

PACS numbers: 75.20.En, 75.20.Hr, 75.30.Et, 75.60.Ej, 75.70.Ak, 75.70.Cn

Температурно-регулируемое межслойное обменное взаимодействие в многослойной структуре $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$

А. Ф. Кравец, А. И. Товстолыткин, И. М. Козак, Ю. О. Тихоненко, Ю. А. Савина*, В. А. Пащенко*

*Институт магнетизма НАН и МОН Украины,
бульв. Вернадского, 36-б,
03142 Киев, Украина,
*Физико-технический институт низких температур
им. Б. И. Веркина НАН Украины,
просп. Ленина, 47,
61103 Харьков, Украина*

Исследованы полевые и температурные зависимости намагниченности многослойной структуры $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (10 нм)/ $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ (6 нм)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (5 нм)/ $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ (12 нм) с обменным взаимодействием между слоями $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ через прослойку разбавленного ферромагнетика $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$. Экспериментально продемонстрировано температурное управление межслойным обменным взаимодействием в такой структуре. При переходе через точку Кюри для разбавленного сплава $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ под влиянием приложенного небольшого магнитного поля H_b магнитные моменты слоёв $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ упорядочиваются антипараллельно из-за исчезновения прямого ферромагнитного обмена между слоями. Магнитный момент многослойной структуры при этом стремится к нулю.

Досліджено польові та температурні залежності намагнетованості багатослоєвої структури $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (10 нм)/ $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ (6 нм)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (5 нм)/ $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ (12 нм) з феромагнетною обмінною взаємодією між шарами $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ і $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ через прошарок розбавленого феромагнетика $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$. Експериментально продемонстровано температурне регулювання міжшарової обмінної взаємодії у такій структурі. При переході через точку Кюрі для розбавленого стопу $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ під впливом прикладеного невеликого магнетного поля H_b магнетні моменти шарів $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ і $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ впорядковуються антипаралельно через зникнення прямого феромагнетного обміну між шарами. Магнетний момент багатослоєвої структури при цьому прямує до нуля.

The field and temperature dependences of magnetization of multilayer

$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (10 nm)/ $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ (6 nm)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (5 nm)/ $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ (12 nm) structure with exchange interaction between the $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ and $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ layers through a layer of diluted ferromagnetic $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ are studied. The possibility of the temperature control of interlayer exchange interaction in this structure is demonstrated experimentally. When going through the Curie point of the diluted $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ alloy, under influence of a small-applied magnetic field H_b , the magnetic moments of the $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ and $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ layers arranged antiparallel due to the disappearance of the direct ferromagnetic exchange between the layers. Thus, the magnetic moment of the multilayer structure tends to zero.

Ключевые слова: тонкие плёнки, разбавленные ферромагнетики, обменное взаимодействие, петли намагничивания, температура Кюри.

(Получено 14 ноября 2013 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Межслойные обменные взаимодействия играют доминирующую роль в магнитном упорядочении в магнитных многослойных структурах. К таким взаимодействиям относятся прямое ферромагнитное [1], не прямое осциллирующее [2–4], магнитостатическое неелевское [5–7] взаимодействия, а также обменное взаимодействие на границе ферромагнетик–антиферромагнетик [8, 9]. Эти обменные взаимодействия в окрестности комнатной температуры слабо изменяются при небольших изменениях температуры. Недавно была предложена [10, 11] и экспериментально реализована [12, 13] идея термоэлектрического управления магнитными и транспортными свойствами трёхслойных $F_1/f/F_2$ структур с ослабленным прямым ферромагнитным обменом между слоями сильных ферромагнетиков F_1 и F_2 через прослойку слабого ферромагнетика f . В качестве спейсера f , регулирующего обмен в трёхслойной структуре $F_1/f/F_2$, могут быть использованы тонкие слои разбавленных ферромагнитных сплавов $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ [12–14]. Управление магнитными свойствами структур $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}/F_2$ осуществляется путём термического управления обменным взаимодействием между F_1 и F_2 слоями через тонкую прослойку разбавленного сплава при переходе через точку Кюри последнего [14].

