

## О роли спиновой поляризации электронов в эффекте инжекционного гигантского магнитосопротивления в системе Ni—полимер—Cu

© А.Н. Лачинов, Н.В. Воробьева, В.М. Корнилов, Б.А. Логинов\*, В.А. Беспалов\*

Институт физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук, 450075 Уфа, Россия

\* Научно-исследовательский институт нанотехнологий Московского государственного института электронной техники, Москва, Россия

E-mail: vnv@anrb.ru

(Поступила в Редакцию 22 ноября 2007 г.  
В окончательной редакции 17 января 2008 г.)

В экспериментальной структуре ферромагнетик—полимер—немагнитный металл исследовано влияние спиновой поляризации инжектируемых из ферромагнетика электронов на инжекционное гигантское магнитосопротивление. Изменение степени спиновой поляризации осуществлялось введением деполяризующего слоя из немагнитного металла (Cu) между ферромагнетиком и органическим транспортным слоем. Установлено, что коэффициент инжекционного гигантского магнитосопротивления существенно зависит от толщины слоя деполяризатора. В частности, при толщинах выше 12 nm эффект не наблюдается, а при меньших толщинах экспоненциально убывает с ростом толщины. Сделан вывод об определяющей роли спиновой поляризации электронов в эффекте инжекционного гигантского магнитосопротивления.

Работа поддержана Федеральным агентством по науке и инновациям федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг. по лоту 1 (2007-7-5.2-00-01) мероприятия 5.2 „Развитие сети центров коллективного пользования научным оборудованием“, а также частично грантом программы фундаментальных исследований ОФН-5 (проект 1.15) и программы Президиума РАН П-8.

PACS: 75.47.De, 72.25.Mk, 85.75.Ss

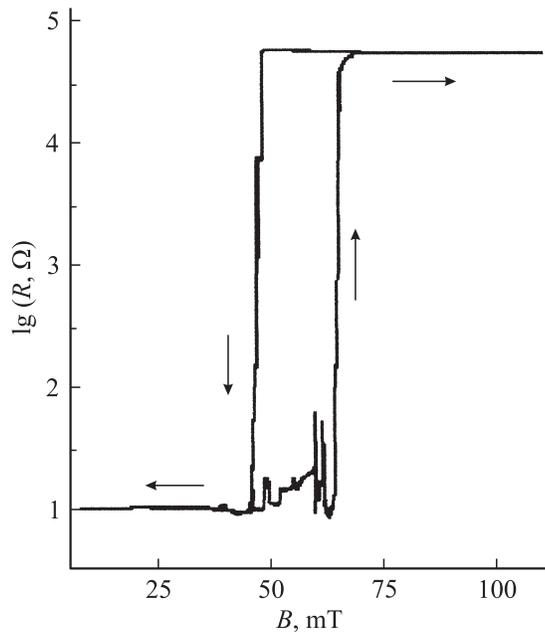
Возможности спин-зарядовой манипуляции на поверхности раздела магнитной и немагнитной сред рассматриваются уже очень давно [1,2]. Особый интерес представляют системы, способные к резкому изменению проводимости (эффекту переключения, описанному в [3]) под действием магнитного поля. В органических полупроводниках получение и исследование гигантского магнитосопротивления проводятся по традиционной схеме с использованием двух ферромагнитных электродов [4], один из которых является поляризатором спинов электронов, а второй — анализатором. Аналогичный подход с использованием структуры спинового вентиля был реализован и в случае электропроводящих полимеров [5].

Однако недавно в нескольких работах было показано, что для наблюдения эффекта гигантского магнитосопротивления в структуре металл—транспортный слой—металл достаточно иметь только одну границу раздела (интерфейс) с ферромагнитным металлом. Это явление было продемонстрировано на примере использования неорганического [6] и органического полимерного [7] транспортных слоев. В работе [8] для того, чтобы подчеркнуть специфику этого явления использовался термин „инжекционное гигантское магнитосопротивление“ (ИГМС), впервые введенный в [9]. Однако если само явление доказано достаточно убедительно, то объяснение его требует дополнительных экспериментальных уточнений. В частности, неясна роль спин-поляризованных носителей заряда.

