

05;12

Оптимизация параметров зонда магнитного силового микроскопа для проведения измерений с высоким разрешением

© Н.И. Нургазизов, П.А. Ждан, Д.В. Овчинников

University of Surrey, Surrey, UK

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, Россия

E-mail: n.nurgazizov@surrey.ac.uk

В окончательной редакции 14 ноября 2007 г.

С помощью компьютерного моделирования проведена оценка разрешающей способности различных магнитных зондов в зависимости от их геометрической формы и количества магнитного материала, нанесенного на них. Экспериментальным путем установлена минимальная толщина пленки кобальта, которую необходимо нанести на поверхность немагнитной иглы с нитевидным кристаллом на конце для получения магнитного изображения. Показано, что иглы с нитевидным кристаллом на конце, покрытые тонкой магнитной пленкой, могут иметь разрешение, сопоставимое с иглами с магнитной наночастицей на конце при существенно более простой процедуре приготовления.

PACS: 75.70.AK, 85.70.Kh

Разрешающая способность зонда магнитно-силового микроскопа (МСМ) в первую очередь определяется геометрическими параметрами его магнитной части. Считается, что наиболее оптимальным является зонд, представляющий собой немагнитную иглу с магнитной наночастицей, закрепленной на кончике. В качестве такой частицы можно прикрепить к кончику иглы магнитную нанопроволоку [1] или нанотрубку, покрытую магнитным материалом [2]. При другом подходе со стандартного зонда стравливается весь магнитный материал отовсюду, кроме кончика иглы. Кончик на время ионного травления защищается маской [3–5]. При этом в зависимости от метода создания маски варьируются размеры получаемых на кончике иглы магнитных частиц и соответственно разрешение полученного зонда. Лучшее магнитное

разрешение (около 10 nm) было получено для зонда, на котором была сформирована наночастица из CoCr [5].

Основным вопросом, на который мы попытались ответить в данной работе, был вопрос о необходимости создания частицы на кончике иглы. Так ли она нужна или можно ограничиться нанесением тонкой магнитной пленки на немагнитный кантиливер, если известно [6], что основной вклад в получаемое магнитное изображение вносит часть иглы, удаленная от магнитного образца на расстояние до 200 nm? Понятно, что толщину пленки можно сделать существенно ниже размеров наночастицы в плоскости образца и таким образом уменьшить латеральные размеры кончика иглы, что может позволить улучшить магнитное разрешение иглы. В данной работе при помощи теоретического моделирования мы оценили разрешение магнитных зондов различного типа и далее экспериментальным путем установили минимальную толщину пленки, необходимую для получения магнитного изображения.

Для моделирования магнитной разрешающей способности МСМ зонда использовалась программа, подробно описанная в работе [6]. Она позволяет моделировать трехмерное изображение, получаемое МСМ с учетом формы и магнитных свойств зонда. При проведении расчетов используется формализм Брауна, когда все магнитное покрытие иглы разбивается на малые области с одинаковым размером и каждая область заменяется точечным диполем. Для упрощения расчетов взаимное влияние иглы и образца на структуру намагниченности друг друга во время движения иглы над образцом не учитывается. Во время проведения расчетов мы предполагали, что игла намагничена равномерно и перпендикулярно поверхности исследуемого образца. Так как было показано, что основной вклад в получаемое магнитное изображение вносит часть иглы, находящаяся на расстоянии не более 200 nm к исследуемой поверхности [6], то мы решили, что при проведении моделирования можно учесть только вклад от магнитного покрытия иглы, удаленного не более чем на 700 nm от поверхности. В качестве тестовой структуры, по которой оценивалась разрешающая способность иглы, использовался магнитный диполь, лежащий на гладкой немагнитной поверхности и намагниченный вдоль плоскости образца.