Поскольку Cu и Ni представляют собою ГЦК-металлы с близкими параметрами решётки ($a_{\text{Ni}} = 3,523 \text{ \AA}$, $a_{\text{Cu}} = 3,616 \text{ \AA}$), сплавы $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ при высоких температурах вплоть до $\cong 630 \text{ K}$ формируют однофазные твёрдые растворы замещения с ГЦК-решёткой (α -фаза), в которых Ni и Cu взаимно растворимы в любых пропорциях. При низших температурах фаза α распадается на две фазы: обогащённую никелем, по сравнению с фазой α , фазу α_1 и обеднённую никелем фазу α_2 , и формируются двухфазные твёрдые растворы Ni–Cu [15]. По этой причине, как в твёрдых массивных образцах сплавов $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ [16–

18], так и в тонких плёнках сплавов $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$, осаждённых методом магнетронного распыления [19], в парамагнитной фазе наблюдаются магнитные кластеры с моментами $8\text{--}12\mu_B$, соответствующие $\approx 20\text{--}30$ атомам Ni, и средними размерами $\approx 5\text{--}10$ нм.

Температура Кюри (T_C) как массивных [15], так и плёночных образцов [20–23] сплавов $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ зависит от концентрации Ni практически линейным образом. При изменении содержания Ni в сплаве $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ от ≈ 43 до 100% ат. T_C сплава плавно изменяется от ≈ 0 до 627 К. Подбирая состав прослойки $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$, можно регулировать интенсивность прямого ферромагнитного обмена в структуре $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}/F_2$ [14].

Из-за эффекта близости в окрестности интерфейса ферромагнитного металла с парамагнитным или немагнитным металлами наблюдаются одновременное уменьшение магнитного момента на атом для ферромагнетика [24–26] и подмагничивание как парамагнетика [27, 28], так и немагнитного металла [29, 30]. За счёт наведённого магнетизма в прослойке парамагнетика, заключённого между ферромагнетиками, T_C парамагнетика увеличивается [28]. Ранее было показано [14], что в $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}/F_2$ -структуре наблюдается нелинейная зависимость интенсивности обменного взаимодействия от толщины $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ прослойки, что свидетельствует о нелинейном распределении магнитного момента в ней. Следовательно, T_C тонких прослоек $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$, заключённых между ферромагнитными прокладками, за счёт эффекта подмагничивания может сильно отличаться от T_C для свободных $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ плёнок, что следует учитывать при конструировании конкретных термоуправляемых $F_1/\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}/F_2$ -структур.

Для исследования температурного управления межслойным обменным взаимодействием была выбрана многослойная структура, подобная обыкновенному спиновому вентилю [31, 32], с той лишь разницей, что вместо немагнитной прослойки в такой структуре применяется слой разбавленного ферромагнитного сплава $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$. Назовём такую структуру термомагнитным вентиляем (ТВ). Структуру такого ТВ можно описать как $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$, где F_1 — $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (10 нм), f — $\text{Ni}_{60}\text{Cu}_{40}$ (6 нм), $F_{2\text{ pin}}$ — $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (5 нм)/ $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ (12 нм). Магнитомягкий относительно свободный слой F_1 в таком ТВ служит как управляемый слой, а магнитожёсткий слой $F_{2\text{ pin}}$, обменно связанный со слоем антиферромагнетика (АФМ) $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$, — как закреплённый слой. Толщина слоя антиферромагнетика $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ была выбрана из соображения надёжного обменного взаимодействия с ферромагнитным слоем $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ [33]. Поскольку слои F_1 и $F_{2\text{ pin}}$ структуры $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$ перемагничивается не одновременно, то в такой структуре возможно состояние, когда магнитные моменты слоёв F_1 и $F_{2\text{ pin}}$ упорядочиваются антипараллельно, а суммарный магнитный момент структуры $F_1/f/F_{2\text{ pin}}$, в случае равенства магнитных

