

УДК 537.312.8+537.634.2+544.6

ВЫСОКОПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТОСТРИКЦИИ В НИКЕЛЕВЫХ СТРУКТУРАХ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

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

Аннотация

С помощью атомно-силового микроскопа (АСМ), совмещенного с электромагнитом, проведены прецизионные измерения магнитомеханических смещений в различных никелевых структурах, используемых для получения наноконтактов. Установлено, что для микропроволок Ni, закрепленных оловянным припоем к медной подложке или эпоксидной смолой к стеклянной подложке, смещения при изменении магнитного поля от 0 до 250 Э обусловлены в основном магнитострикцией. Аналогичные измерения для пленок Ni, осажденных на Si подложки или напыленных на MgO подложки, в пределах чувствительности измерения, составляющей 2 нм, не выявили смещений. Поэтому пленочные структуры, характеризующиеся высокой адгезией к подложке, наиболее пригодны для получения баллистических магниторезистивных наноконтактов. На микропроводах Ni, закрепленных к медным подложкам оловянным припоем, было зарегистрировано как положительное, так и отрицательное магнитосопротивление.

Введение

В последние несколько лет все большее внимание уделяется изучению магниторезистивных наноконтактов, сформированных между двумя ферромагнитными структурами. Согласно результатам теоретических исследований наноконтакты с баллистическим типом проводимости могут обладать гигантским магнитосопротивлением (ГМС) [1, 2]. Это позволит использовать их в устройствах записи, хранения и обработки информации или в качестве магнитных сенсоров, а в будущем на их основе может быть создана элементная база спинтроники – нового перспективного направления современной электроники [3]. Экспериментально ферромагнитные наноконтакты с ГМС в сотни и даже тысячи процентов были получены двумя способами: посредством механического сближения двух заостренных никелевых микропроводов [5] или электрохимического осаждения никеля между двумя никелевыми микропроводами, образующими T-образную геометрию [4–7]. Однако в ряде экспериментальных работ было показано, что ГМС в таких наноконтактах обусловлено не баллистическим транспортом электронов, а магнитомеханическими эффектами, приводящими к смещению микропроводов относительно друг друга под действием приложенного магнитного поля [6–9]. Возможны два механизма, под действием которых могут возникать значительные смещения образцов: во-первых, изменение длины свободной от крепления части образца за счет магнитострикции; во-вторых, магнитостатическое притяжение микропроводов между собой или к полюсам электромагнита при помещении их в магнитное поле. Поскольку для закрепления микропроводов на подложке обычно используют эпоксидную смолу, то в силу ее сравнительно невысокой жесткости заметные смещения микропроводов возможны из-за их взаимного притяжения друг к другу или к полюсам

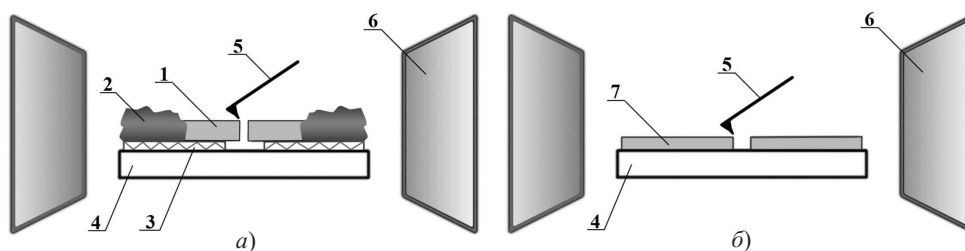


Рис. 1. Схемы размещения образцов микропроволок (а) и пленок (б) Ni в атомно-силовом микроскопе, совмещенном с электромагнитом. 1 – микропроволоки Ni, 2 – олово или эпоксидная смола, 3 – слой Cu, 4 – подложка, 5 – кантилевер АСМ, 6 – полюса электромагнита, 7 – пленка Ni

электромагнита при включении магнитного поля [9]. В результате смещений сопротивление наноконтакта в магнитном поле может меняться за счет изменения его площади или разрыва. Поэтому получение ГМС преимущественно за счет баллистического транспорта поляризованных электронов возможно только тогда, когда относительное смещение ферромагнитных «берегов», между которыми формируется нанокontakt («наномостик»), будет минимальным – порядка межатомного расстояния.

