частиц было проведено на основе полученных изображений топографии поверхности с помощью микроскопов NanoScope IIIa фирмы Digital Instruments и с помощью отечественного сканирующего зондового микроскопа Р4-SPM-18RM фирмы Нанотехнология-МДТ при работе в режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ). Оба прибора работали в колебательной моде, когда микрозонд с острой иглой колеблется вблизи своей резонансной частоты. Измерение сигнала магнитного контраста частиц Ni было проведено на микроскопе NanoScope IIIa. Магнитное изображение получалось при работе прибора в так называемом "лифтинг"-режиме. При таком режиме работы после измерения профиля поверхности вдоль одной из строк, данные о котором сохраняются в памяти компьютера микроскопа, управляемый компьютером микрозонд вновь движется вдоль этого же участка на определенной высоте над поверхностью, не касаясь ее и повторяя ее рельеф. При этом фаза (или амплитуда) колебаний микрозонда меняется только за счет сил магнитного взаимодействия магнитного материала иглы с магнитным полем образца. При магнитных измерениях использовались иглы из Si, на которые были

нанесены последовательно слои Fe (25 nm) и Cr (4 nm). Предварительное намагничивание иглы (вне микроскопа) проводилось вдоль ее оси, то есть перпендикулярно поверхности исследуемого образца. При проведении экспериментов по перемагничиванию блок сканирования микроскопа размещался между полюсами электромагнита так, что магнитное поле было направлено вдоль плоскости образца. Значения поля задавались в пределах от -300 до +300 Ое. При таких полях не наблюдались эффекты, связанные с перемагничиванием иглы МСМ.

Образцы с отдельно лежащими частицами никеля были получены по следующей методике. Сначала на подложку из кварцевого стекла была напылена пленка никеля. АСМ измерения показали, что такая пленка состоит из полностью покрывающих подложку, тесно соприкасающихся между собой островков металла. В результате отжига исходной пленки на подложке образуются изолированные частицы разного размера. Наблюдаемая трансформация пленки представляет собой автокоалесценцию, т.е. стягивание островков пленки в плоскости подложки и превращение их в изолированные частицы. Вероятно, наряду с автокоалесценцией при таком отжиге имеет место и обычная коалесценция, т.е. слияние маленьких частиц в более крупные. Средний размер частиц и их форма, а также дисперсия по размерам определяются параметрами и условиями напыления исходной пленки и последующего отжига. На рис.1а представлено АСМ-изображение участка поверхности одного из образцов после отжига исходной пленки в атмосфере водорода. Проведенный анализ АСМ-изображений показал, что почти все частицы с высотой менее 100 nm имеют форму, очень близкую к сферической.

Для исследования процессов перемагничивания в частицах Ni величина внешнего магнитного поля, приложенного вдоль поверхности образца, изменялась в интервале от +300 Ое до -300 Ое. Шаг изменения составлял 100 Ое. При различных значениях величины внешнего магнитного поля игла микроскопа находилась в одном и том же месте над поверхностью образца, что позволяло измерять магнитный сигнал от одного и того же участка поверхности в разных по величине и направлению полях. Как было показано в [1], МСМ-изображение частицы, обладающая однородной структурой намагниченности с направлением вдоль поверхности, при измерении иглой с общим магнитным моментом, направленным перпендикулярно поверхности (как и было на эксперименте), будет иметь характерный вид, представленный на рис.2а. На рис.1с и 1d видно, что многие частицы с размерами менее 70 nm в присутствии магнитного поля имеют магнитный сигнал, на основании которого можно сделать заключение, что эти частицы находятся в однодоменном состоянии и их общий вектор намагниченности выстроен вдоль поверхности по полю. Причем, при изменении направления внешнего поля на противоположное направление намагниченности частиц также меняется на

противоположное, т.е. они перемагничиваются.

