

УДК 537.6, 537.623, 537.624, 538.955

Влияние немагнитного слоя на однонаправленную анизотропию в трехслойной системе Fe/Cu/CoO

Петр Д. Ким*

Геннадий С. Патрин

Дмитрий А. Марущенко

Игорь А. Турпанов

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

Людмила А. Ли

Институт фундаментальной подготовки,
Сибирский федеральный университет,
Свободный 79, Красноярск, 660041,
Россия

Получена 18.09.2011, окончательный вариант 25.12.2011, принята к печати 10.01.2012

Данная работа посвящена изучению зависимости обменного смещения от толщины промежуточного слоя меди и температуры в поликристаллических трехслойных пленках ферромагнетик/немагнитный металл/антиферромагнетик (Fe/Cu/CoO). Выявлен осциллирующий характер величины обменного смещения в зависимости от толщины медной прослойки. Осцилляция наиболее четко проявляется в определенном диапазоне температур. Впервые нами обнаружена осцилляция обменного смещения с ростом температуры, данные осцилляции происходят со сменой знака поля обменного взаимодействия.

Ключевые слова: тонкие пленки, обменное взаимодействие, однонаправленная анизотропия.

Обменное смещение (ОС) одно из самых ярких явлений в магнетизме наноразмерных материалов [1]. Смещение петли гистерезиса и увеличение коэрцитивной силы относятся к главным свойствам ОС. Эти свойства были открыты более 50 лет назад в ходе исследования окисленных частиц Co [2]. Эффект однонаправленной анизотропии, возникающий за счет обменного взаимодействия на границе раздела двух материалов с различным типом магнитного упорядочения, а именно ферромагнетик (ФМ) — антиферромагнетик (АФ), привлекает внимание исследователей как в плане решения фундаментальных вопросов взаимодействия в гетерогенных системах, так и плане возможных практических применений.

Несмотря на длительный период исследования до сих пор нет единой общепринятой картины в понимании природы этого явления. Например, среди исследователей нет общего мнения, считать ли данное взаимодействие взаимодействием ближнего порядка [3] или "дальнодействующим" [4]. Представления о том, что однонаправленная анизотропия возникает вследствие обменного взаимодействия между соседними спинами Ф- и АФ-материала на интерфейсе, ведут к предположению о возможности существования подобного взаимодействия и в случае, если Ф- и АФ-материалы разделены проводящей прослойкой из немагнитного металла (НМ), подобно тому, как это имеет место для Ф/НМ/Ф-структур. Действительно, дальнодействующее обменное взаимодействие между Ф-слоями магнитных мультислойных структур (Ф/НМ)_n и им подобных через электроны проводимости немагнитной прослойки

*kim@iph.krasn.ru

известно и хорошо изучено [5–7]. Это взаимодействие имеет осциллирующий характер в зависимости от толщины НМ-слоя и хорошо объясняется теориями, построенными на основе модели косвенного обмена (Рудермана–Киттеля–Касуи–Йосиды (РККИ)–взаимодействия) [8, 9].

С другой стороны, взаимодействие между Ф- и АФ-слоями имеет более сложный характер. Исследования показали сильную зависимость поля обменного смещения от спиновой структуры на интерфейсе. Неровности интерфейса, присутствие доменных стенок, относительная ориентация спинов Ф- и АФ-слоев на интерфейсе оказывают значительное влияние на обменное взаимодействие и затрудняют сравнение экспериментальных результатов с теорией [10, 11].