Основной задачей данной работы было оценить с максимальной точностью с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) изменение под действием магнитного поля ширины зазора в никелевых структурах, в которых можно сформировать наноконтакты с ГМС.

1. Методическая часть

Для реализации поставленной цели использовался АСМ марки SMENA (фирмы НТ-МДТ), специально сделанный из немагнитных материалов и совмещенный нами с электромагнитом, обеспечивающим в плоскости образца поле до 2500 Э. Описание этой установки приведено в работе [10]. Ранее АСМ уже использовался для подобных целей, при этом минимальное смещение, которое удавалось зарегистрировать составляло 50 нм [11]. Нам же за счет взаимной стабилизации образца и немагнитного АСМ удалось надежно регистрировать смещение образца под действием магнитного поля всего на 2 нм. Объектами исследования были структуры из микропроволок Ni, диаметром 120 мкм, закрепленных эпоксидным клеем на стеклянной подложке [6, 7] или оловянным припоем к медным подложкам. Длина свободного конца микропроволоки составляла $1 \div 1.5$ мм. Методом электрохимического осаждения Ni, аналогичным описанному в работе [4], в таких структурах нами были получены наноконтакты с ГМС от 20 до 1000%. Исследовались также планарные структуры, потенциально пригодные для получения в них наноконтактов – пленки Ni различной толщины, разделенные непроводящим зазором шириной около 20 мкм, которые были получены методом электрохимического осаждения на медную подложку или методом термического испарения в вакууме на поверхность кристалла MgO.

Схематический вид образцов и их положение между полюсами электромагнита приведены на рис. 1. Сканирование осуществлялось в полуконтактном режиме на краю никелевой микропроволоки или пленки в направлении, совпадающем с силовыми линиями магнитного поля. Во время проведения эксперимента процесс сканирования образца периодически приостанавливался для включения или выключения магнитного поля. При изменении поля происходил сдвиг образца, кото-

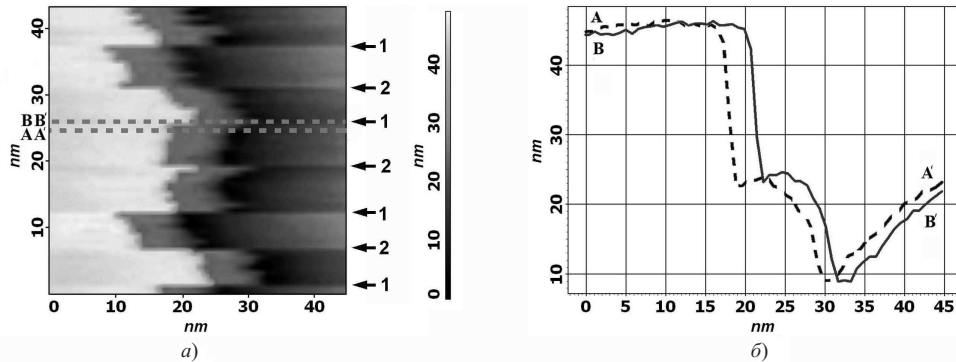


Рис. 2. Регистрация смещения никелевой проволоки под действием магнитного поля при помощи атомно-силового микроскопа. *a* – трансформация АСМ изображения при включении (1) и выключении (2) магнитного поля в 100 Э; *б* – профили поверхности до включения (AA') и после включения магнитного поля (BB')

рый сразу же отражался на его АСМ изображении в виде характерного смещения изображения поверхности вдоль направления изменения поля (рис. 2, *a*). Такой сдвиг наиболее заметен при сравнении двух близких профилей поверхности, полученных без магнитного поля и в поле (рис. 2, *б*). Усредненное значение смещения магнитной микропроволоки или пленки (относительно подложки) получали путем статистической обработки не менее 50 измерений на каждом образце. Погрешность измерений не превышала 20%.