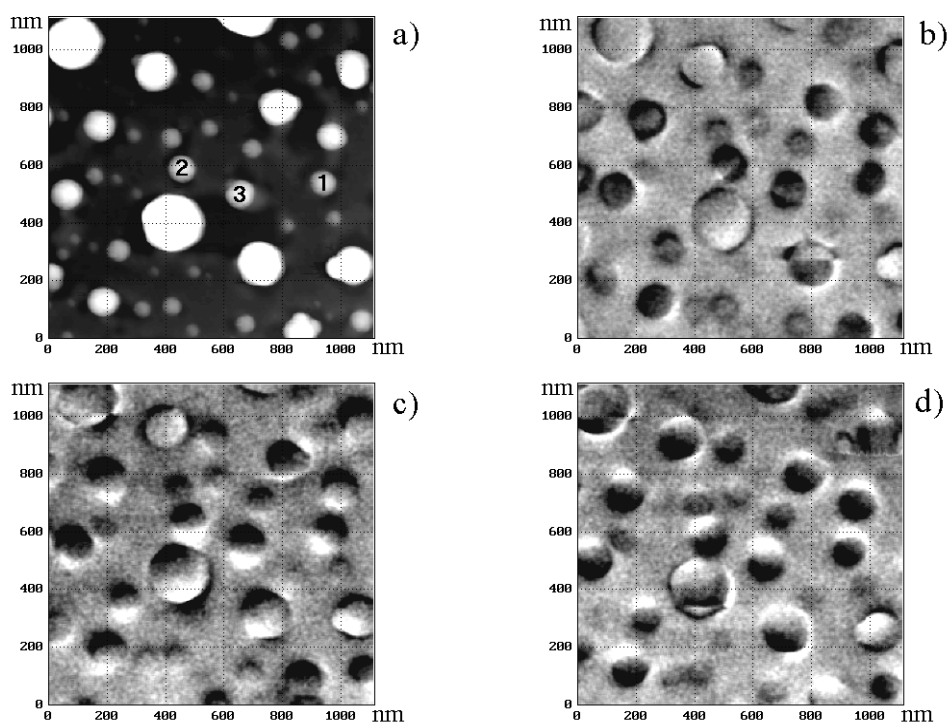


Рис.1. Процесс перемагничивания частиц Ni. а) - топография поверхности; б) - МСМ-изображение того же участка поверхности в отсутствие магнитного поля; в) и д) - МСМ-изображения того же участка поверхности в присутствии внешнего магнитного поля величиной 300 Ое соответственно: в) - в направлении оси Y и д) - в противоположном оси Y направлении.

Для исследования процесса перемагничивания частиц, были построены гистерезисные кривые. МСМ-изображения, полученные при разных величинах внешнего магнитного поля, обрабатывались с помощью специальных программ компьютерного анализа. Для определения относительной величины намагниченности частицы (которая прямо пропорциональна величине МСМ-сигнала, который в свою очередь определяется распределением градиента магнитных сил, действующих на иглу микроскопа) производилась процедура, схематично представленная на рис.2. За величину намагниченности бралась разность между максимальным и минимальным значениями отклика регистрирующей системы микроскопа над частицей.

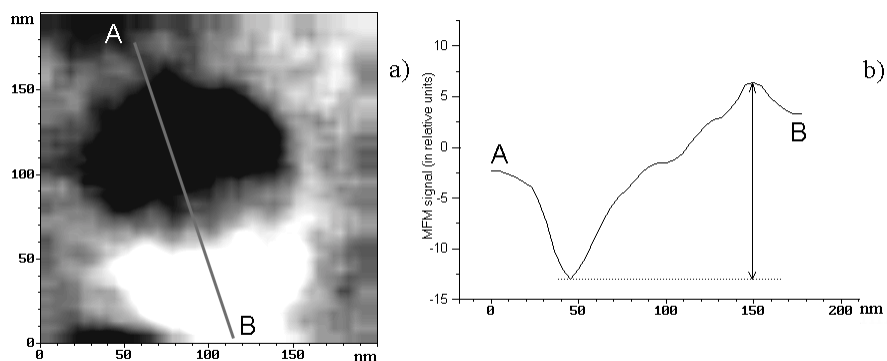


Рис.2. Процедура определения относительной величины намагниченности частицы. а) - MFM-изображение однодоменной частицы Ni в присутствии внешнего магнитного поля; б) - профиль магнитного контраста вдоль линии АВ.