Первая экспериментальная работа по взаимодействию Ф- и АФ-слоев через НМ-прослойку показала существование дальнедействующей связи между ними [5]. Однако осциллирующего характера данной связи, как это ожидалось для РККИ-подобного взаимодействия, обнаружено не было, ослабление межслойной связи имело экспоненциальный характер. В более поздних работах была обнаружена немонотонная зависимость обменного поля от толщины НМ-прослойки, которую авторы связали с неровностями интерфейса [3], и осциллирующая зависимость на фоне сильного монотонного ослабления величины обменного смещения, с периодом ~ 1 монослоя [12]. В работе [13] обнаружена ярко выраженная осциллирующая зависимость с периодом ~ 11 ангстрем (НМ материал – Cu) при температурах, близких к критической температуре АФ-слоя, что хорошо согласуется с предсказаниями РККИ – подобной теории. Однако при меньших температурах осциллирующая зависимость накладывается на экспоненциальное уменьшение обменного смещения, природа которого остается непонятой. Данный экспоненциальный вклад имеет сильную температурно-зависимость. Как одну из вероятных причин возникновения подобного температурно-зависимого вклада авторы указывают возможность существования мостиков между Ф- и АФ-слоями (в порах поликристаллической прослойки), приводящих к прямой обменной связи. В то же время в экспериментах на системе Co/Au/CoO осцилляций обнаружено не было [14]. В работе [15] обнаружена также осциллирующая зависимость величины поля обменного смещения от толщины слоя Cu в пленках Fe/Cu/CoO, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, в которых, однако, антиферромагнитный слой состоит из наноразмерных разориентированных частиц с предполагаемо аморфной структурой. В недавней работе по изучению взаимодействия между двумя АФ-слоями FeMn, разделенными прослойкой Cu, был обнаружен период осцилляций обменной связи, равный ~ 18 -20 ангстрем [16]. В наших исследованиях на поликристаллических образцах NiFe/Cu/FeMn обнаружены осцилляции обменного смещения с периодом ~ 8 Е, так же на фоне экспоненциального спада величины поля обменного смещения [17]. В то же время в ряде работ дальнедействующий характер обменного взаимодействия отрицается и приводятся экспериментальные доказательства того, что данный эффект имеет близкодействующую природу [3, 18].

Для исследования влияния немагнитного слоя на обменное смещение нами была приготовлена серия поликристаллических образцов Fe/Cu/CoO. Трехслойная система Fe/Cu/CoO изготовлена методом магнетронного распыления с базовым давлением Торр и рабочим давлением аргона 9 mTorr. Нижний слой CoO толщиной 5 нм был напылен на стеклянную подложку. Слой Cu, выращенный на слое CoO, с толщиной от 0,25 до 4 нм. А 10 нм Fe был напылен сверху слоя Cu. 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.

Для создания однонаправленной анизотропии образцы намагничивались при комнатной температуре (~ 300 К, что выше температуры Нееля для CoO ($T=293$ К)) в постоянном магнитном поле 2,5 КОе, приложенном в направлении легкой оси слоя Fe, и последую-

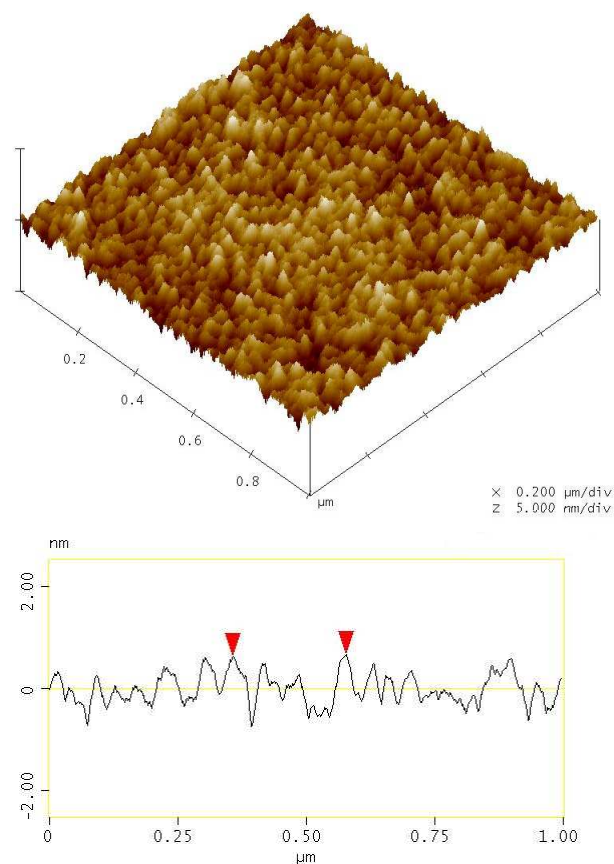


Рис. 1. Трехмерное АСМ-изображение поверхности трехслойной пленки Fe/Cu/CoO, и шероховатость поверхности пленки в произвольном направлении

щем охлаждении до температуры 77 К. Величина обменного смещения (H) определялась по петлям гистерезиса, которые были сняты вдоль оси легкого намагничивания с помощью магнитооптического эффекта Керра (МОКЕ). На рис. 2 представлены примеры петель гистерезиса, измеренных при температуре 80 К и комнатной температуре для Fe (100 Å)/Cu (2,5 Å)/CoO (50 Å) после охлаждения в поле 2,5 КОе.