2. Результаты и обсуждение

Для серии образцов в виде микроволоок Ni, закрепленных эпоксидным клеем на стеклянных подложках и полученных в разное время, смещения свободного конца микропроволоки (в пересчете на 1 мм) лежали в интервале от 30 до 40 нм при изменении поля от 0 до 250 Э. На таких образцах после формирования в них наноконтактов был зарегистрирован положительный магниторезистивный эффект в десятки и сотни процентов, который сохранялся в течение нескольких десятков минут [6, 7]. На отдельных образцах при использовании Т-образной геометрии величина ГМС составляла почти 1000% (рис. 3, *a*). При таких больших смещениях микроволоок изменение ширины зазора между ними достигает нескольких десятков нанометров, и положительное ГМС в такой структуре можно объяснить разрывом наноконтакта под действием магнитного поля. Такая интерпретация наиболее убедительна для объяснения ГМС в 1000%.

Аналогичные измерения в микропроводах Ni, зафиксированных оловянным припоем на медной подложке, показали усредненные значения смещения, близкие к 30 нм (при изменении поля от 0 до 250 Э). В этих образцах также с помощью электрохимического осаждения никеля были получены магниторезистивные наноконтакты. Величина ГМС в них не превышала 20%. Вид и поведение магниторезистивных кривых существенно отличались от кривых, полученных в образцах первого типа: в течение первых двух минут после формирования наноконтакта эффект ГМС был положительным (рис. 3, *б*), а затем становился отрицательным (рис. 3, *в*). Общее время «жизни» таких магниторезистивных наноконтактов составляло около 6 минут.

На образцах, полученных электрохимическим осаждением Ni на медную подложку и методом напыления в вакууме на пластины из MgO, смещения при из-

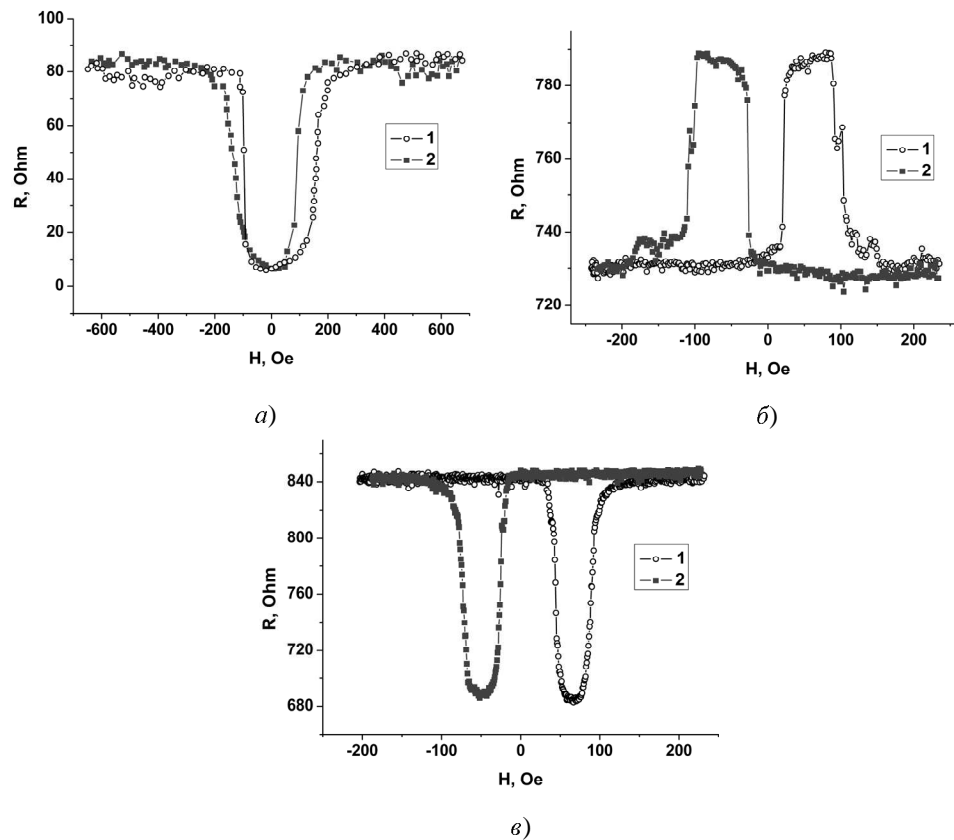


Рис. 3. Магниторезистивные кривые, полученные в наноконтактах, сформированных методом электрохимического осаждения между двумя проволоками Ni, закрепленными эпоксидной смолой (а) и оловянным припоем (б, в)

менении магнитного поля от 0 до 500 Э в пределах чувствительности измерения, составляющей 2 нм, не наблюдались. Скорее всего, это обусловлено их высокой адгезией к поверхности подложки и малой толщиной.