В связи с этим в настоящей работе представлены результаты исследований влияния спиновой поляризации электронов, инжектируемых из одного из электродов, на транспортные свойства системы ферромагнетик (Ni)—полимер—немагнитный металл (Cu).

Идея эксперимента заключалась в следующем. Если предположить, что спиновое упорядочение электронов является важным фактором в явлении ИГМС, то, уменьшая степень поляризации, можно влиять на величину эффекта вплоть до полного его исчезновения (предварительно нами было экспериментально проверено, что в структуре Cu—полимер—Cu эффект не возникает). Для целенаправленного разрушения спинового упорядочения в структуре ферромагнетик—полимер—немагнитный металл между ферромагнетиком и полимерным слоем дополнительно вводился тонкий слой меди — металла с малой длиной спиновой когерентности электронов. Последовательное увеличение толщины промежуточного слоя меди должно было привести к полной деполяризации инжектируемых электронов и соответственно исчезновению эффекта.

В качестве ферромагнетика был использован поликристаллический никель в форме пластины. В качестве полимерного материала использовался полидифениленфталид (ПДФ), который наносился методом центрифугирования на никелевую подложку. Толщина полимерной пленки была  $\sim 0.8 \mu\text{m}$  и оценивалась с помощью микроинтерферометра МИИ-4. Начальное состояние



**Рис. 1.** Включение и выключение электрического сопротивления полимерной пленки магнитным полем. Видна область нестабильности при увеличении поля от 48 до 66 мТ. При выключении сопротивления пленки (уменьшение поля) нестабильность отсутствует.

проводимости полимерной пленки задавалось внешним давлением по методике, описанной в [10]. Максимальное давление на пленку не превышало 0.25 МПа. Сопротивление пленки в первоначальном (высокопроводящем) состоянии на рис. 1 равно  $\sim 10 \Omega$ .

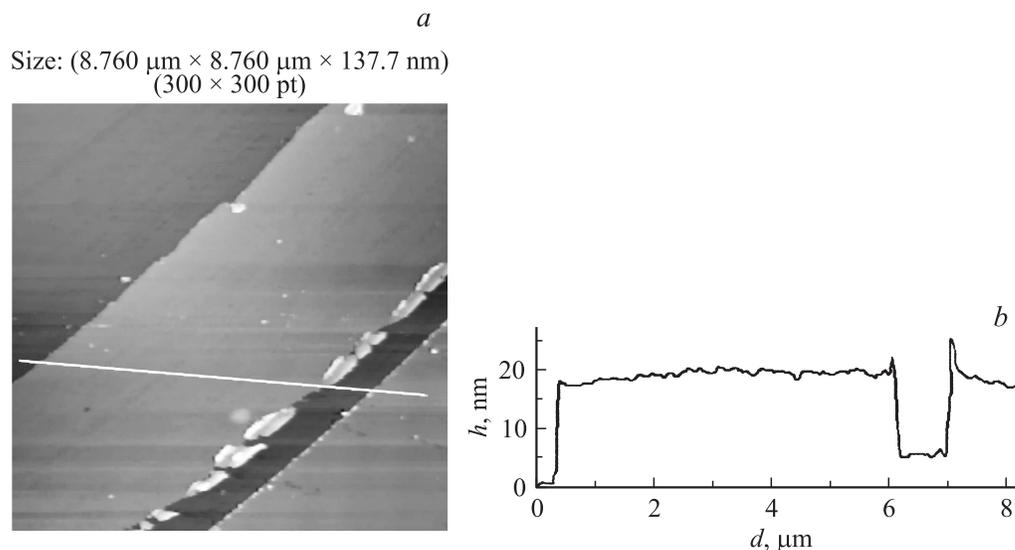
Медный электрод был изготовлен методом термического напыления в вакууме на поверхность полимерной пленки. Медная прослойка (Cu) между ферромагнети-

ком и полимером также изготавливалась методом термодиффузионного напыления в вакууме  $\sim 10^{-5}$  мм рт.ст. на установке ВУП-4. Толщина медной прослойки контролировалась с помощью атомно-силового микроскопа. Магнитное поле было направлено перпендикулярно поверхности образца и не превышало 0.35 Т. Все измерения проводились при комнатной температуре.