Применяя вышеописанную процедуру для разных частиц на MFM-изображениях, полученных при разных величинах внешнего магнитного поля, можно построить гистерезисные кривые для отдельных частиц, отражающие особенности процесса их перемагничивания. На рис.3. приведены данные, полученные для трех частиц, отмеченных на рис.1а как 1,2,3. Кривая, приведенная на рис.3, отражает усредненный характер поведения частиц во внешнем магнитном поле. Из анализа приведенных гистерезисных кривых следует, что частицы Ni с размерами менее 70 nm и формой очень близкой к сферической являются однодоменными, что согласуется с теоретически рассчитанным критическим размером однодоменности [2-4], а также подтверждается экспериментальными результатами других исследователей [5-7]. Кроме того, надо обратить внимание, что намагниченность частиц вдоль поля (по оси Y) близка к насыщению уже при 100 Oe, что можно объяснить возможностью поворота вектора намагниченности по полю с достаточной легкостью по причине малого значения константы магнитной кристаллической анизотропии для Ni. Можно также сказать, что коэрцитивная сила вдоль выбранного направления не более 100 Oe. Для уточнения информации о величине коэрцитивной силы необходимы дальнейшие более точные эксперименты в полях от -100 Oe до +100 Oe.

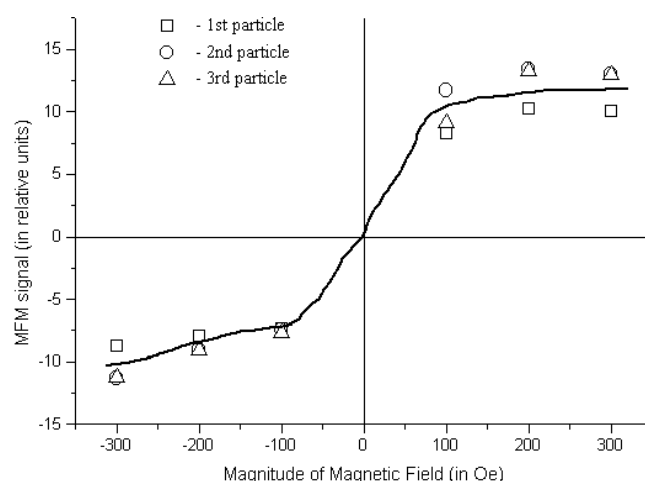


Рис.3. Гистерезисная кривая, усредненная по данным магнитной силовой микроскопии для трех точек, обозначенных на рис.1а.

Однако, полученные значения коэрцитивной силы для частиц никеля с размерами около 60 nm и формой близкой к сферической отличаются от полученных ранее другими исследователями [6,7]. Кроме того, из рис.1b видно, что магнитный контраст, характерный для частиц с вектором намагниченности, направленным вдоль поверхности, исчезает в нулевом поле. Наблюдаемое МСМ-изображение в нулевом магнитном поле можно объяснить тем, что частицы остаются однодоменными, но на структуру намагниченности внутри частицы оказывает влияние поле иглы микроскопа, и вектор намагниченности частицы начинает как бы "следить" за ходом движения иглы во время сканирования, находясь преимущественно в перпендикулярном плоскости образца направлении (рис.4а). Наличие внешнего магнитного поля величиной уже 100 Oe делает вклад поля иглы микроскопа пренебрежимо малым по сравнению с влиянием внешнего поля на структуру намагниченности внутри частицы (рис.4б).

