

УДК 537.6, 537.623, 537.624, 538.955

## Исследование процессов перемагничивания магнитомягких и магнито жестких слоев в спин-вентильных структурах

Петр Д. Ким\*  
Геннадий С. Патрин  
Дмитрий А. Марущенко  
Татьяна В. Руденко  
Виктор В. Поляков  
Татьяна В. Ким

Институт физики им. Л.В. Киренского,  
Сибирское отделение РАН,  
Академгородок 50/38, Красноярск, 660036,  
Россия

Получена 20.11.2011, окончательный вариант 20.12.2011, принята к печати 20.01.2012

*Магнитные спин-вентильные структуры представляют большой практический интерес в качестве датчиков слабых магнитных полей, а также в качестве переключаемых элементов магнитной логики. Несмотря на большое количество проведенных экспериментальных и теоретических работ по спин-вентильным структурам эффекты межслойного взаимодействия, происходящие в данных структурах, в настоящее время остаются полностью не выясненными.*

*Ключевые слова: тонкие пленки, спин-вентильные структуры, обменное взаимодействие, однонаправленная анизотропия.*

Эффект обменного смещения (ОС) известен на протяжении более чем 50 лет, связан с обменным взаимодействием, возникающим на границе между ферромагнитным (ФМ) и антиферромагнитным (АФ) материалом. Кроме того, в таких АФМ/ФМ-системах всегда наблюдается повышение коэрцитивной силы ( $H$ ) ферромагнитного слоя [1, 2]. Первоначальная модель, предложенная Meiklejohn и Bean [1], предполагает некомпенсированный АФМ-интерфейс. Эта модель, однако, дала значения обменного смещения ( $H$ ) на порядок большие, чем экспериментально наблюдаемые. Другие модели [3–5] предполагают образование в АФМ-слое доменных стенок, параллельных интерфейсу, в процессе перемагничивания ФМ-слоя. Несмотря на то, что эти модели дают корректные значения  $H$ , они предсказывают нулевое обменное смещение, если перемагничивание АФМ-спинов происходит не только в плоскости, параллельной пленки [6].

Более поздние теоретические подходы учитывали шероховатость на АФМ/ФМ-интерфейсе и наличие случайных обменных взаимодействий между ФМ- и АФМ-спинами. Это приводило к формированию доменов в антиферромагнетике, перпендикулярных интерфейсу, что также позволило получить корректные значения  $H$  и повышение коэрцитивной силы [7, 8].

Многие теории обменного смещения основывались на существовании некомпенсированных спинов на АФМ-интерфейсе как происхождение сцепного механизма. Последние результаты действительно показывают, что даже небольшое число некомпенсированных АФМ-спинов на интерфейсе может вызвать обменное смещение [9, 10]. Например, в работе

\*kim@iph.krasn.ru

[11] проведено исследование пространственного распределения некомпенсированных АФМ-спинов в мультислоях  $\text{CoO}/(\text{CoPt})$ . Количественный анализ изображений магнитосиловой микроскопии (МСМ) показал, что около 7% спинов на поверхности не компенсированные, и только они дают вклад в обменное смещение.

Детектирование закрепленных спинов, определение размеров и их влияние на эффект обменного смещения в настоящее время считается важнейшей исследовательской проблемой. В недавних работах проведено исследование петель гистерезиса с использованием рентгеновского магнитно-кругового дихроизма в различных спин-вентильных структурах [12]. Они показали, что только малая часть поверхностных спинов, около 4% монослоя, являются обменно связанными с АФМ. Расчет обменного смещения на основании этих данных соответствует экспериментальным данным.

Недавно была исследована зависимость между коэрцитивной силой и полем обменного смещения в системах ФМ/АФМ [13]. И эти новые экспериментальные результаты дают убедительные доказательства отсутствия прямой корреляции между увеличением коэрцитивной силы и поля обменного смещения в спин-вентильных структурах.