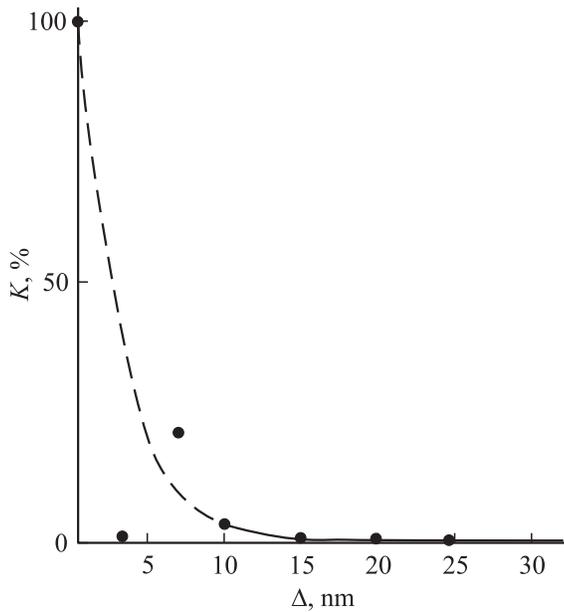
Для контроля качества медной прослойки был использован метод атомно-силовой микроскопии, позволивший получить изображение поверхности медного слоя и определить его геометрические параметры вплоть до нанометрового масштаба. Технологическая процедура заключалась в следующем: при напылении медного слоя медь конденсировалась одновременно и на ферромагнитном образце, и на контрольном образце-„свидетеле“. В качестве контрольного образца была выбрана подложка из полированного монокристаллического кремния. Такие подложки обладают высоким качеством поверхности и многократно тестированы, что позволяет уверенно интерпретировать полученные изображения. Для определения толщины медного слоя использовалась ступенька, возникающая на месте края специально сделанной царапины.

Эти измерения были проведены на сканирующем мультимикроскопе СММ-2000Т в режиме атомно-силовой микроскопии в контактной моде. Жесткость кантилевера составляла 0.01 Н/м, модификации поверхности в процессе сканирования не отмечалось.

В результате проведенных исследований было установлено, что пленка является сплошной и однородной вплоть до толщины  $\sim 8$  нм. На рис. 2, *a* представлено типичное изображение участка медной пленки на кремниевой подложке, причем относительно темные полосы соответствуют местам, где медная пленка удалена. Профиль исследуемой поверхности (рис. 2, *b*) показывает,



**Рис. 2.** Медная пленка толщиной 14–16 нм, напыленная на кремниевую пластину. *a* — морфология поверхности, более темные области соответствуют царапинам, сделанным на пленке, размер скана  $8.76 \times 8.76 \mu\text{m}$ . *b* — профиль поверхности вдоль измерительной линии.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента ИГМС от толщины медной прослойки  $\Delta$  между ферромагнетиком и полимером.  $R_2$  — сопротивление полимера в низкопроводящем состоянии,  $R_1$  — в высокопроводящем состоянии,  $K = \frac{R_2 - R_1}{R_2} \cdot 100\%$ .

что медная пленка является сплошной и однородной. При толщине пленки менее 8 nm в ней начинают наблюдаться дефектные участки с меньшей толщиной. Например, при толщине 6–7 nm суммарная площадь таких дефектных участков составляет от 5 до 15% площади поверхности в зависимости от толщины.

Средняя квадратичная шероховатость поверхности медной пленки составляет 200–400 pm в зависимости от выбранного участка и близка по величине шероховатости исходной кремниевой подложки (180 pm).

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента ИГМС от толщины медной пленки  $\text{Cu}'$  в системе Ni– $\text{Cu}'$ –ПДФ–Cu. Экспериментальные точки на полученной зависимости соответствуют значениям коэффициента ИГМС, определенным при измерениях зависимостей тока, протекающего через экспериментальный образец, от величины внешнего магнитного поля. Образцы отличались друг от друга наличием и толщиной дополнительного медного слоя между ферромагнетиком и полимерным слоем. При нулевой толщине слоя (отсутствии медной прослойки) была получена зависимость, аналогичная представленной на рис. 1, соответствующая максимальному значению ИГМС.

