

Формирование двумерных упорядоченных магнитных нанорешеток в опаловых структурах

С. И. Божко¹⁾, И. Г. Науменко, Э. Н. Самаров, В. М. Масалов, Г. А. Емельченко, А. М. Ионов, Д. А. Фокин

Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Московской обл., Россия

Поступила в редакцию 2 августа 2004 г.

После переработки 30 августа 2004 г.

Разработан метод формирования двумерной упорядоченной сверхрешетки магнитных наночастиц на плотноупакованных опаловых структурах сфер диоксида кремния SiO_2 . В качестве магнитных частиц использовали нанопорошок никеля со средним размером частиц около 70 нм. Методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии показано, что все магнитные частицы располагаются в междоузлиях опаловой решетки, при этом величина и направление вектора намагниченности у соседних частиц никеля могут иметь различные значения.

PACS:

В последние годы наблюдается повышенный интерес к созданию наноструктурных материалов благодаря их перспективности в технологических приложениях, в частности, в электронных, оптических, магнитных и микромеханических системах [1]. Активно исследуются свойства магнитных наночастиц, кластеров и их ансамблей в рамках поисков эффективных сред для магнитной записи [2–5]. Одним из часто используемых подходов к изготовлению наноструктур является матричный метод. Он основан на заполнении теми или иными веществами правильных решеток пустот в природных или искусственных матрицах-кристаллах цеолитов, асбестов, опалов. В литературе такой подход называют методом шаблонов (template synthesis or templated precipitation) [6, 7]. Этот подход с использованием синтетического опала был предложен Богомолковым с соавторами [8]. Синтетические опалы представляют собой плотнейшие кубические упаковки одинаковых SiO_2 шаров с диаметрами от десятков до нескольких тысяч нанометров. Как известно, в плотнейших упаковках присутствуют так называемые тетраэдрические и октаэдрические пустоты (их размер около $0.2D_{\text{SiO}_2}$ и $0.4D_{\text{SiO}_2}$, соответственно, где D_{SiO_2} – диаметр SiO_2 сфер), сообщающиеся между собой через “окна” диаметром около $0.15D_{\text{SiO}_2}$. В настоящей работе реализован метод приготовления двумерной упорядоченной сверхрешетки магнитных наночастиц путем ультразвукового напыления суспензии этих частиц на опаловую структуру из плотноупакованных упорядоченных сфер диоксида кремния SiO_2 . Этот метод является модификацией способа, предло-

женного в [9] и названного методом “природной литографии” с использованием однослойных пленок из полимерных сфер в качестве масок. Авторы работы [10] расширили этот метод и на двухслойные маски, назвав его “наносферной литографией”. Предложенная нами модификация метода отличается способом нанесения наночастиц на маску (УЗ – распыление) и имеет преимущество перед другими, если требуется распылить заранее приготовленные наночастицы. Для нанесения частиц из жидкой суспензии этот способ является наименее затратным по времени и простым в исполнении. Кроме того, при таком подходе есть возможность управлять размером и формой наночастиц независимо от параметров маски.

В качестве магнитных частиц использовали нанопорошок никеля со средним размером около 70 нм. Частицы никеля в таком порошке являются однодоменными монокристаллами [11]. Топография, микроструктура и магнитная структура полученных нанорешеток Ni изучены методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии (АСМ и МСМ).

Экспериментальная часть. Порошок никеля со средним линейным размером частиц 70 нм получали методом испарения – конденсации из никеля с общим содержанием примесей менее 0.01% в потоке гелия [12]. Частицы порошка имели характерную для этого метода сферическую форму. Анализ электронно-микроскопических изображений частиц показал, что в них отсутствуют дислокации и в среднем лишь в одной частице из 600 присутствуют дефекты, которые можно отнести к двойникам роста.

Для нанесения частиц никеля на пленку опала мы пользовались методикой, применяемой в просвечивающей электронной микроскопии для проведения