В нашей работе мы исследовали спин-вентильные структуры. В частности, детально исследовано влияние немагнитного проводящего слоя меди на обменное смещение в структурах  $\text{Ta}/\text{NiFe}/\text{Cu}(d_{\text{Cu}})/\text{NiFe}/\text{IrMn}/\text{Ta}$ , а также зависимость  $H$  от толщины свободного слоя  $\text{CoFe}$  в структурах  $\text{Ta}/\text{CoFe}(d_{\text{CoFe}})/\text{Cu}/\text{CoFe}/\text{IrMn}/\text{Ta}$ . Спин-вентильные структуры подобного типа могут быть использованы для создания считывающих магниторезистивных головок в жестких дисках, элементов магнитной памяти и других устройств, основанных на эффекте гигантского магнитосопротивления (ГМС), поэтому их исследование имеет важное прикладное значение.

Многослойные спин-вентильные пленки получены методом ионно-плазменного распыления путем последовательного напыления слоев на стеклянные подложки в атмосфере аргона (базовое давление —  $3 \times 10^{-6}$  Torr, рабочее давление —  $3 \times 10^{-3}$  Torr). Для наведения одноосной анизотропии осаждение слоев производилось в постоянном магнитном поле  $H=300$  Oe. Перед осаждением подложки покрывались подслоем Ta толщиной 5 нм, сверху на полученные структуры осаждался защитный слой Ta толщиной 2,5 нм. Слои NiFe, осажденные на пленки IrMn вследствие прямого межслойного взаимодействия, являются магнито жесткими, аналогично и в случае с пленками CoFe. Эти слои в спин-вентильных структурах будем условно называть закрепленными, а магнитомягкие ферромагнитные слои NiFe (CoFe), разделенные прослойкой меди, — свободными. Толщина АФМ-слоя во всех структурах равняется 6 нм. В спин-вентильных структурах  $\text{Ta}/\text{NiFe}/\text{Cu}(d_{\text{Cu}})/\text{NiFe}/\text{IrMn}/\text{Ta}$  толщины свободного и закрепленного слоев пермаллоя были фиксированы и равнялись  $t_{\text{CC}}=8$  и  $t_{\text{3C}}=6$  нм соответственно. Толщина слоя Cu варьировалась в пределах  $d_{\text{Cu}}=0,36 \div 6,72$  нм с шагом  $\sim 0,3$  нм. А в структурах  $\text{Ta}/\text{CoFe}(d_{\text{CoFe}})/\text{Cu}/\text{CoFe}/\text{IrMn}/\text{Ta}$  толщины прослойки Cu и закрепленного слоя CoFe были фиксированы и равнялись 3,3 и 6 нм соответственно. Толщина свободного слоя CoFe варьировалась в пределах  $d_{\text{CoFe}}$  от 3 до 12 нм.

Проведенное методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследование полученных спин-вентильных структур показало, что среднеквадратичная шероховатость поверхности верхнего слоя образца лежит в пределах 0,2–0,3 нм. На рис. 1 представлены типичный 3d (трехмерный) снимок поверхности пленки и профиль поверхности в произвольном направлении.

Пленки CoFe обладают большим магниторезистивным эффектом, поэтому они представляют большой практический интерес. Величина магнитосопротивления определялась стандартным четырехзондовым методом. Под величиной гигантского магнитосопротивления (ГМС) понимается величина  $\Delta R/R = (R_a - R_p)R_p$ , где  $R_p$  и  $R_a$  — электросопротивление спин-вентильной структуры с параллельной и антипараллельной взаимной ориентаций намагниченности свободного и закрепленного ферромагнитных слоев соответственно.