На рис. 3 а приведена зависимость поля обменного смещения как функция температуры для нескольких выбранных толщин немагнитной прослойки. Из рисунка видно, что величина обменного смещения уменьшается с увеличением температуры. При низких температурах, вплоть до 180 К, снижение поля обменного смещения происходит довольно монотонно, изменяясь по экспоненциальному закону, зависящему от толщины медной прослойки. Однако с дальнейшим ростом температуры зависимость поля обменного смещения от температуры кардинально меняется (рис. 3 б, с, д, е). Поле обменного смещения изменяется с положительной на отрицательную величину, можно сказать, что происходит смена знака обменного взаимодействия, данный эффект наблюдался и в ряде других работ [19, 20]. Однако нами впервые обнаружены температурные осцилляции обменного смещения с неоднократными изменениями знака обменного взаимодействия между ферромагнитным и антиферромагнитным слоями. Объяснение данного эффекта нами пока не найдено, можно предположить, что он может быть связан с изменением доменной структуры в антиферо-

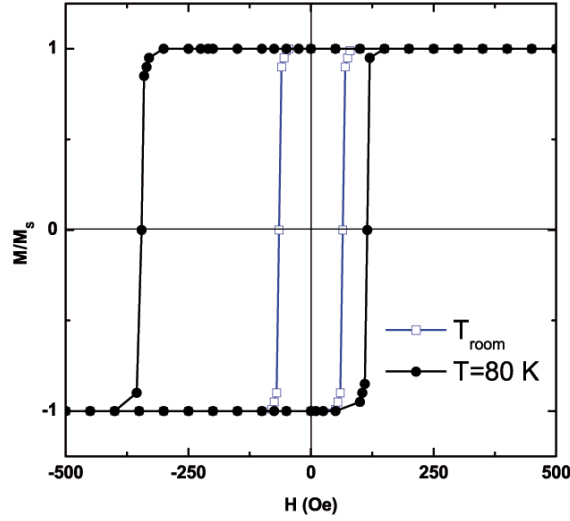


Рис. 2. Петля гистерезиса, измеренная при комнатной температуре и температуре 80 К для пленки Fe /Cu (t_{Cu})/CoO толщиной медного слоя 0,25 нм после охлаждения в магнитном поле 2,5 КОе

магном слое [21].

На рис. 4 изображена зависимость обменного смещения при различных температурах для Fe (100 Å)/Cu (t)/CoO (50 Å) как функция толщины медного слоя. Обменное смещение при температуре 80 К ведет себя как дальнедействующее взаимодействие, монотонно уменьшаясь с увеличением толщины меди, и исчезает при толщине меди свыше 40 Å. При увеличении температуры характер зависимости сильно меняется и, начиная с температуры 120 К, становится осциллирующим с толщиной меди. Наибольшая осцилляционная зависимость проявляется в диапазоне температур от 120 до 175 К, подобный эффект также описан в работах [22, 23]. Найденный период колебаний около 10 Å согласуется с длинным периодом межслойной обменной связи в Co/Cu/Co, а также в Fe/Cu/Fe [24, 25] и с осцилляцией магнитосопротивления в мультислойной структуре Co/Cu [26]. Это свидетельствует о том, что характер осциллирующего поведения для ФМ/НМ/ФМ- и ФМ/НМ/АФ-систем имеет общее происхождение и связан с электронной структурой межслойного материала.

