

05

## **Прецизионные измерения магнитострикции в никелевых структурах, используемых для получения магниторезистивных наноконтактов**

© Р.Г. Гатиятов, П.А. Бородин, А.А. Бухараев, Д.А. Бизяев

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН  
E-mail: a\_bukharaev@kfti.knc.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2006 г.

Атомно-силовой микроскоп, специально изготовленный из немагнитных материалов, позволил зарегистрировать изменение размеров никелевой микропроволоки в магнитном поле всего на 2 nm. На основании таких прецизионных измерений сделан вывод, что гигантское магнитосопротивление Ni наноконтактов, электрохимически полученных между Ni микропроводами, обязано в значительной степени относительному смещению микропроводов за счет магнитострикции. Аналогичные измерения для нанопленок Ni не выявили подобных смещений в пределах чувствительности измерений, поэтому пленочные наноструктуры наиболее пригодны для получения магниторезистивных наноконтактов с минимальным вкладом магнитострикции.

PACS: 75.75.+a

Наноконтакты, обладающие гигантским магнитосопротивлением (ГМС), вызывают большой интерес в связи с возможностью их использования в устройствах записи, хранения и обработки информации или в качестве высокочувствительных магнитных сенсоров. В будущем они могут стать основой для создания элементной базы спинтроники — нового перспективного направления современной электроники [1].

Экспериментально ферромагнитные наноконтакты с ГМС в сотни и даже тысячи процентов были получены двумя способами: путем электрохимического осаждения никеля между двумя никелевыми микропроводами, образующими T-образную геометрию [2–5], или посредством механического сближения двух заостренных никелевых микропроводов [3].

Недавно в ряде экспериментальных работ было показано, что ГМС в таких наноконтактах обусловлен не баллистическим транспортом электронов (как предполагалось ранее [2,3]), а магнитомеханическими эффектами, приводящими к смещению микропроволок относительно друг друга под действием приложенного магнитного поля [4–7]. Возникающие смещения приписывают, в первую очередь, магнитострикции. Кроме того, поскольку для закрепления микропроволок на подложке обычно используют эпоксидную смолу, то, в силу ее сравнительно невысокой жесткости, заметные смещения микропроволок возможны из-за их взаимного притяжения друг к другу или к полюсам электромагнита при включении магнитного поля [4,7]. В результате магнитомеханических смещений сопротивление наноконтакта в магнитном поле может меняться за счет изменения его площади или разрыва. Эффект ГМС в наноконтактах, сформированных электрохимически между микропроводами, сохраняется недолго (десять минут или несколько часов).

Очевидно, что получение стабильных магниторезистивных наноконтактов с эффектом ГМС, обусловленным преимущественно баллистическим транспортом поляризованных электронов, возможно только в структурах с минимальной магнитострикцией, т.е. тогда, когда относительное смещение ферромагнитных „берегов“, между которыми формируется наноконтакт („наномостик“), будет порядка межатомного расстояния. В связи с этим в последнее время магниторезистивные наноконтакты формируют в планарных структурах, в которых из-за высокой адгезии ферромагнитной нанопленки к немагнитной подложке влияние магнитострикции на геометрические параметры наноконтакта должно быть минимальным [8].

Главной целью данной работы было измерить с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) с максимальной точностью изменение под действием магнитного поля ширины зазора в никелевых структурах на основе микропроволок и нанопленок, в которых можно сформировать наноконтакты с ГМС.

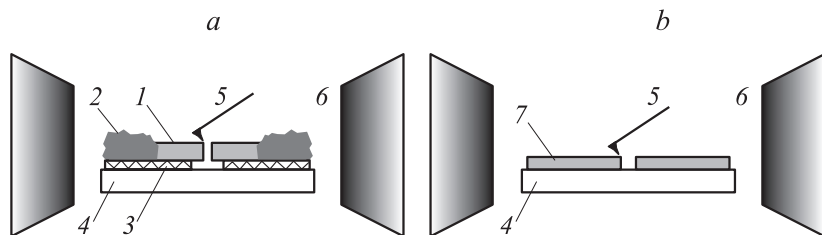
Для этого использовался АСМ марки SMENA (фирмы НТ-МДТ), специально сделанный из немагнитных материалов и совмещенный нами с электромагнитом, обеспечивающим в плоскости образца поле до 2500 Ое. Описание этой установки приведено в работе [9]. Ранее АСМ уже использовался для подобных целей, при этом минимальное смещение, которое удавалось надежно зарегистрировать, составляло

50 nm [10]. Нам же за счет жесткой фиксации образца и использования немагнитного АСМ удалось надежно регистрировать индуцированные магнитным полем смещения величиной всего в 2 nm. При этом, как показали многочисленные эксперименты, немагнитная подложка образца при включении магнитного поля не сдвигалась относительно зонда АСМ.