Магнитные характеристики (петли гистерезиса) исследовались с помощью магнитооп-

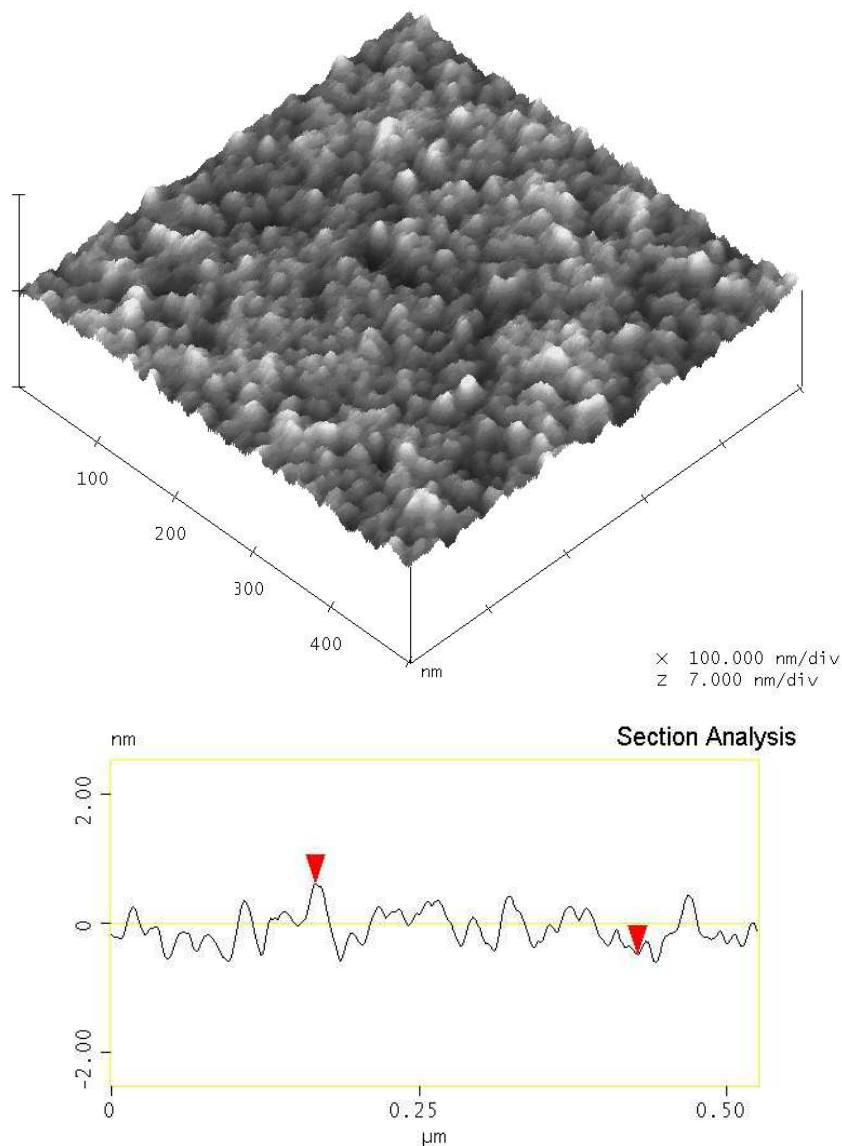


Рис. 1. АСМ — изображение рельефа поверхности пленок спин-вентильной структуры на примере образца Ta/NiFe/Cu( $d_{Cu}=1$  нм)/NiFe/IrMn/Ta

тической установки на основе эффекта Керра, который позволяет получать четкие петли гистерезиса как с верхних, так и с внутренних слоев ферромагнитного материала спин-вентильных структур.

На рис. 2 представлены петли гистерезиса, полученные в спин-вентильных структурах Ta/NiFe/Cu( $d_{Cu}$ )/NiFe/IrMn/Ta при различных толщинах медного слоя. Петли имеют ферромагнитный характер с хорошей прямоугольностью и обменным смещением в интервале  $H_E$  100 ÷ 250 Ое. При малой толщине не магнитной прослойки Cu (до 2 нм) обменное смещение имеет значение около 100 Ое и практически не зависит от толщины слоя меди (рис. 3). В данной области толщин меди ФМ-слои можно представить как единую ферромагнитную пленку, состоящую из суммы свободного и закрепленного слоев, разделенных островковой