Были исследованы пять типов магнитных модельных зондов. Первый тип — это модель коммерческого магнитного зонда, которая представляет собой кремниевую иглу, покрытую магнитным материалом. При расчетах мы принимали, что такая игла имеет угол схождения

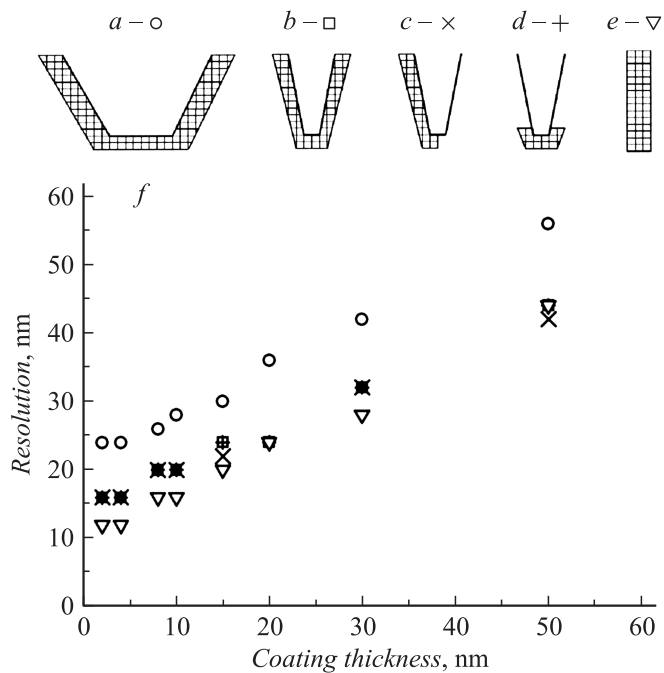


Рис. 1. *a, b, c, d, e* — схематическое изображение двумерных проекций иглонок, использовавшихся при моделировании. *f* — результаты расчета разрешающей способности этих игл при различной толщине нанесенного материала.

при вершине 40° и радиус закругления 20 nm. Такая игла аппроксимировалась усеченным конусом с шириной усеченной части, равной удвоенному радиусу закругления иглы (рис. 1, *a*). При проведении расчетов изменялась толщина магнитного покрытия, нанесенного на такую иглу. Второй тип зонда — это игла с нитевидным кристаллом на конце, полностью покрытая магнитным материалом. Соответственно угол схождения нитевидного кристалла брался равным 10° , радиус закругления 5 nm (рис. 1, *b*), высота нитевидного кристалла 700 nm. Третий тип зонда — это нитевидный кристалл, покрытый магнитным материалом только с одной стороны (рис. 1, *c*). Четвертый тип — это нитевидный кристалл с наночастицей из магнитного материала на кончике (рис. 1, *d*). Пятый тип — это зонд, представляющий собой

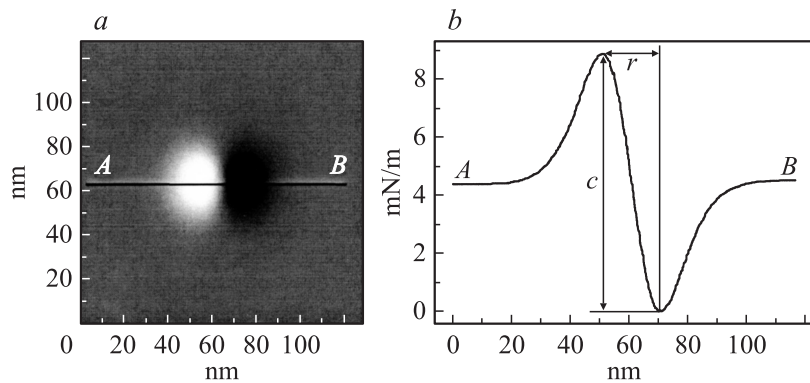


Рис. 2. Модельное МСМ-изображение точечного диполя (*a*). Игла намагничена вдоль оси, перпендикулярной плоскости образца, магнитный момент диполя направлен вдоль поверхности. Профиль, проведенный через центр диполя для оценки разрешающей способности иглы (*b*): *r* — разрешение иглы, *c* — магнитный контраст, наблюдаемый иглой.