моментов слоёв F_1 и $F_{2 \text{ pin}}$, стремится к нулю. В некотором роде, такое магнитное переключение в структуре $F_1/f/F_{2 \text{ pin}}$ подобно переключению в процессе записи с термическим ассистированием, применяемой в магнитной памяти с произвольным доступом, основанном на переходе через точку Нееля для антиферромагнетика, обменно связанного с ферромагнитным слоем [34]. Толщины слоёв $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (10 нм) и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (5 нм) были выбраны из соображения приблизительного равенства их магнитных моментов, а толщина $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ прослойки (6 нм) была выбрана такой, чтобы избежать наличия любого заметного непрямого осциллирующего или магнитостатического неелевского обменного взаимодействия. Так, в магнитных многослойниках с $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ прослойками осциллирующее взаимодействие затухает при толщинах $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ прослоек в ≈ 5 нм [35–39]. То же самое наблюдается и в обычных спиновых вентильях с немагнитными прослойками толщиной ≥ 5 нм [40]. Неелевское взаимодействие, ответственное, в частности, за смещение от 0 минорной (для свободного слоя) петли перемагничивания в спинвентильных структурах, затухает с увеличением толщины немагнитной прослойки и становится незначительным уже при толщине прослойки ≈ 5 нм [7, 41].

Задачей данной работы есть экспериментальная демонстрация возможности температурного управления межслойным обменным взаимодействием в магнитной обменно-связанной структуре $F_1/f/F_{2 \text{ pin}}$.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Магнитная многослойная структура $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (10 нм)/ $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ (6 нм)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (5 нм)/ $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ (12 нм) (далее $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2 \text{ pin}}$) была осаждена при комнатной температуре на термически окислённую кремниевую подложку методом магнетронного осаждения с использованием мультимагнетронной распылительной системы AJA Orion. Остаточное давление в камере было $\approx 6 \cdot 10^{-9}$ Тор. Плёнки осаждались в плазме аргона при давлении 5 мТор. Подложка в процессе осаждения плёнок вращалась со скоростью 32 об/мин. Слои ферромагнетиков $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, а также слой антиферромагнетика $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ были осаждены их одинарных сплавных мишеней. Слои разбавленного ферромагнитного сплава $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ был осаждён методом магнетронного соосаждения чистых Cu и Ni из отдельных мишеней. Состав разбавленного ферромагнитного сплава $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ регулировался путём поддержания соотношения скоростей осаждения Ni и Cu, r_{Ni} и r_{Cu} , контролируемых с помощью кварцевого датчика скорости осаждения плёнок. При этом учитывалась связь контролируемых кварцевым датчиком весовых y , и ожидаемых атомных x , процентных концентраций в сплаве $\text{Ni}_x\text{Cu}_{100-x}$ согласно формуле $x =$

$= 100y/[y + (100 - y)m_{\text{Ni}}/m_{\text{Cu}}]$, где m_{Ni} и m_{Cu} , соответственно, атомные веса Ni и Cu. Весовая концентрация y в сплаве $\text{Ni}_y\text{Cu}_{100-y}$ связана с r_{Ni} и r_{Cu} как $y/(100 - y) = (\rho_{\text{Ni}}/\rho_{\text{Cu}})(r_{\text{Ni}}/r_{\text{Cu}})$, где ρ_{Ni} и ρ_{Cu} , соответственно, плотности Ni и Cu. Вычисленные таким образом и применяемые при осаждении слоя $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ скорости осаждения r_{Ni} и r_{Cu} были, соответственно, 0,0339 нм/с и 0,055 нм/с.

Для формирования обменного взаимодействия между слоями ферромагнетика $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ и антиферромагнетика $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ осаждение всей многослойной структуры осуществлялось в приложенном магнитном поле $\cong 1$ кЭ.