Необходимо отметить, что при переходе от образца к образцу по мере увеличения толщины прослойки изменяется не только величина ИГМС, но и значение порогового магнитного поля, при котором происходит это изменение. В связи с этим в работе использовались значения  $R_1$  и  $R_2$ , измеренные при граничных значениях магнитного поля: 0 и 0.35 Т.

Наличие медной прослойки  $\text{Cu}'$  приводит к значительному уменьшению коэффициента ИГМС, и при ее толщине более 12 nm эффект ИГМС исчезает. При толщине слоя меди 8–10 nm регистрируется влияние магнитного поля и относительное изменение магнитосопротивления составляет на более 5%. При дальнейшем уменьшении толщины промежуточного слоя меди наблюдается тенденция увеличения коэффициента ИГМС.

Однако изменение коэффициента магнитосопротивления с уменьшением толщины происходит от образца к образцу немонотонным образом. Эта область толщин выделена на рис. 3 штриховой линией. По-видимому, разброс экспериментальных точек при этих толщинах медной прослойки обусловлен островковым характером ее строения. Последнее подтверждается результатами АСМ-измерений, а также известным опытом исследования закономерностей роста тонких металлических пленок при осаждении их методом термодиффузионного напыления в вакууме [11].

Результаты проведенных экспериментов показывают, что ИГМС в системе ферромагнетик/медь/полимер/медь можно наблюдать при условии, что толщина медного слоя, разделяющего поверхность ферромагнетика и полимера, не превышает определенной величины. В условиях настоящей работы эта толщина составила  $10 \pm 2$  nm. Появление ИГМС при меньших толщинах медной прослойки можно объяснить неполной деполяризацией электронов медным слоем, так как его толщина становится сопоставимой с длиной когерентности спина электрона в меди  $\sim 2$ –3 nm [12]. Аппроксимация кривой на рис. 3 экспонентой при толщинах медной прослойки менее 12 nm показывает, что коэффициент ИГМС уменьшается в 2.7 раза при толщинах, сравнимых с длиной когерентности спина электрона в этом материале.

В работе [10] было высказано предположение о влиянии положения уровня Ферми ферромагнетика в магнитном поле на инжекционные свойства контакта ферромагнетик–полимер и соответственно на ИГМС в исследуемой структуре. Становится очевидным, что этого предположения недостаточно для объяснения явления инжекционного магнитосопротивления.

Из результатов проведенных экспериментов можно сделать вывод о важной роли спиновой поляризации электронов в реализации эффекта ИГМС.

## Список литературы

- [1] M. Johnson, R.H. Silsbee. Phys. Rev. B **35**, 4929 (1987).
- [2] M. Berciu, T.G. Rappoport, B. Janco. Nature **435**, 71 (2005).
- [3] А.Н. Лачинов, Н.В. Воробьева. УФН **176**, 1249 (2006).
- [4] V. Dediu, M. Murgia, F.C. Matarotta, C. Taiani, S. Barbanera. Solid State Commun. **22**, 181 (2002).
- [5] Z.H. Xiong, Di Wu, Z. Vally Vardeny, Jing Shi. Nature **427**, 821 (2004).

- [6] M. Matlak, M. Pietruszka, E. Rowinski. Phys. Rev. B **63**, 052 101 (2001).
- [7] K. Gatner, A.N. Lachinov, M. Matlak, A. Slebarski, T.G. Zagurenko. Cond-mat/0503432 (2005).
- [8] А.Н. Лачинов, Н.В. Воробьева, А.А. Лачинов. Письма в ЖЭТФ **84**, 720 (2006).
- [9] Л.В. Луцев, А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий. Письма в ЖЭТФ **81**, 636 (2005).
- [10] A.N. Lachinov, V.V. Vorobieva, A.A. Lachinov. Mol. Cryst. Liq. Cryst. **467**, 135 (2007).
- [11] Технология тонких пленок / Под ред. Л. Майссел, Р. Глэнг. Сов. радио, М. (1977). 664 с.
- [12] Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, Э.М. Эпштейн. Новые магнитные материалы микроэлектроники. Сб. тр. XX Междунар. школы-семинара. Физ. фак. МГУ, М. (2006). С. 871.