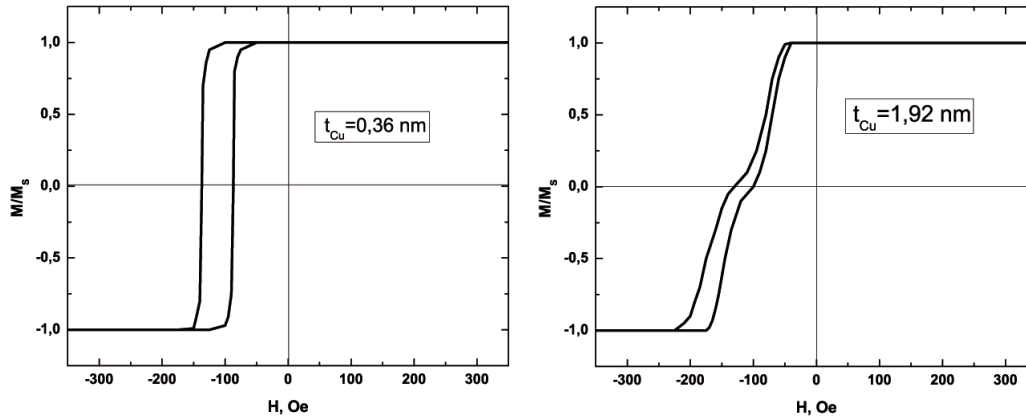


Рис. 2. Петли гистерезиса спин-вентильной системы Ta/NiFe/Cu( $d_{Cu}$ )/NiFe/IrMn/Ta при различных толщинах меди. Во вставках показаны петли гистерезиса свободного ФМ-слоя

структурой меди. Поэтому взаимодействие слоя антиферромагнетика со спинами свободного ФМ-слоя является прямым обменным взаимодействием. Таким образом, обменное взаимодействие можно определить как

$$H_E = -j/M_{OI}(t_{NN} + t_{CN}).$$

При толщине меди  $d_{Cu} > 2,2$  нм происходит двукратное возрастание величины  $H$ , а петля гистерезиса принимает типичный для спин-вентильных структур характер (две разделенные петли гистерезиса свободного и закрепленного ФМ слоев). Такое увеличение  $H$  легко объяснить, если представить, что  $d_{Cu} = 2,2$  нм является критической толщиной, при которой происходит образование сплошной пленки Cu. А это означает, что при  $d_{Cu} > 2,2$  нм структура рассматриваемой системы совершенно другая, состоящая из двух отдельных ФМ-слоев, закрепленного (находящегося в прямом контакте с АФ-слоем) и свободного, разделенного сплошным слоем меди, не имеющего прямого обмена с АФ-слоем. Следовательно, прямое обменное взаимодействие с антиферромагнетиком имеет только закрепленный ФМ-слой, а обменное взаимодействие можно определить как

$$H_E = -j/M_{ФМ}t_{ЗС}.$$

При достижении величины  $d_{Cu} = 2$  нм происходит разделение петли гистерезиса на две составляющие, которые на полевых зависимостях  $M(H)$  выглядели как две независимые петли гистерезиса (см. рис. 2). Обменное смещение закрепленного слоя NiFe резко увеличивается (от 100 до 250 Ое) в области толщин 0,25–2,5 нм (рис. 3). С увеличением толщины медной прослойки ОС закрепленного слоя приобретает осциллирующий характер.

Для всех образцов с  $d_{Cu} > 2$  нм наблюдаются две хорошо разделенные петли гистерезиса: первая петля появляется в интервале низких полей и соответствует перемангничиванию свободного слоя пермаллоя, а вторая петля — перемангничиванию закрепленного слоя в интервале более высоких полей.

На основе полученных результатов можно сделать предположение, что в исследованной системе до критической толщины слоя меди  $d_{Cu} = 2$  нм между слоями пермаллоя существует прямая обменная связь, приводящая к перемангничиванию их как единого ферромагнитного слоя. При толщине меди  $d_{Cu} > 2$  нм, видимо, формируется сплошной слой Cu, данная связь

разрушается и зависимости  $M(H)$  приобретают типичный для спин-вентильных структур характер (рис. 2).

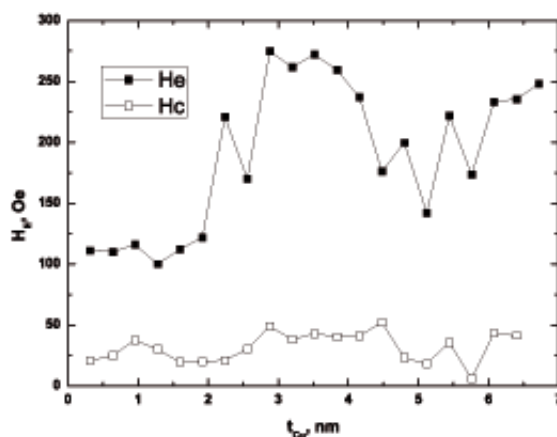


Рис. 3. Зависимость поля обменного смещения и коэрцитивности от толщины медного слоя для закрепленного слоя пермаллоя спин-вентильной системы Ta/NiFe/Cu( $d_{Cu}$ )/NiFe/IrMn/Ta