магнитную нанопроволоку. Такой зонд при расчетах аппроксимировался цилиндром из магнитного материала (рис. 1, *e*).

МСМ-изображение точечного диполя, получаемое при расчетах, приведено на рис. 2, *a*. Все расчеты были выполнены при перемещении иглы на высоте 10 nm над поверхностью. Изменение разрешающей способности зонда в зависимости от формы зонда и толщины его магнитного покрытия представлено на рис. 1, *f*. За разрешающую способность иглы мы принимали расстояние между максимальным и минимальным значением градиента силы взаимодействия иглы и точечного диполя (рис. 2, *b*). При этом получаемое магнитное разрешение может быть существенно ниже линейных размеров кончика иглы, так как в формировании изображения участвует только магнитная часть микрозонда.

Исходя из полученных кривых (рис. 1, *f*), можно говорить, что за счет уменьшения толщины пленки можно существенно улучшить разрешающую способность иглы. Кроме того, получаемое разрешение также зависит от формы кончика микрозонда при одинаковой толщине нанесенной магнитной пленки, т. е. чем более острая игла используется, тем более высокое разрешение получается. В идеальном случае, когда

радиус закругления иглы и угол схождения иглы при вершине равны нулю (это пятый тип игл — цилиндр из магнитного материала), мы получаем наилучшее разрешение.

Латеральные размеры магнитных наночастиц, используемых для изготовления магнитных зондов, имеют размеры порядка 10–20 нм. Соответственно, если на немагнитную иглу нанести слой магнитного материала толщиной 5 нм или меньше, то разрешение таких игл будет лучше, чем разрешение иглы с нанопроволокой на конце при ее радиусе 10 нм. Поэтому было необходимо экспериментальным путем определить минимальную толщину магнитной пленки, наносимой на поверхность микрозонда, при которой возможно получать устойчивое изображение при помощи МСМ.

Эксперименты с реальными иглками были выполнены с помощью сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) Smena и Solver HV фирмы NT MDT, которые работали в полуконтактном режиме. Для нанесения магнитного покрытия нами использовались кремниевые иглы NSG03 и NSG01 фирмы NT MDT и иглы FESP-10 фирмы Nanoprobe. Часть игл NSG03 имела выращенный на конце нитевидный кристалл высотой около $1\ \mu\text{m}$, с углом схождения при вершине 10° и радиусом закругления кончика 5 нм. В качестве материала для магнитного покрытия использовался кобальт. Для защиты кобальта от окисления на него сверху напылялась пленка хрома толщиной 3 нм. Напыление проводилось методом магнетронного распыления в атмосфере аргона. Чип с кантиливером, на который проводилось напыление, устанавливался таким образом, чтобы напыление материала происходило только на одну сторону иглы. Толщина пленки при нанесении контролировалась с помощью кварцевого датчика и после проверялась при помощи СЗМ. Расхождение в полученной обоими методами толщине пленок составляло не более 20%. Для проверки разрешающей способности полученных игл использовался магнитный диск с размерами бита около $300 \times 40\ \text{nm}$. Для оценки чувствительности игл применялся другой магнитный диск с размерами отдельного бита около $5 \times 1\ \mu\text{m}$.