Первый тип исследованных образцов представлял собой разрезанную приблизительно пополам микропроволоку Ni диаметром 120  $\mu\text{m}$ , закрепленную оловянным припоем к неконтактирующим между собой медным подложкам (рис. 1, *a*). Согласно нашим предыдущим исследованиям [4], оловянный припой уменьшает величину магнитно-механических смещений микроволокон за счет их более жесткой фиксации на подложке. Длина свободного (незакрепленного) конца микроволокон не превышала 1 mm. С помощью специальной компьютеризированной установки между свободными концами микроволокон были сформированы наноконтакты с ГМС до 20% путем электрохимического осаждения Ni по методике, описанной в работах [2,4]. Максимальное изменение сопротивления наноконтакта (от 840 до 680  $\Omega$ ) наблюдалось при изменении поля от 0 до 70 Oe. Время „жизни“ таких наноконтактов составляло порядка 10 min. Причем в течение первых двух минут после формирования наноконтакта эффект ГМС в нем был положительным, а затем становился отрицательным [5]. В этом они существенно отличаются от ранее полученных нами наноконтактов, в которых для закрепления микроволокон использовался эпоксидный клей и которые обладали только положительным ГМС величиной до 1000% [4].

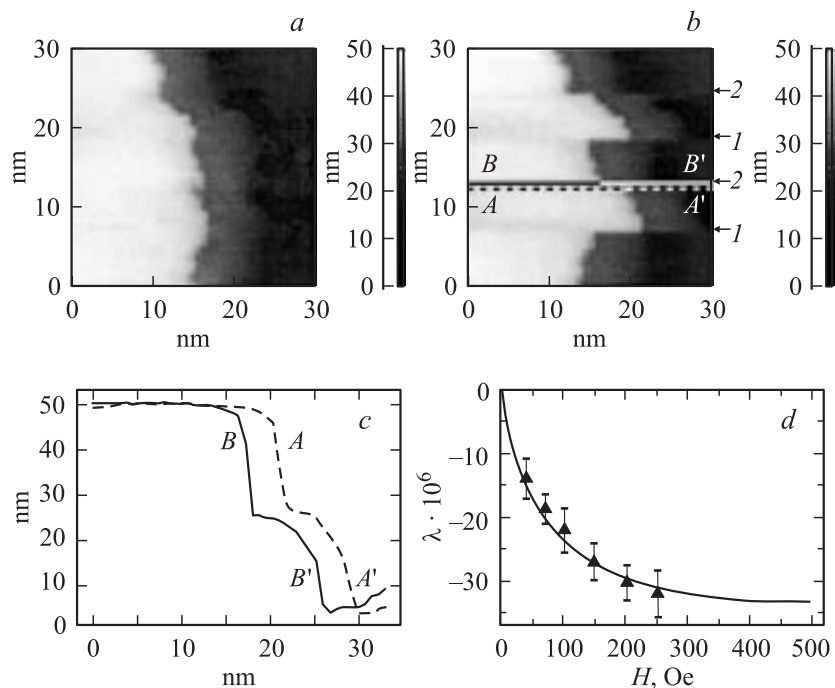
Второй тип образцов — это планарные структуры, потенциально пригодные для получения в них наноконтактов. Они представляли собой пленки Ni толщиной от 40 до 350 nm, разделенные непроводящим зазором шириной около 20  $\mu\text{m}$ , которые были получены методом электрохимического осаждения на медную подложку или методом термического испарения в вакууме на поверхность MgO. Схематический вид этих образцов и их положение между полюсами электромагнита приведены на рис. 1, *b*.

Сканирование в АСМ осуществлялось в полуконтактном режиме на краю никелевой микропроволоки или пленки. При этом выбирался относительно неровный участок поверхности образца с рельефом в виде ступеньки, по которой легче всего фиксировать смещение образца



**Рис. 1.** Схемы размещения образцов микропроволок (a) и пленок (b) Ni в атомно-силовом микроскопе, совмещенном с электромагнитом: 1 — микропроволоки Ni, 2 — олово, 3 — слой Cu, 4 — подложка, 5 — кантилевер АСМ, 6 — полюса электромагнита, 7 — пленка Ni.

под действием магнитного поля (рис. 2, a). Во время сканирования образца периодически включалось и выключалось магнитное поле. При изменении поля сдвиг образца отражался на его АСМ изображении в виде характерного смещения изображения поверхности вдоль направления изменения поля (рис. 2, b). Лучше всего такой сдвиг заметен при сравнении двух близких профилей поверхности, полученных без магнитного поля и в поле (рис. 2, c). Усредненное значение смещения магнитной микропроволоки (относительно немагнитной подложки) получали путем статистической обработки не менее 50 измерений на каждом образце. Погрешность измерений не превышала 20%. Из этих данных, зная длину незакрепленной припоем части микропроволоки, были получены коэффициенты магнитострикции микропроволоки Ni для разных значений приложенного магнитного поля, которые в виде отдельных точек приведены на рис. 2, d. Полученные нами экспериментальные значения хорошо совпадают с известной зависимостью коэффициента магнитострикции никеля от магнитного поля [11], приведенной в виде сплошной линии также на рис. 2, d. Это означает, что в наноконтактах, сформированных электрохимически в образцах первого типа, при увеличении магнитного поля от 0 до 70 Oe, зазор между микропроводами за счет магнитострикции увеличивается приблизительно на 30 nm. Однако магниторезистивные свойства таких наноконтактов (в частности, смена знака ГМС со временем) не могут быть объяснены только за счет магнитострикции. Можно предположить, что ГМС в данной структуре обусловлен более сложным механизмом, включающим магнитострикцию и баллистический транспорт электро-