Известно, что с увеличением магнитного поля коэффициент магнитострикции Ni возрастает (рис. 4) и в поле магнитного насыщения (порядка 500 Э) становится равным $-36 \cdot 10^{-6}$ [12]. Из анализа этой зависимости следует ожидать, что при увеличении магнитного поля от 0 до 100 Э изменение ширины зазора между ферромагнитными «берегами» за счет магнитоупругих эффектов не будет превышать 1 нм.

Зарегистрированные значения смещения микропроволок по знаку и величине хорошо согласуются с изменением продольных размеров микропроволоки Ni за счет магнитострикции. Большой интервал значений смещений для микропроволок, закрепленных на подложке эпоксидным клеем, обусловлен сложностью получения одинаковых образцов, разбросом упругих параметров используемого эпоксидного клея, а также вкладом магнитоэлектростатического взаимодействия микропроволок друг с другом и полем магнита.

Для микропроволок Ni, закрепленных оловянным припоем на медной подложке, можно считать, что смещение обусловлено преимущественно магнитострикцией. Однако вид магниторезистивной кривой не может быть объяснен только за счет магнитострикции. Наши измерения показали, что даже при изменении маг-

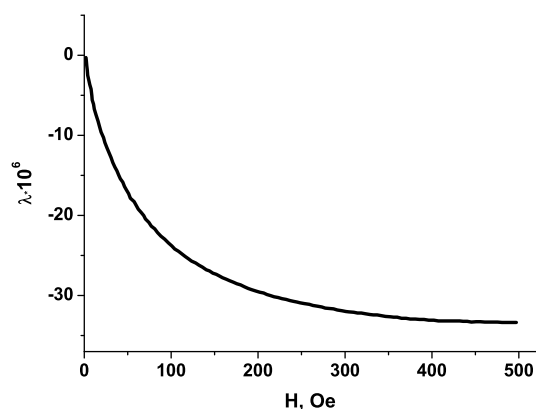


Рис. 4. Зависимость коэффициента магнитострикции никеля от внешнего магнитного поля [12]

нитного поля для микропроволок Ni от 0 до 500 Э смещения направлены в ту же сторону, что и при изменении поля от 0 до 250 Э. А это означает, что в этих полях доминирующим все еще остается вклад от магнитострикции, а не от магнитостатического притяжения образцов между собой или к полюсам магнита. Поэтому резкий спад сопротивления наноконтакта (рис. 3, б) в полях порядка +90 Э нельзя объяснить с точки зрения магнитострикции или магнитостатического притяжения. Можно предположить, что в магнитных полях порядка 100 Э происходит перемагничивание обеих микропроволок, в результате их намагниченности ориентируются параллельно. Спад сопротивления можно интерпретировать уменьшением рассеяния поляризованных электронов на доменных стенках наноконтакта. Возможно, что ГМС в данной структуре обусловлено смешанным механизмом, то есть как за счет магнитострикции (в полях < 50 Э), так и за счет баллистического транспорта электронов (> 50 Э). Однако для более детального изучения этого вопроса необходимо провести дополнительные исследования.

Заключение

В настоящей работе с помощью атомно-силового микроскопа проведены высокопрецизионные измерения магнитомеханических эффектов в различных никелевых структурах, используемых для получения магниторезистивных наноконтактов. Показано, что смещения ферромагнитных никелевых микропроволок при наложении магнитного поля в основном обусловлены магнитострикцией. Соответствующие ей смещения могут достигать нескольких десятков нанометров, и положительное ГМС, превышающее несколько сотен процентов, можно объяснить разрывом наноконтакта, сформированного между микропроводами, под действием магнитного поля. 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 (проект № 05-02-16550), гранта НШ-6213.2006.2 и программ Президиума РАН и ОФН РАН.