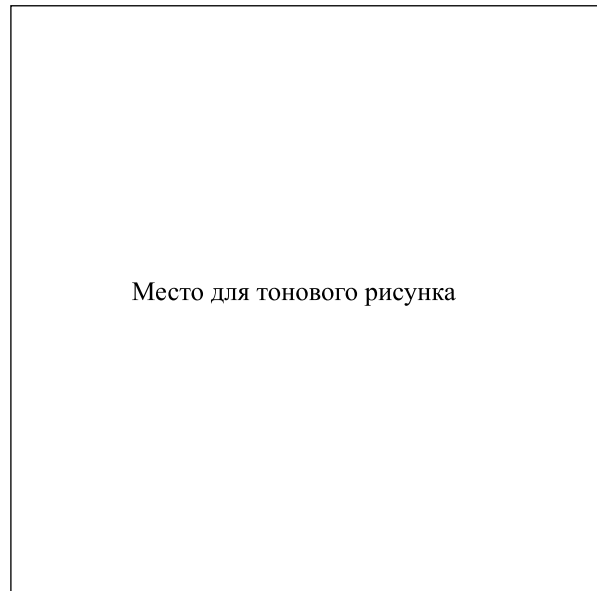
¹⁾e-mail: bozhko@issp.ac.ru

исследований микрочастиц. Суспензия частиц Ni в спирте распылялась ультразвуковым диспергатором на поверхность опаловой пленки. Варьируя частоту и мощность, подаваемую на диспергатор, а также концентрацию частиц Ni в суспензии, можно обеспечить условия напыления, при которых на поверхность опаловой пленки в каждом элементе площади, приходящемся на одно междоузлие, будет осаждаться приблизительно по одной частице Ni.

Исследования упаковки опаловых сфер в плоской решетке пленки и расположения напыленных магнитных частиц Ni в опаловой решетке проводили на зондовом микроскопе Smeпа производства NT MDT. Исследования проводили по двухпроходной методике с одновременной регистрацией рельефа поверхности в полуконтактном режиме (режим АСМ) и магнитного контраста (режим МСМ). В качестве зонда использовали кантилеверы той же фирмы NSG11S с магниточувствительным покрытием. Резонансная частота составляла 148.363 кГц, добротность 295. Магнитный контраст регистрировался на втором проходе. Траектория кантилевера, отведенного от поверхности на 214 нм относительно первого прохода, повторяла рельеф поверхности, амплитуда колебаний составляла 47 нм. Регистрировался сигнал, пропорциональный сдвигу фазы колебаний кантилевера, обусловленному магнитным взаимодействием с частицами Ni.

Нанесение частиц Ni описанным выше способом приводило к тому, что частицы располагались как в междоузлиях, так и на поверхности опаловых сфер. Магнитные частицы удалялись с поверхности шариков для получения упорядоченного массива частиц Ni в междоузлиях. Это достигалось помещением образца в градиент магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом SmCo₅. Во втором варианте проводили многократное сканирование магнитным кантилевером в АСМ режиме, при этом частицы Ni притягивались к зонду и затем удалялись с его поверхности при помещении зонда в градиент магнитного поля.

Результаты. На рис.1 представлены наложенные АСМ и МСМ изображения одного и того же участка поверхности опаловой пленки с нанесенными частицами Ni. АСМ изображение показывает рельеф поверхности опаловой пленки, который представляет собой упорядоченную структуру сфер SiO₂. Измеренные бездефектные участки опаловой пленки упорядоченных сфер SiO₂ достигали размера 100 мкм. МСМ изображение на рис.1 показывает периодическое расположение магнитных кластеров треугольной формы различного размера. Суперпозиция АСМ и МСМ изображений демонстрирует корреляции распо-



Место для тонового рисунка

Рис.1. Суперпозиция АСМ и МСМ изображений упорядоченной опаловой пленки (размер опалового шарика 260 нм) с нанесенными на нее мелкодисперсными частицами никеля

ложения магнитных частиц и междоузлий опаловой структуры. Все магнитные частицы располагаются в междоузлиях опаловой решетки.

Из МСМ изображения следует, что наряду с магнитными образованиями, частично повторяющими форму полостей в междоузлиях опаловой решетки (треугольники), присутствуют и единичные частицы Ni. По-видимому, каждое из треугольных магнитных образований состоит из нескольких частиц Ni малого размера. Высокое пространственное разрешение в МFM режиме (около 60 нм) может быть обусловлено когерентными эффектами или особенностями работы в этом режиме. В частности, кантилевер вблизи магнитных частиц, повторяя рельеф опаловой пленки на втором проходе, имеет значительную составляющую перемещения в направлении градиента магнитного поля, что может приводить к эффективному повышению пространственного разрешения магнитных частиц в области междоузлий.

На рис.2 представлены сечения АСМ и МСМ изображений плоскостью, проходящей через междоузлия опаловой решетки. Положение особенностей на верхней кривой (сечение МСМ изображения) с хорошей точностью совпадает с минимумами на нижней кривой (сечение АСМ изображения), соответствующими положениям междоузлий. Однако в сечении АСМ изображения (рельефа поверхности) не обнаружены особенности, связанные с частицами Ni, на-