Полевые и температурные зависимости намагниченности полученной многослойной наноструктуры были исследованы методом СКВИД магнитометрии в диапазонах магнитных полей ± 5 кЭ и температур 5–400 К соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 приведены петли перемагничивания для структуры $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2 \text{ pin}}$, измеренные при $T = 300$ К и $T = 5$ К. Петли состоят из двух частей, минорной и мажорной, происходящих, соответственно, от перемагничивания свободного F_1 и закреплённого $F_{2 \text{ pin}}$ слоёв.

Закреплённый слой $F_{2 \text{ pin}}$ перемагничивается далеко от нулевого магнитного поля из-за обменного взаимодействия с АФМ. Свободный F_1 слой должен идеально перемагничиваться вблизи нулевого магнитного поля; на практике здесь присутствует смещение H_{coupl}

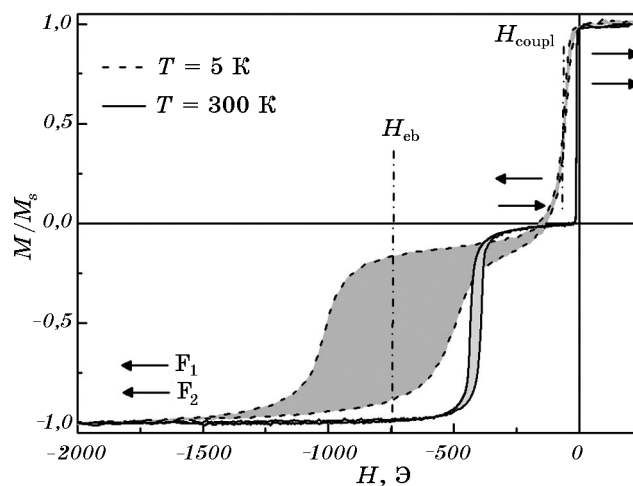


Рис. 1. Петли перемагничивания для структуры $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2 \text{ pin}}$, измеренные при $T = 300$ К и $T = 5$ К.

из-за взаимодействия с закреплённым слоем. Форма петель перемагничивания структуры $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2\text{ pin}}$ подобна петлям для обыкновенного спинового вентиля (СВ) [31, 32]. Разница лишь в том, что при толщине немагнитной прослойки 6 нм для СВ ввиду отсутствия любого заметного обменного (за исключением неелевского [41]) взаимодействия смещение минорной петли $H_{\text{coupl}} \approx 0$, в то время как для ТВ H_{coupl} , особенно при низкой температуре, существенно больше ввиду ферромагнитного обменного взаимодействия между слоями F_1 и $F_{2\text{ pin}}$ через слабомангнитную прослойку $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$. В плоской промежуточной области, где намагниченность структуры $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2\text{ pin}}$ приблизительно равняется нулю, магнитные моменты слоёв F_1 и $F_{2\text{ pin}}$ упорядочиваются антипараллельно (рис. 1).

Петли перемагничивания структуры $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2\text{ pin}}$ характеризуются обменными полями H_{coupl} и H_{eb} (рис. 1), где H_{coupl} — поле обменного взаимодействия слоёв F_1 и $F_{2\text{ pin}}$, а H_{eb} — поле обменного взаимодействия слоёв F_2 и АФМ.

На рисунке 2 приведены минорные петли перемагничивания структуры $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2\text{ pin}}$, измеренные при $T = 5\text{ К}$ и $T = 300\text{ К}$, а также пунктирными линиями обозначены магнитные поля H_b , прикладываемые при температурных измерениях намагниченности.