Чтобы объяснить полученные результаты, выразим энергию обменного смещения рассматриваемой системы ФМ/НМ/АФМ следующим образом:

$$E = J_{INT}(T, t)S_F S_{AF,i} + J_{AF}(T)S_{AF,i}S_{AF}, \quad (1)$$

где S_F — спины ФМ-слоя, $S_{AF,i}$ — некомпенсированные спины в интерфейсе, которые участвуют в обменном взаимодействии с ФМ-слоем, S_{AF} — соседние спины в пределах АФМ-слоя, J_{INT} — межслойная связь между ФМ-и АФМ-слоями интерфейса (то есть между S_F и $S_{AF,i}$), J_{AF} — антиферромагнитная связь между $S_{AF,i}$ и S_{AF} . Связь дальнего действия $J_{INT}(T, t)$, зависящая от температуры и толщины промежуточного слоя, $J_{AF}(T)$, включает в себя температурную зависимость из-за теплового колебания поверхностных спинов. Для $t = 0$, $J_{INT}(T, 0)$ переходит в $J_{F/AF}(T)$ (граничная связь между ФМ- и АФМ-спинами), АФМ-связь между двумя АФМ-спинами.

Межслойная связь дальнего действия J_{INT} может иметь два различных физических происхождения. Первое — межслойная связь, вследствие РККИ — взаимодействия. Вторым возможным источником межслойной связи — дипольное взаимодействие или магнитостатиче-