Summary

R.G. Gatiyatov, P.A. Borodin, A.A. Bukharaev, D.A. Biziaev. High-accuracy magnetostriction measurements in nickel structures using atomic force microscope.

High-accuracy measurements of magnetomechanical displacements in various nickel structures used to obtain nanocontacts have been carried out on a atomic force microscope combined with an electromagnet. It was found that for Ni microwires fixed on a Cu substrate by pewter solder or by epoxy displacements under the magnetic field changing from 0 to 250 Oe are mainly due to magnetostriction. The same experiments for Ni films electrodeposited onto Cu substrates or evaporated onto MgO substrates within the experimental sensitivity (2 nm) showed no displacements. Therefore film structures with high adhesion to substrate most suitable for obtaining ballistic magnetoresistive nanocontacts. Positive and negative magnetoresistance was registered on Ni microwires fixed on a Cu substrate by pewter solder. However the form of the magnetoresistive curve in such structure couldn't be explained only by magnetostriction.

Литература

1. *Tagirov L.R., Vodopyanov B.P., Efetov K.B.* Ballistic versus diffusive magnetoresistance of a magnetic point contact // *Phys. Rev. B.* – 2001. – V. 63. – P. 104428-1–104428-4.
2. *Tagirov L.R., Vodopyanov B.P., Garipov B.M.* Giant magnetoresistance in quantum magnetic contacts // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2003. – V. 258-259. – P. 61–66.
3. *Zutic I., Fabian J., Das Sarma S.* Spintronics: Fundamentals and applications // *Rev. Mod. Phys.* – 2004. – V. 76. – P. 323–410.
4. *Chopra Y.D., Hua S.Z.* Ballistic magnetoresistance over 3000% in Ni nanocontacts at room temperature // *Phys. Rev. B.* – 2002. – V. 66. – P. 020403-1–020403-3.
5. *Garcia N., Munoz M., Osipov V.V. et al.* Ballistic magnetoresistance in different nanocontact configurations: a basis for future magnetoresistance sensors // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2002. – V. 240. – P. 92–99.
6. *Бородин П.А., Бухараев А.А., Бизяев Д.А. и др.* Гигантское магнитосопротивление никелевых наноконтактов, полученных электрохимическим методом // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* – 2006. – № 2. – С. 24–28.
7. *Бородин П.А., Бухараев А.А., Бизяев Д.А.* Эффект гигантского магнитосопротивления в никелевых наноконтактах, полученных электрохимическим путем // *Казанский физико-технический институт 2004. Ежегодник. Физтехпресс.* – 2005. – С. 34–37.
8. *Gabureac M., Viret M., Ott F. et al.* Magnetoresistance in nanocontacts induced by magnetostrictive effects // *Phys. Rev. B.* – 2004. – V. 69. – P. 100401(R)-1–100401(R)-4.
9. *Egelhoff W.F. Jr., Gan L., Ertedgui H. et al.* Artifacts in ballistic magnetoresistance measurements (invited) // *J. Appl. Phys.* – 2004. – V. 95. – P. 7554–7559.
10. *Bukharaev A.A., Biziaev D.A., Borodin P.A. et al.* Magnetic force microscopy of magnetization reversal of microstructures in situ in the external field of up to 2000 Oe // *Proc. of SPIE. Micro- and Nanoelectronics.* – 2003. – V. 5401. – P. 555–560.
11. *Papageorgopoulos A.C., Wang H., Guerrero C. et al.* Magnetostriction measurements with atomic force microscopy: a novel approach // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2004. – V. 268. – P. 198–204.
12. *Вонсовский С.В.* Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.

Поступила в редакцию
20.02.06

Гатиятов Руслан Гумарович – студент физического факультета Казанского государственного университета.

Бородин Павел Александрович – младший научный сотрудник Казанского физико-технического института КазНЦ РАН.

E-mail: *pborodin@mail.ru*

Бухараев Анастас Ахметович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Казанского физико-технического института КазНЦ РАН.

E-mail: *A_bukharaev@kfti.knc.ru*

Бизяев Дмитрий Анатольевич – младший научный сотрудник Казанский физико-технического института КазНЦ РАН.

E-mail: *dbiziaev@inbox.ru*