На рисунке 3 приведены измеренные в разных приложенных небольших полях H_b температурные зависимости намагниченности структуры $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2\text{ pin}}$. При переходе через точку Кюри для разбавленного сплава $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ под действием H_b происходит переключение магнитного момента слоя F_1 в $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2\text{ pin}}$ структуре

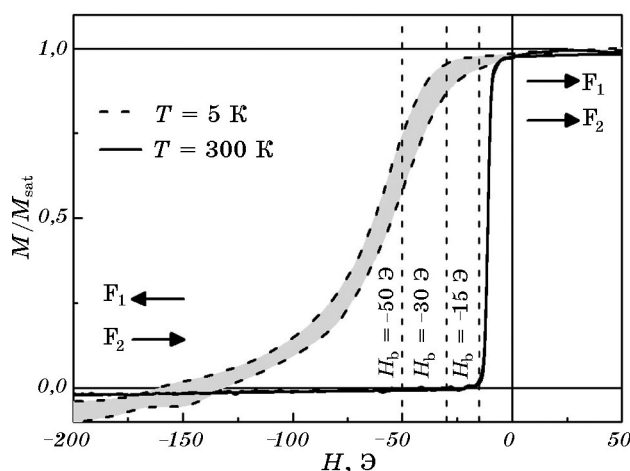


Рис. 2. Минорные петли перемагничивания структуры $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2\text{ pin}}$, измеренные при $T = 5\text{ К}$ и $T = 300\text{ К}$. Пунктирными линиями обозначены приложенные поля H_b .

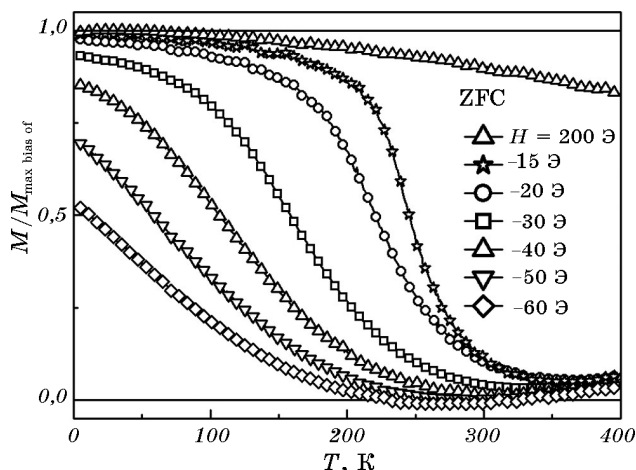


Рис. 3. Температурные зависимости намагниченности $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2 \text{ pin}}$ структуры, измеренные в разных полях H_b .

от параллельного к антипараллельному упорядочения по отношению к магнитному моменту слоя $F_{2 \text{ pin}}$.

Следует заметить, что свободный сплав $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ как в массивном [15], так и в плёночном [20–22] виде находится в парамагнитном состоянии при любых температурах, но будучи размещённым между ферромагнитными слоями, переходит в ферромагнитное состояние при комнатной температуре из-за эффекта близости. Температура Кюри слоя $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ при этом сильно возрастает. Из-за этого слои F_1 и $F_{2 \text{ pin}}$ в структуре $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2 \text{ pin}}$ при комнатной температуре становятся обменно связанными. С ростом температуры при переходе через точку Кюри T_C для подмагниченного сплава $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ при правильно подобранном H_b (в нашем случае это -15 – 30 Э) возможно переключение магнитного момента слоя F_1 из параллельной в антипараллельную ориентацию по отношению к магнитному моменту слоя $F_{2 \text{ pin}}$. С учётом равенства магнитных моментов F_1 и $F_{2 \text{ pin}}$ слоёв суммарная намагниченность $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2 \text{ pin}}$ структуры при этом стремится к нулю. Подобное переключение назовём Кюри-переключением (КП) [14].