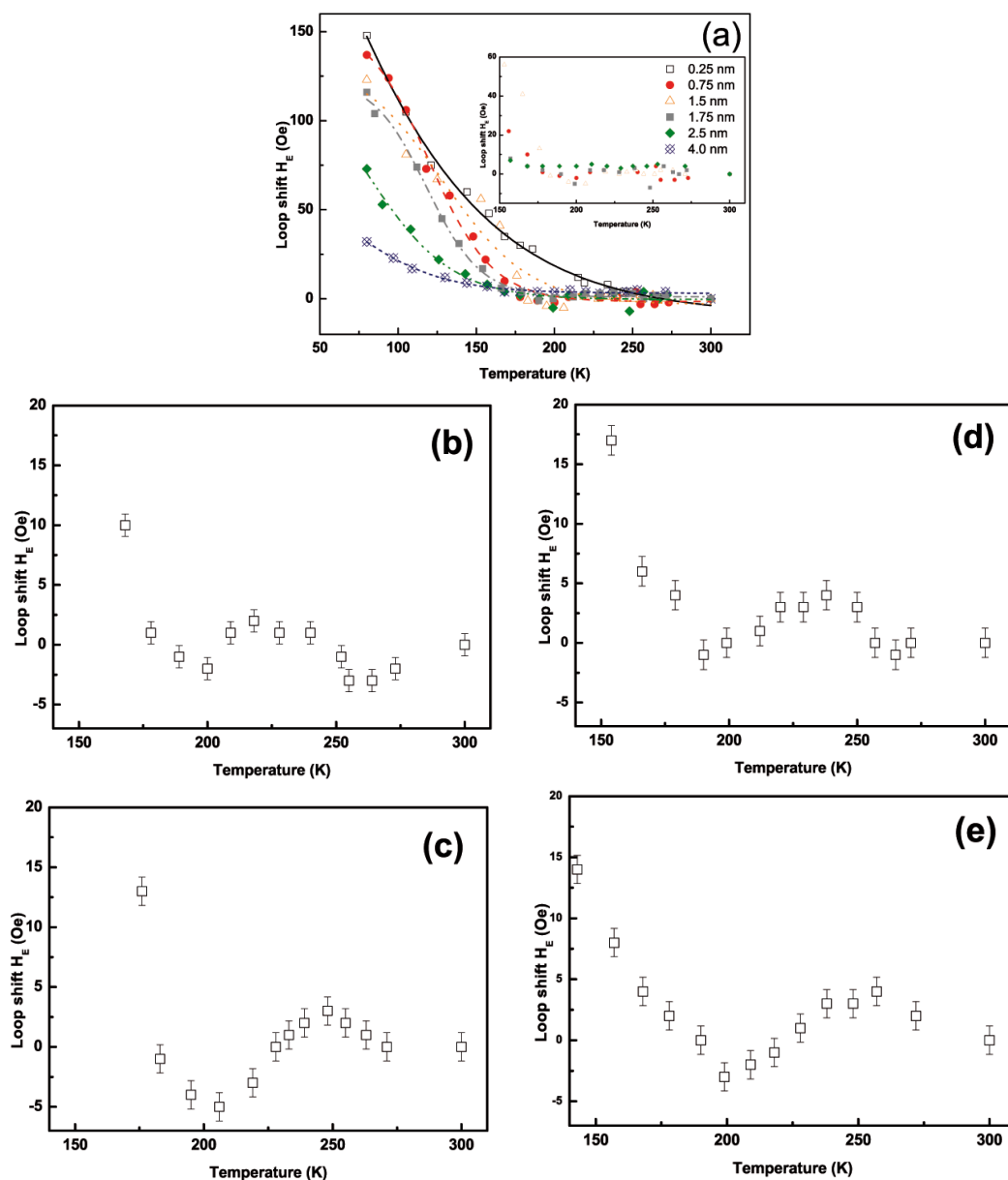


Рис. 3. Температурная зависимость поля обменного смещения для всех измеренных образцов Fe/Cu (t_{Cu})/CoO. Осцилляции поля обменного смещения от температуры для образцов с толщиной меди 0.75 нм (b), 1.5 нм (c), 1.75 нм (d) и 2.5 нм (e)

ская связь J_{dip} , которая зависит от грубости интерфейса. Из-за теплового колебания магнитных моментов АФМ-слоя в интерфейсе и ФМ-слоя, J_{dip} сильно зависит от температуры. Присутствие грубости в интерфейсе дает свой ненулевой вклад в величину связи, который может быть сопоставим с величиной РККИ – взаимодействия ($J_{РККИ}$) [27–30].

Температурная зависимость $J_{РККИ}$ более сложная, имеет два различных физических происхождения. Первое получается из разупорядочения моментов спинов. Показано, что для более толстых ФМ-слоев системы ФМ/НМ/ФМ, РККИ–связь спадает почти линейно

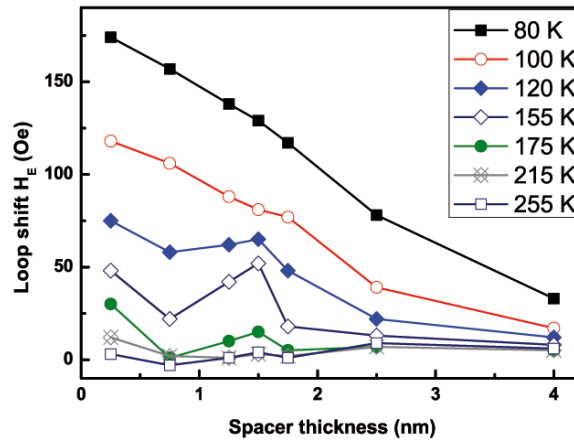


Рис. 4. Зависимость обменного смещения от толщины медного слоя при различной температуре для серии пленок Fe/Cu (t_{Cu})/Co

и медленно с T до T_C [29], а для монослоев — как $T \ln T$ [32]. Второе вызвано внутренней температурной зависимостью электронной структуры слоев [33]. Так как толщина промежуточного слоя меди определяет амплитуду осцилляций периодического члена в $J_{РККИ}$, следовательно, $J_{РККИ}$ при различных толщинах меди дает различный вклад в энергию.

Чтобы качественно объяснять полученные результаты, можно предложить простую картину, в которой $J_{РККИ}$ конкурирует с J_{dip} и J_{AF} . $J_{РККИ}$ медленно спадает с ростом температуры. И при высоких температурах, близких к T_N , $J_{РККИ}$ может преодолеть J_{dip} и J_{AF} связь, поэтому H_E становится колебательным с толщиной промежуточного слоя меди, как найдено выше для данных образцов.

С другой стороны, при низких температурах, J_{dip} и J_{AF} являются доминирующими, и колебательное поведение из-за $J_{РККИ}$ подавлено. Таким образом, механизм конкуренции между $J_{РККИ}$ и J_{dip} , так же как и J_{AF} , определяет характерное поведение межслойного поля обменного смещения H_E .