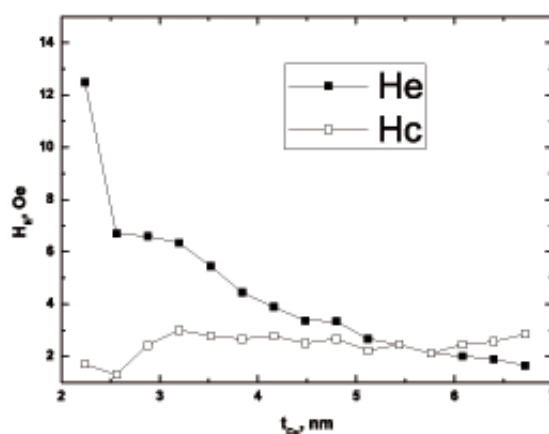


Рис. 4. Зависимость поля обменного смещения и коэрцитивности от толщины медного слоя для свободного слоя пермаллоя спин-вентильной системы Ta/NiFe/Cu( $d_{Cu}$ )/NiFe/IrMn/Ta

На рис. 4 представлены кривые зависимости коэрцитивной силы и ОС для свободного слоя NiFe от толщины слоя меди. Хорошо видно, что величина обменного взаимодействия постепенно уменьшается с увеличением толщины медной прослойки по экспоненциальному закону, а коэрцитивная сила почти не зависит от толщины медного слоя; эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными в работе [13].

Интересным результатом, полученным в данной работе, является наблюдаемое изменение обменного смещения низкополевой петли гистерезиса, ассоциируемой со свободным слоем NiFe, в зависимости от характера предварительного перемангничивания образца.

Если приложить достаточно большое постоянное магнитное поле ( $\sim 1$  КОе) против направления поля смещения петли гистерезиса, то создается упорядоченная система вдоль выбранного направления, т.е. монодоменное состояние в ФМ-слоях. Этим процессом воссоздается исходное состояние спин-вентильной системы, полученное при изготовлении образцов.

При перемагничивании свободного слоя слабым магнитным полем постоянной амплитуды, не достаточным для перемагничивания закрепленного слоя NiFe, наблюдается постепенное уменьшение величины обменного смещения свободного слоя с увеличением количества циклов перемагничивания (рис. 5а). Данный эффект известен как “обучающий эффект” (training effect), который достаточно широко известен и описан в литературе [14, 15]. Однако для полного понимания происхождения этого эффекта имеющихся экспериментальных и теоретических данных все еще недостаточно. Наблюдаемое поведение обменного взаимодействия может быть связано с тем, что магнитная структура свободного слоя пермаллоя взаимосвязана с доменной структурой АФ-слоя.

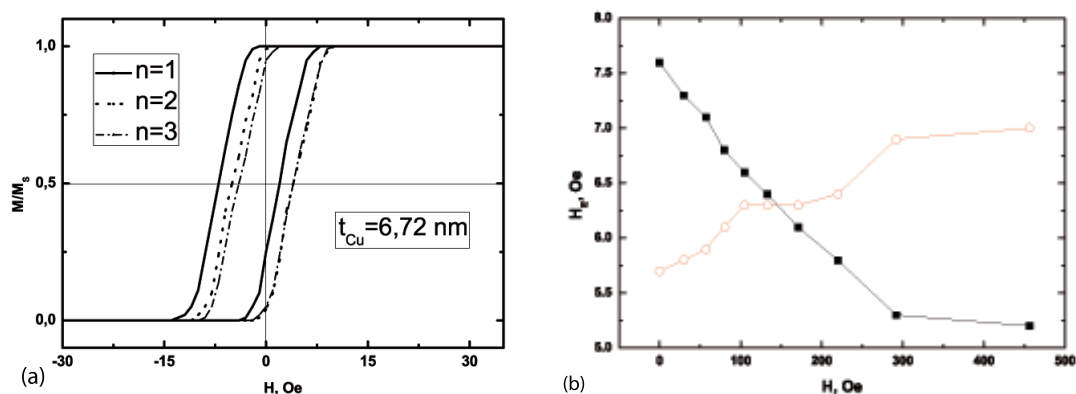


Рис. 5. (а) Петли гистерезиса свободного слоя пермаллоя спин-вентильной системы Ta/NiFe/Cu( $d_{Cu}$ )/NiFe/IrMn/Ta от циклов перемагничивания ( $n$ ). (б) Зависимость обменного смещения от величины внешнего магнитного поля, (о) — поле приложено вдоль направления смещения петли гистерезиса и (■) — против направления смещения петли гистерезиса