Из рисунка 3 видно, что температура T_{tr} и чёткость (полуширина температурного интервала переключения) dT_{tr} Кюри-переключения сильно зависят от H_b . Для определения T_{tr} и dT_{tr} температурные кривые намагниченности $M(T)$ были продифференцированы (рис. 4) и интерполированы функциями Гаусса. T_{tr} и dT_{tr} , определённые вышеуказанным способом, приведены на рис. 5. Из рисунка 5 видно, что T_{tr} растёт, а dT_{tr} уменьшается с уменьшением величины H_b . Таким образом, изменяя H_b , можно в широких пределах изменять как температуру, так и чёткость магнитного переключения

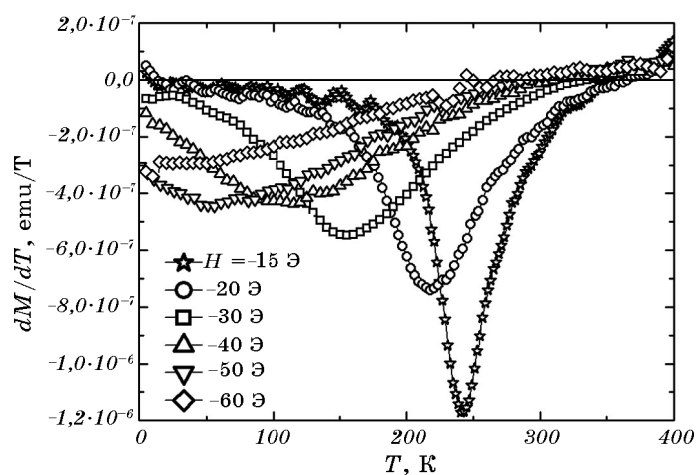


Рис. 4. Первые производные от температурных кривых намагниченности структуры $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2 \text{ pin}}$, измеренные в разных полях H_b .

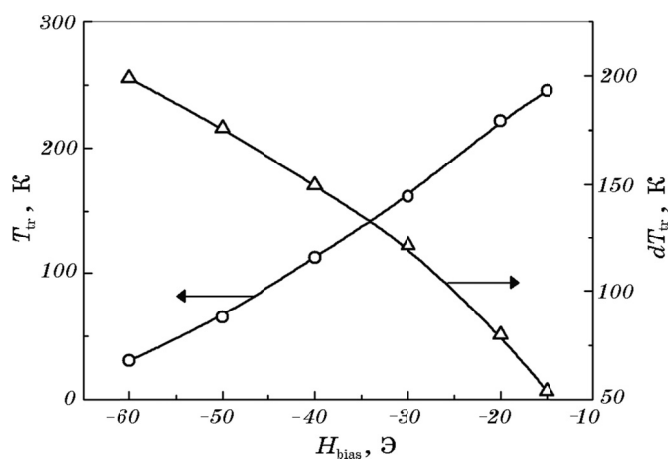


Рис. 5. Температуры переключения T_{tr} и полуширины температурных интервалов переключения dT_{tr} структуры $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2 \text{ pin}}$ для разных полей H_b .

в обменно-связанной структуре $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2 \text{ pin}}$. При этом небольшие изменения H_b (десятки Э) приводят к большим изменениям T_{tr} (сотни К).

4. ВЫВОДЫ

Экспериментально продемонстрировано температурное управление межслойным обменным взаимодействием в магнитной многослой-

ной структуре $F_1/f/F_{2 \text{ pin}}$, где F_1 — $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (10 нм), f — $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$ (6 нм), $F_{2 \text{ pin}}$ — $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (5 нм)/ $\text{Mn}_{80}\text{Ir}_{20}$ (12 нм).

Прямое обменное взаимодействие между ферромагнитными слоями F_1 и $F_{2 \text{ pin}}$ через прослойку разбавленного ферромагнитного сплава f зависит от температуры и исчезает при переходе через точку Кюри для разбавленного сплава $\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}$. При этом под влиянием приложенного небольшого магнитного поля H_b магнитные моменты слоёв $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ упорядочиваются антипараллельно, а магнитный момент многослойной структуры стремится к нулю, то есть происходит магнитное переключение.

Изменяя в незначительных пределах (на несколько десятков Э) H_b , можно в широких пределах (сотни К) изменять как температуру, так и чёткость магнитного переключения в обменно-связанной многослойной структуре $F_1/\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{60}/F_{2 \text{ pin}}$.