Таким образом, была исследована поликристаллическая обменносвязанная трехслойная структура Fe/Cu/CoO. Установлен немонотонный, осциллирующий, характер поведения обменного взаимодействия от толщины немагнитной прослойки, который наиболее четко проявляется при высоких температурах. Такое поведение, видимо, объясняется конкуренцией дипольного и РККИ взаимодействия. При низких температурах дипольное взаимодействие более сильное, подавляя РККИ-взаимодействие, следовательно, подавляет осцилляции обменного смещения. Однако с ростом температуры РККИ-взаимодействие становится доминирующим в системе Fe/Cu/CoO и следовательно осцилляции становятся более значительными. Также нами впервые обнаружены температурные осцилляции обменного смещения с неоднократными изменениями знака обменного взаимодействия между ферромагнитным и антиферромагнитным слоями.

Список литературы

- [1] J.Nogues, I.K.Schuller, Exchange bias, *J. Magn. Magn. Mater.*, **192**(1999), 203–232.
- [2] W.H.Meikeljohn, C.P.Bean, New magnetic anisotropy, *Phys. Rev.*, **102**(1956), 1413–1414.

- [3] L.Thomas, A.J.Kellock, S.S.P.Parkin, On the exchange biasing through a nonmagnetic spacer layer, *J. Appl. Phys.*, **87**(2000), 5061–5063.
- [4] N.J.Gekemeijer, T.Ambrose, C.L.Chien, Long-Range Exchange Bias across a Spacer Layer, *Phys. Rev. Lett.*, **79**(1997), 4270–4273.
- [5] P.Grunberg, R.Schreider, Y.Pang et al., Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Feupling of Fe Layers across Cr interlayers, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 2442–2445.
- [6] A.Cebollada, J.L.Martinez, J.M.Gallego et al., Antiferromagnetic ordering in Fe-Cu single-crystal superlattices, *Phys. Rev. B.*, **39**(1989), 9726–9729.
- [7] S.S.P.Parkin, N.More, K.P.Roche, Oscillation in Exchange Feupling and Magnetoresistance in Metallic Superlattice Structures: Fe/Ru, Fe/Cr, and Fe/Cr, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 2304–2307.
- [8] P.Bruno, C.Chappert, Oscillatory Feupling between Ferromagnetic Layers Separated by a Nonmagnetic Metal Spacer, *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991), 1602–1605.
- [9] P.Bruno, C.Chappert, Ruderman-Kittel theory of oscillatory interlayer exchange Feupling, *Phys. Rev. B.*, **46**(1992), 261–270.
- [10] A.E.Berkowitz, K.Takano, Exchange anisotropy a review, *J. Magn. Magn. Mater.*, **200**(1999), 552–570.
- [11] M.Kiwi, Exchange bias theory, *J. Magn. Magn. Mater.*, **234**(2001), 584–595.
- [12] T.Mewes, B.F.P.Roos, S.O.Demokritov, B.Hillebrands, Oscillatory exchange bias effect in FeNi/Cu/FeMn and FeNi/Cr/FeMn trilayer systems, *J. Appl. Phys.*, **87**(2000), 5064–5066.
- [13] M.T.Lin, C.H.Ho, C.R.Chang, Y.D.Yao, Thermally assisted oscillatory interlayer exchange bias Feupling, *Phys. Rev. B.*, **63**(2001), 100404(1)–100404(4).
- [14] M.Gruyters, M.Gierlings, D.Riegel, Rapid suppression of exchange bias across thin Au spacer layers, *Phys. Rev. B.*, **64**(2001), 132401(1)–132401(4).
- [15] V.K.Valev, M.Gruyters, A.Kirilyuk, Th.Rasing, Direct Observation of Exchange Bias Related Uncompensated Spins at the CoO/Cu Interface, *Phys. Rev. Lett.*, **96**(2006), 067206(1)–067206(4).
- [16] J.W.Cai, W.Y.Lai, J.Teng et al., Long-range oscillatory exchange interaction between antiferromagnetic FeMn layers across a Cu spacer, *Phys. Rev. B.*, **70**(2004), 214428(1)–214428(5).
- [17] Y.G.Yoo, S.C.Yu, P.D.Kim et al., The study of exchange Feupling in NiFe/Cu/IrMn trilayer structures by MOKE and FMR measurements, *J. Magn. Magn. Mater.*, **304**(2006), e62–e64.
- [18] J.Geshev, S.NiFelodi, L.G.Pereira et al., Exchange bias through a Cu interlayer in an IrMn/Fe system, *Phys. Rev. B.*, **75**(2007), 214402(1)–214402(5).
- [19] M.Ali, P.Adie, C.H.Marrows et al., Exchange bias using a spin glass, *Nature Materials*, **6**(2007), 70–75.
- [20] T.Gredig, I.N.Krivorotov et al., Unidirectional coercivity enhancement in exchange-biased Co/CoO, *Appl. Phys. Lett.*, **81**(2002), 1270–1272.