Предположим что, доменная структура АФ-слоя состоит из двухмерного массива доменов, с доменными границами перпендикулярными интерфейсу. Приложенное внешнее магнитное поле и обменная связь на интерфейсе приводят к монодоменному состоянию ФМ слоев (т.е. полностью упорядоченное состояние магнитных моментов), что в свою очередь приводит к аналогичному состоянию в интерфейсе АФ-слоя [16].

Если приложить постоянное магнитное поле ( $\sim 1$  КОе) по направлению поля смещения петли гистерезиса и перемагничивать свободный ФМ-слой слабым магнитным полем с постепенным увеличением амплитуды, то величина  $H_E$  постепенно начинает возрастать и достигает насыщения (рис. 5б). Если же приложить постоянное магнитное поле ( $\sim 1$  КОе) против направления поля смещения петли гистерезиса и перемагничивать свободный ФМ-слой слабым магнитным полем с постепенным увеличением его амплитуды, то обменное смещение монотонно убывает и при достижении определенной величины перемагничивающего поля остается постоянным (рис. 5б). Величина данного поля зависит от толщины меди и определяется полем коэрцитивной силы закрепленного слоя. Такое поведение поля обменного смещения можно объяснить тем, что исходное состояние спин-вентильной системы начинает постепенно разрушаться, т.е. упорядоченная конфигурация магнитных моментов АФ становится нестабильной. При достижении внешним магнитным полем значения  $H_C$  свободного слоя пермаллоя ФМ-магнитные моменты начинают вращаться в противоположном направлении (против направления однонаправленной анизотропии), а межслойная обменная связь прикладывает вращающий момент на АФ-магнитные моменты. Упорядоченное магнитное состояние АФ начинает разрушаться, что приводит к формированию доменных границ, перпендикулярных интерфейсу в АФ-слое [17]. Наблюдаемый эффект является до-

казательством существования дальнедействующей обменной связи между свободным слоем пермаллоя и антиферромагнитным слоем, разделенными немагнитной медной прослойкой меди и закрепленным слоем пермаллоя.

Также нами исследованы магнитные и магниторезистивные свойства системы структуры  $\text{CoFe}(d_{\text{CoFe}})/\text{Cu}/\text{CoFe}/\text{IrMn}$  в зависимости от толщины свободного слоя  $\text{CoFe}$ . На рис. 6 (b) представлена петля гистерезиса, полученная с помощью МОКЕ на спин-вентильной структуре  $\text{CoFe}(d_{\text{CoFe}})/\text{Cu}/\text{CoFe}/\text{IrMn}$ . Магнитное поле прикладывалось вдоль ОЛН. Изменения