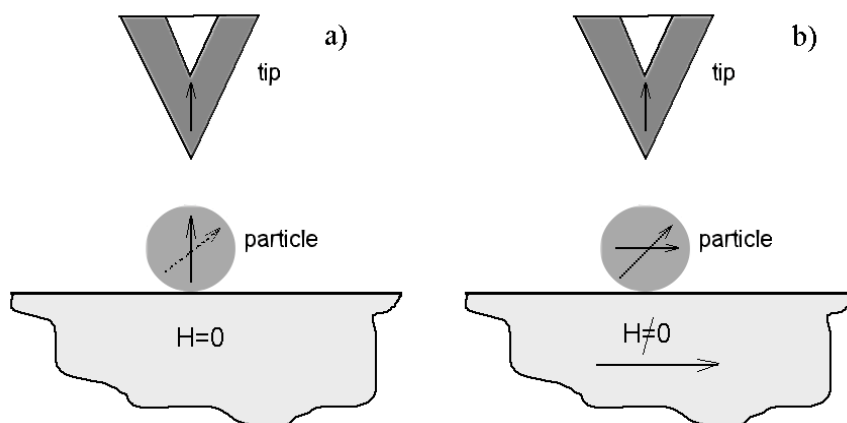


Рис.4. Влияние поля иглы микроскопа на магнитную структуру частицы никеля в отсутствие внешнего магнитного поля (а) и при его включении (б). Надо заметить, что данное объяснение подходит только для частиц, чья форма

очень близка к сферической. Однако, как было показано в [1], если возникает даже небольшое отклонение от сферичности, то за счет сил, вызванных анизотропией формы, общий вектор намагниченности частицы может быть удержан вдоль плоскости образца и влияние иглы становится пренебрежимо мало, а значит частицы никеля могут давать МСМ-сигнал и в отсутствие внешнего магнитного поля.

Как видно из рис.1а на образцах также присутствуют частицы с размерами и более 70 nm. Однако, МСМ-изображение таких частиц имеют более сложный магнитный контраст, что, возможно, объясняется наличием в них вихревых структур намагниченности. Дальнейшие более тщательные эксперименты с применением атомно- и магнитно-силового микроскопа с проведением компьютерного моделирования процесса получения МСМ-изображений и процесса перемангничивания позволят получить более достоверную информацию о внутренней структуре намагниченности и процессах перемангничивания, протекающих в таких частицах.

Таким образом, на основе полученных магнитных изображений отдельно лежащих частиц никеля, полученных методом коалесценции, в присутствии внешнего магнитного поля разной величины были построены гистерезисные кривые для некоторых частиц при перемангничивании вдоль плоскости. Оказалось, что поле иглы микроскопа вносит весомый вклад в процесс перемангничивания и установления равновесной структуры намагниченности частиц, что объясняет поведение гистерезисных кривых около нулевого поля. Частицы с размерами более 70 nm имеют более сложный магнитный контраст, что, возможно, объясняется наличием в них вихревых структур намагниченности.

Литература:

1. А.А. Бухараев, Д.В. Овчинников, Н.И. Нургазизов, Е.Ф. Куковицкий, М. Кляйбер, Р. Вейзендангер. ФТТ. **40**, 7, 1277 (1998).
2. Е.И. Кондорский. Известия АН СССР. Серия физическая. **42**, 8, 1638 (1978).
3. С.А. Непийко. Физические свойства малых металлических частиц. Наукова Думка. Киев. (1985), 245 с.
4. Ю.И. Петров. Кластеры и малые частицы. Наука. М. (1986), 386 с.
5. Б.В. Васильев, А.А. Поцелуйко, В.Г. Пынько. ФММ. **55**, 5, 1026 (1983).
6. Y. Du, M. Xu, J. Wu, Y Shi, H. Lu. J.Apll.Phys. **70**, 10, 5903 (1991).
7. W. Gong, H. Li, Z. Zhao, J. Chen. J.Apll.Phys. **69**, 8, 5119 (1991).