С помощью игл NSG03 с толщиной пленки Co 2 нм были получены магнитные изображения поверхности на винчестере для оценки чувствительности. На винчестере для оценки разрешающей способности магнитного изображения не наблюдалось. При толщине пленки 4 нм можно было оценивать и разрешающую способность иглы. Экспериментальные результаты разрешающей способности игл в зависимости от

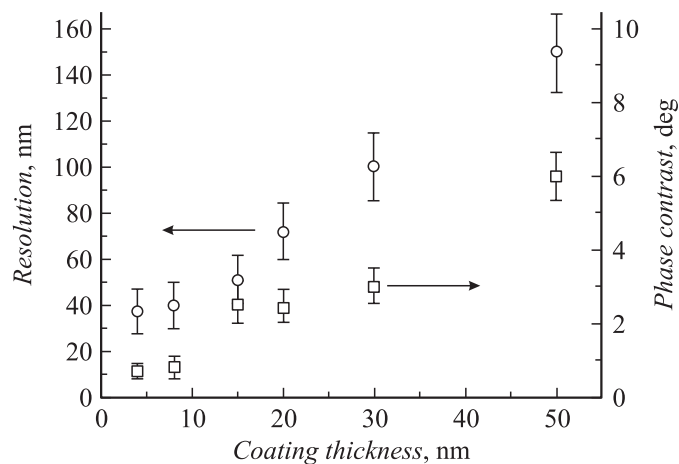


Рис. 3. Экспериментальная зависимость разрешающей способности (левая шкала, кружочки на графике) и фазового контраста (правая шкала, квадратики) иглы с нитевидным кристаллом на конце от толщины нанесенной на нее пленки Co.

толщины нанесенной магнитной пленки приведены на рис. 3. Худшие значения разрешения, полученные для реальных игл, скорее всего, связаны с конечными размерами магнитных доменов, расположенных на винчестере. В пользу этого говорит и тот факт, что после снижения значения разрешения до 40 nm на тестовом образце дальнейшего уменьшения разрешения не происходит.

Получаемый на изображении фазовый контраст, который характеризует чувствительность иглы, также зависит и от силовой константы используемого кантиливера. Мы сравнили три типа кантиливеров с различными значениями чувствительности: NSG03 (силовая константа 1 N/m, резонансная частота 90 kGz), NSG01 (5 N/m, 120 kGz), FESP-10 (0.6 N/m, 75 kGz). Магнитное изображение наблюдалось: на кантиливерах типа NSG03 при толщине пленки Co 2 nm, на NSG01 при толщине 4 nm. Для получения магнитного изображения кантиливерами FESP-10 также требовалась пленка толщиной 2 nm, однако такие иглы часто вели себя нестабильно при проведении измерений в полуконтактном режиме.

Таким образом, можно говорить о том, что магнитные зонды на основе кремниевых игл с нитевидным кристаллом на конце позволяют

получать магнитное изображение при толщине пленки кобальта 4 nm, при использовании кантиливеров с силовой константой около 1 N/m. Такие зонды, согласно теоретическим расчетам, должны обладать разрешением, аналогичным разрешению зондов с магнитной нанопроволокой на конце диаметром 8 nm. При этом зонды с нитевидным кристаллом на конце имеют существенно более простую процедуру приготовления и более длительное время жизни за счет большей механической прочности нитевидного кристалла по сравнению с нанопроволокой.

Работа выполнена в рамках проекта Nanospin, контракт № NMP4-CT-2004-013545.

Список литературы

- [1] *Yang G., Tang J., Kato S., Zhang Q., Qin L.C., Woodson M., Liu J., Kim J.W., Littlehei P.T., Park C., Zhou O.* // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. P. 123507.
- [2] *Winkler A., Muhl T., Menzel S., Kozuharova-Koseva R., Hampel S., Leonhardt A., Buchner B.* // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. P. 104905.
- [3] *Liou S.* // *IEEE Trans. Magn.* 1999. V. 35. P. 3989.
- [4] *Leinenbach P., Memmert U., Schelten J., Hartmann U.* // *Appl. Surf. Sci.* 1999. V. 144–145. P. 492.
- [5] *Koblischka M.R., Hartman U., Sulzbach T.* // *Thin Solid Films.* 2003. V. 428. P. 93.
- [6] *Овчинников Д.В., Бухараев А.А.* // *ЖТФ.* 2001. Т. 71. В. 8. С. 85.