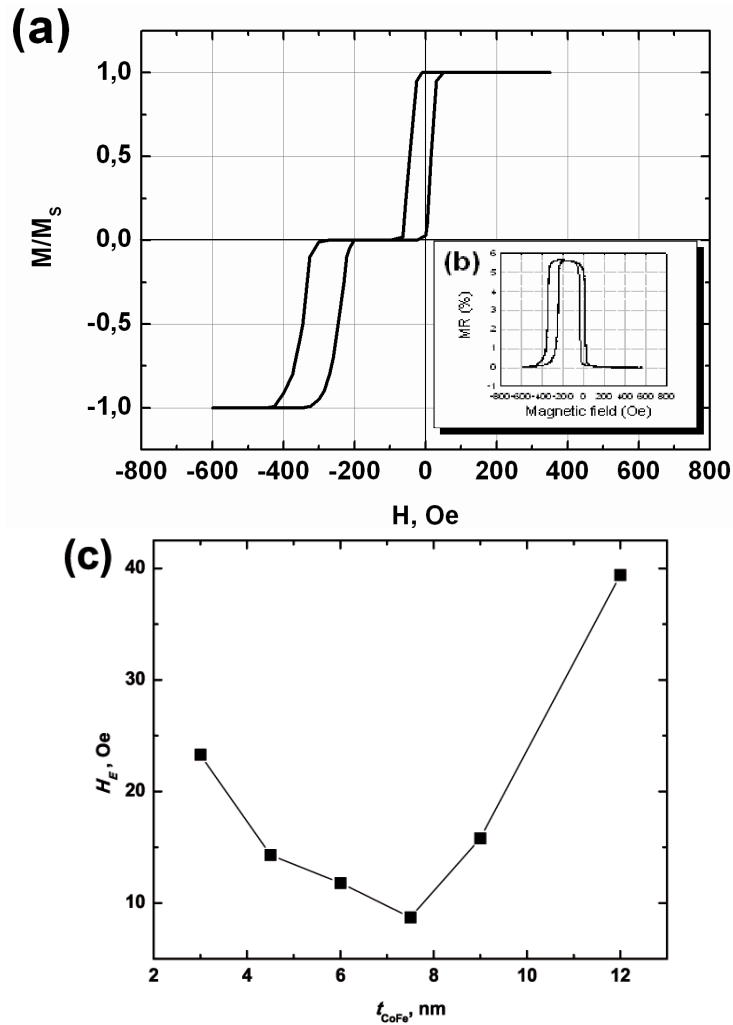


Рис. 6. Магнитооптическая (a) и магниторезистивная (b) петли гистерезиса для спин-вентильных структур  $\text{Ta}/\text{CoFe}(d_{\text{CoFe}}=6 \text{ нм})/\text{Cu}/\text{CoFe}/\text{IrMn}/\text{Ta}$ . (c) Зависимость обменного смещения от толщины свободного слоя  $d_{\text{CoFe}}$

намагниченности, наблюдаемые на этой петле соответствуют перемагничиванию свободного и закрепленного слоев  $\text{CoFe}$  и имеют типичный для спин-вентильной структуры характер. На рис. 6 b показана магниторезистивная петля, измеренная на той же пленке при приложении магнитного поля вдоль ОЛН и тока вдоль ОТН. Из сравнения рисунков можно заключить, что изменение сопротивления структуры происходит при изменении взаимной ориентации намагниченности свободного и закрепленного слоев  $\text{CoFe}$ . На рис. 6 с представлена

зависимость обменного смещения от толщины свободного слоя  $d_{CoFe}$ , имеющая необычный характер. В данной работе мы исследовали две различные спин-вентильные структуры. В частности, детально исследовано влияние немагнитного слоя меди на обменное смещение в спин-вентильной системе NiFe/Cu( $d_{Cu}$ )/NiFe/IrMn, обнаружена критическая толщина ( $d_{Cu} \sim 2$  нм), при которой происходит формирование сплошного слоя меди между свободным и закрепленным слоем пермаллоя. Интересным результатом, полученным в данной работе, является наблюдаемое изменение обменного смещения низкополевой петли гистерезиса, ассоциируемой со свободным слоем NiFe, в зависимости от характера предварительного перемангничивания образца. Наблюдаемый эффект служит доказательством существования дальнедействующей обменной связи между свободным слоем пермаллоя и антиферромагнитным слоем, разделенными немагнитной медной прослойкой меди и закрепленным слоем пермаллоя. В спин-вентильной системе CoFe( $d_{CoFe}$ )/Cu/CoFe/IrMn была исследована зависимость от толщины свободного слоя CoFe, имеющая довольно необычный характер. Наблюдаемые эффекты дальнедействующего обменного взаимодействия в спин-вентильных структурах представляются важными для понимания сути эффекта обменного смещения в подобных материалах.