**Рис. 2.** Результаты измерения смещений никелевой проволоки под действием магнитного поля при помощи атомно-силового микроскопа: *a* — исходное АСМ изображение участка поверхности; *b* — трансформация АСМ изображения этого же участка поверхности при включении (1) и выключении (2) магнитного поля в 50 Ое; *c* — сдвиг соответствующих профилей в АСМ изображении при включении и выключении магнитного поля (*AA'* — без поля, *BB'* — после включения магнитного поля); *d* — экспериментальные значения коэффициента магнитострикции, полученные для разных значений приложенного магнитного поля (точки), и зависимость коэффициента магнитострикции от поля (сплошная линия) по данным работы [11].

нов. Не следует также забывать, что при получении кривых магнитосопротивления наноконтакт находится в электролите. Это означает, что свойства его могут изменяться, например, из-за окисления никеля.

На образцах второго типа смещения края пленок при изменении магнитного поля от 0 до 500 Ое не наблюдались. Если смещение и было,

то оно не превышало величины предельной чувствительности нашей установки, составляющей 2 nm. Скорее всего, это обусловлено высокой адгезией пленок к поверхности подложки и их малой толщиной. Из рис. 2, *d* видно, что с увеличением магнитного поля коэффициент магнитострикции Ni возрастает и в поле магнитного насыщения (порядка 500 Oe) становится равным  $-36 \cdot 10^{-6}$  [11]. Анализ этой зависимости позволяет предположить, что при увеличении магнитного поля от 0 до 100 Oe изменение ширины зазора между ферромагнитными „берегами“ нанопленок за счет магнитострикции не будут превышать 1 nm. Из этого следует, что в наноконтакте, сформированном в зазоре между пленками, вклад магнитострикции в ГМС будет минимальным.

Таким образом, показано, что с помощью АСМ, совмещенного с электромагнитом, можно с нанометровой точностью измерять изменение геометрических размеров магнитных микрообъектов, которое обусловлено эффектом магнитострикции.

Выполненные нами прецизионные АСМ измерения доказывают, что для магниторезистивных наноконтактов, электрохимически сформированных между никелевыми микропроводами, характерно изменение под действием магнитного поля ширины зазора между микропроводами на величину в несколько десятков нанометров, основной вклад в которое дает магнитострикция. Очевидно, магнитострикция является одной из главных причин, препятствующей получению в таких структурах стабильных наноконтактов с ГМС баллистического типа.

Планарные (пленочные) структуры с высокой адгезией к подложке характеризуются минимальными магнитомеханическими смещениями и, следовательно, наиболее пригодны для получения баллистических магниторезистивных наноконтактов.

Авторы выражают благодарность Р.И. Салихову за помощь в приготовлении образцов методом напыления в вакууме.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-02-16550), гранта НШ-6213.2006.2 и ФЦКП „Физико-химические исследования веществ и материалов“ при Казанском государственном университете.

## Список литературы

- [1] Bobo J.F., Gabillet L., Bibes M. // J. Phys.: Condtns. Matter. 2004. V. 16. P. S471.
- [2] Chopra Y.D., Hua S.Z. // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. P. 020403R.

- [3] *Garcia N., Munoz M., Osipov V.V.* et al. // JMMM. 2002. V. 240. P. 92.
- [4] *Бородин П.А., Бухараев А.А., Бизяев Д.А.* и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2006. № 2. С. 24.
- [5] *Гатиятов Р.Г., Бородин П.А., Бухараев А.А.* и др. // Материалы симпозиума „Нанофизика и нанoeлектроника“. Нижний Новгород, 2006. Т. 2. С. 259.
- [6] *Gabureac M., Viret M., Ott F.* et al. // Phys. Rev. B. 2004. V. 69. P. 100401 (R).
- [7] *Egelhoff W.F., Jr., Gan L., Etedgui H.* et al. // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. P. 7554.
- [8] *Sullivan M.R., Boehm D.A., Ateya D.A.* et al. // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 024412-1.
- [9] *Bukharaev A.A., Biziaev D.A., Borodin P.A.* et al. // Proceedings of SPIE. Micro- and Nanoelectronics. 2003. V. 5401. P. 555.
- [10] *Parageorgopoulos A.C., Wang H., Guerrero C.* et al. // JMMM. 2004. V. 268. P. 198.
- [11] *Вонсовский С.В.* // Магнетизм. М.: Наука, 1971. С. 920.