- [21] O.G.Shpyrko, E.D.Isaacs, J.M.Logan at al., Direct measurement of antiferromagnetic domain fluctuations, *Nature*, **447**(2007), 68–71.
- [22] Y.J.Lee, Ch.R.Chang, at al., Theoretical studies of oscillatory behavior for long-range exchange bias, *J. Magn. Magn. Mater.*, **239**(2002), 57–59.
- [23] Y.J.Lee, Ch.R.Chang, at al., Long-range exchange bias through a metal spacer, *J. Magn. Magn. Mater.*, **240**(2002), 264–266.
- [24] J.J.D. Miguel, A.Cebollada, J.M.Gallego, at al., Neutron-diffraction study on the field dependent magnetic ordering in Co–Cu superlattices, *J. Magn. Magn. Mater.*, **93**(1991), 89–94.
- [25] F.Petroff, A.Barthelemy, D.H.Mosca, at al., Oscillatory interlayer exchange and magnetoresistance in Fe/Cu multilayers, *Phys. Rev. B.*, **44**(1991), 5355–5357.
- [26] S.S.P.Parkin, Z.G.Li, D.J.Smith, Giant magnetoresistance in antiferromagnetic Co/Cu multilayers, *Appl. Phys. Lett.*, **58**(1991), 2710–2712.
- [27] S.Demokritov, E.Tsymbal, P.Grunberg, W.Zinn, I.K.Schuller, Magnetic-dipole mechanism for biquadratic interlayer coupling, *Phys. Rev. B.*, **49**(1994), 720–723.
- [28] D.Altbir, M.Kiwi, R.Ramirez, I.K.Schuller, The Dipolar Interaction and Its Interplay with Interface Roughness, *J. Magn.Magn. Mater.*, **149**(1995), L246-L250.
- [29] D.Altbir, J.d.A.e.Castro, P.Vargas, Magnetic coupling in metallic granular systems, *Phys. Rev. B.*, **54**(1996), R6823–R6826.
- [30] J.S.Yang, J.Lee, C.-R.Chang, Magnetostatic coupling in patterned spin valve structures, *IEEE Trans. Magn.*, **34**(1998), 2469–2472.
- [31] R.P.Erickson, Kristl, B.Hathaway, J.R.Cullen, Mechanism for non-Heisenberg-exchange coupling between ferromagnetic layers, *Phys. Rev. B.*, **47**(1993), 2626–2635.
- [32] Z.Q.Qiu, J.E.Mattson, at al., Temperature dependence of the magnetization of superlattices with variable interlayer magnetic couplings, *Phys. Rev. B.*, **45**(1992), 2252–2257.
- [33] D.M.Edwards, J.Mathon, R.B.Muniz, M.S.Phan, Oscillations in the exchange coupling of ferromagnetic layers separated by a nonmagnetic metallic layer, *J.Phys.: Condens. Matter.*, **3**(1991), 4941–4958.

The Influence of Nonmagnetic Layer on Unidirectional Anisotropy in Trilayer System Fe/Cu/CoO

Petr D. Kim
Gennady S. Patrin
Dmitry A. Maruschenko
Igor A. Turpanov
Ludmila A. Li

This paper considers the dependence exchange bias on the thickness of the intermediate layer of copper and temperature in polycrystalline thin films ferromagnet / nonmagnetic metal / antiferromagnet (Fe/Cu/CoO). We have revealed oscillatory of exchange bias value in depending on the thickness of the copper layer. The oscillation of the most clearly manifested in a certain range of temperatures. For the first time by us detected the oscillation of the exchange bias with increasing temperature, these oscillations occur with a change of sign of the field exchange interaction.

Keywords: thin films, exchange interaction, unidirectional anisotropy.