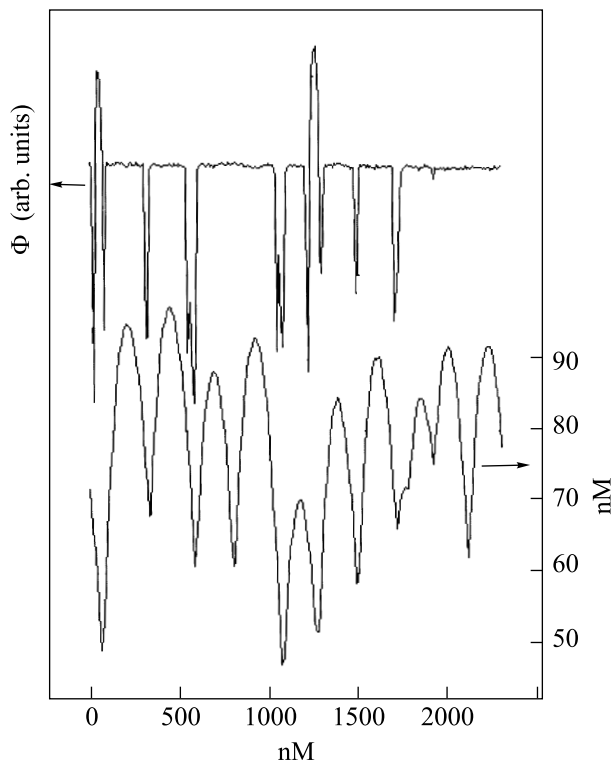


Рис.2. Нижняя кривая – сечение рельефа АСМ изображения плоскостью, перпендикулярной плоскости рисунка. Верхняя кривая – сечение МСМ изображения плоскостью, перпендикулярной плоскости рисунка. Черная линия на рис 1 указывает на положение секущей плоскости

ходящимися на верхнем слое опаловой матрицы, то есть частицы Ni “провалились” на один слой опаловых сфер вниз. В упорядоченной структуре магнитных частиц присутствуют дефекты – некоторые междоузлия оказались незаполненными магнитными частицами. По-видимому, это связано с тем, что средний размер распыляемых частиц совпадал с максимальным диаметром шара, который мог пройти через треугольную пору междоузлия без нарушения упорядоченной структуры шаров. Частицы большего размера при распылении попадали в область междоузлия и препятствовали попаданию более мелких частиц под верхний слой опаловых сфер. Улучшение структурного совершенства магнитной системы может быть достигнуто распылением суспензии более мелких магнитных частиц. На верхней кривой сечения особенности, связанные с изображением магнитных частиц, имеют различную полярность и амплитуду. Это связано с тем, что величина и направление вектора намагниченности у соседних частиц Ni имеют разные величины и направления.

Таким образом, в рамках данной работы разработан метод создания упорядоченных массивов магнитных частиц. Параметр сверхрешетки задается диаметром сфер диоксида кремния опаловой структуры и может изменяться в широких пределах (50 нм – 5 мкм). Подобные упорядоченные решетки могут иметь технологические применения, например, в качестве элементов будущих магнитных ячеек памяти при соответствующей разработке систем подачи и снятия сигналов или для создания упорядоченных массивов наноэмиттеров. Представляет интерес использование подобных структур на поверхности двумерного электронного газа для исследования свойств электронной системы в присутствии периодического магнитного поля заданной трансляционной симметрии. Разработка данной методики и методики манипулирования отдельными опаловыми шарами открывает широкие перспективы для формирования структур с заданной конфигурацией магнитного поля в нанометровых масштабах, в частности, для создания спинового полевого транзистора.

Работа выполнена при поддержке ИНТАС (проект # 2002-796), Российского фонда фундаментальных исследований (проект # 01-02-97024) и Минпромнауки РФ (контракт # 40.012.1.1.11.54).

1. *Engineering a Small World: From Atomic Manipulation to Microfabrication*, special section of *Science* **254**, 1300 (1991).
2. V. F. Puntes, P. Gorostiza, D. M. Aruguete et al., *Nature Materials* **3**, 263 (2004).
3. A. S. R. Ogale and S. B. Kofinas, *IEEE Transactions on Magnetics* **39**, 2198 (2003).
4. S. Takenoiri, Y. Sakai, K. Enomoto et al., *IEEE Transactions on Magnetics* **39**, 2279 (2003).
5. V. B. Bregar, *IEEE Transactions on Magnetics* **39**, 1679 (2003).
6. C. R. Martin, *Science* **266**, 1961 (1994).
7. H. Yan, C. F. Blanford, B. T. Holland et al., *Adv. Mater.* **11**, 1003 (1999).
8. V. N. Astratov, V. N. Bogomolov, A. A. Kaplyanskii et al., *Il Nuovo Cime.* **17D**, 1349 (1995).
9. H. W. Deckman and J. H. Dunsmuir, *Appl. Phys. Lett.* **41**, 377 (1982).
10. J. C. Hulthén and R. P. Van Duyne, *J. Vac. Sci. Technol.* **A13**, 1553 (1995).
11. А. А. Бухараев, Д. В. Овчинников, Н. И. Нургазизов и др., *ФТТ* **40**, 1277 (1998).
12. М. Я. Ген, А. В. Миллер, *Поверхность, ФХМ* № 12, 150 (1983).