## Список литературы

- [1] W.H.Meiklejohn, C.P.Bean, New Magnetic Anisotropy, *Phys. Rev.*, **102**(1956), 1413–1414.
- [2] J.Nogues, I.K.Schuller, Exchange bias, *J. Magn. Magn. Mater.*, **192**(1999), 203–232.
- [3] N.C.Koon, Calculations of Exchange Bias in Thin Films with Ferromagnetic/Antiferromagnetic Interfaces, *Phys. Rev. Lett.*, **78**(1997), 4865–4868.
- [4] D. Mauri, H.C. Siegmann, P.S. Bagus, and E. Kay, Simple model for thin ferromagnetic films exchange coupled to an antiferromagnetic substrate, *J. Appl. Phys.*, **62**(1987), 3047–3049.
- [5] J.-V.Kim, R.L.Stamps, Hysteresis from antiferromagnet domain-wall processes in exchange-biased systems: Magnetic defects and thermal effects, *Phys. Rev. B.*, **71**(2005), 094405–094417.
- [6] T.C.Schulthess, W.H.Butler, Consequences of Spin-Flop Coupling in Exchange Biased Films, *Phys. Rev. Lett.*, **81**(1998), 4516–4519.
- [7] A.P.Malozemoff, Random-field model of exchange anisotropy at rough ferromagnetic-antiferromagnetic interfaces, *Phys. Rev. B.*, **35**(1987), 3679–3682.
- [8] D.V.Dimitrov, S.Zhang, J.Q.Xiao, G.C.Hadjipanayis, C.Prados, Effect of exchange interactions at antiferromagnetic/ferromagnetic interfaces on exchange bias and coercivity, *Phys. Rev. B.*, **58**(1998), 12090–12094.
- [9] K.Takano, R.H.Kodama, A.E.Berkowitz, W.Cao, G.Thomas, Interfacial Uncompensated Antiferromagnetic Spins: Role in Unidirectional Anisotropy in Polycrystalline NiFe/CoO Bilayers, *Phys. Rev. Lett.*, **79**(1997), 1130–1133.
- [10] W.J.Antel, Jr.F.Perjeru, G.R. Harp, Spin Structure at the Interface of Exchange Biased FeMn /Co Bilayers, *Phys. Rev. Lett.*, **83**(1999), 1439–1442.
- [11] P.Kappenberger, S.Martin, Y.Pellmont, H.J.Hug, J.B.Kortright, O.Hellwig, E.E.Fullerton, Direct Imaging and Determination of the Uncompensated Spin Density in Exchange-Biased CoO/(CoPt) Multilayers, *Phys. Rev. Lett.*, **91**(2003), 267202–267205.



- [12] H.Ohldag, A.Scholl, F.Nolting, E.Arenholz, S.Maat, A.T.Young, M.Carey, J. Stohr, Correlation between Exchange Bias and Pinned Interfacial Spins, *Phys. Rev. Lett.*, **91**(2003), 017203–017206.
- [13] X.L.Tang, H.Wu Zhang, H.Su, Y.L.Jing, Z.Yong Zhong, Spin-transfer effect and independence of coercivity and exchange bias in a layered ferromagnet/antiferromagnet system, *Phys. Rev. B.*, **81**(2010), 052401–052404.
- [14] S.G.E. te Velthuis, A.Berger, G.P.Felcher, B.K.Hill, E.D. Dahlberg, Training effects and the microscopic magnetic structure of exchange biased Co/CoO bilayers, *J. Appl. Phys.*, **87**(2000), 5046–5048.
- [15] W.-T. Lee, S.G.E. te Velthuis, G.P. Felcher, F. Klose, T. Gredig, and E.D. Dahlberg, Ferromagnetic domain distribution in thin films during magnetization reversal, *Phys. Rev. B.*, **65**(2002), 224417–224422.
- [16] U.Welp, S.G.E. te Velthuis, G.P.Felcher, T.Gredig, and E.D.Dahlberg, Domain formation in exchange biased Co/CoO bilayers, *J. Appl. Phys.*, **93**(2003), 7726–7728.
- [17] T.Gredig, I.N.Krivorotov, E.D.Dahlberg, Magnetization reversal in exchange biased Co/CoO probed with anisotropic magnetoresistance, *J. Appl. Phys.*, **93**(2002), 7760–7762.

## The Investigation of Magnetization Reversal of Free- and Pinning-layers in the Spin–Valve Structures

**Petr D. Kim**  
**Gennady S. Patrin**  
**Dmitry A. Muraschenko**  
**Tat'yana V. Rudenko**  
**Victor V. Polyakov**  
**Tat'yana V. Kim**

---

*Magnetic spin-valve structures are of great practical interest as sensors of weak magnetic fields, as well as switching elements of the magnetic logic. Despite the large number of experimental and theoretical work on spin-valve structures, the effects of interlayer interactions occurring in these structures at present time is not fully clarified.*

*Keywords: thin films, spin-valve structures, exchange interaction, unidirectional anisotropy.*