Работа частично поддержана Целевой комплексной программой фундаментальных исследований НАН Украины «Фундаментальные проблемы наноструктурных систем, наноматериалов, нанотехнологий» (проект № 22/13-Н).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. H. Bozorth, *Ferromagnetism* (Princeton, New Jersey–Toronto–London–New York: D. Van Nostrand Company, Inc.: 1951).
2. S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche, *Phys. Rev. Lett.*, **64**: 2304 (1990).
3. S. S. P. Parkin, *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 3598 (1991).
4. P. Bruno and C. Chappert, *Phys. Rev. Lett.*, **67**: 1602 (1991).
5. L. Néel, *C. R. Acad. Sci. Ser. R*, **255**: 1545 (1962); L. Néel, *C. R. Acad. Sci. Ser. R*, **255**: 1676 (1962).
6. J. C. Bruyère, G. Clerc, O. Massenet, R. Montmory, L. Néel, D. Paccard, and A. Yelon, *J. Appl. Phys.*, **36**: 944 (1965).
7. T. C. Schulthess and W. H. Butler, *J. Appl. Phys.*, **87**: 5759 (2000).
8. W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, *Phys. Rev.*, **102**: 1413 (1956).
9. W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, *Phys. Rev.*, **105**: 904 (1957).
10. A. M. Kadigrobov, S. Andersson, D. Radić, R. I. Shekhter, M. Jonson, and V. Korenivski, *J. Appl. Phys.*, **107**: 123706 (2010).
11. A. M. Kadigrobov, S. Andersson, Hee Chul Park, D. Radić, R. I. Shekhter, M. Jonson, and V. Korenivski, *J. Appl. Phys.*, **111**: 044315 (2012).
12. S. Andersson and V. Korenivski, *J. Appl. Phys.*, **107**: 09D711 (2010).
13. S. Andersson and V. Korenivski, *IEEE Trans. Magn.*, **46**: 2140 (2010).
14. A. F. Kravets, A. N. Timoshevskii, B. Z. Yanchitsky, M. A. Bergmann, J. Buhler, S. Andersson, and V. Korenivski, *Phys. Rev. B*, **86**: 214413 (2012).
15. D. J. Chakrabarti, D. E. Laughlin, S. W. Chen, and Y. A. Chang, *Cu–Ni (Copper–Nickel) in Phase Diagrams of Binary Copper Alloys* (Eds. P. Subramanian, D. Chakrabarti, and D. Laughlin) (Materials Park, OH: ASM International: 1994), p. 276.
16. C. G. Robbins, H. Claus, and P. A. Beck, *Phys. Rev. Lett.*, **22**: 1307 (1969).
17. T. J. Hicks, B. Rainford, J. S. Kouvel, G. G. Low, and J. B. Comly,

- Phys. Rev. Lett.*, **22**: 531 (1969).
18. R. W. Houghton, M. P. Sarachik, and J. S. Kouvel, *Phys. Rev. Lett.*, **25**: 238 (1970).
 19. G. Iannone, D. Zola, A. Angrisani Armenio, M. Polichetti, and C. Attanasio, *Phys. Rev. B*, **75**: 064409 (2007).
 20. A. P. Thakoor and K. L. Chopra, *J. Appl. Phys.*, **48**: 3850 (1977).
 21. I. Bakonyi, E. Tyth-Kádár, J. Tyth, T. Becsei, T. Tarnyczi, and P. Kamasa, *J. Phys.: Condens. Matter*, **11**: 963 (1999).
 22. A. Rusanov, R. Boogaard, M. Hesselberth, and H. Sellier, and J. Aarts, *Physica C*, **369**: 300 (2002).
 23. A. F. Kravets, A. N. Timoshevskii, B. Z. Yanchitsky, O. Yu. Salyuk, S. O. Yablonovskii, S. Andersson, and V. Korenivski, *J. Magn. Magn. Mater.*, **324**: 2131 (2012).
 24. J. J. Hauser, *Phys. Rev.*, **187**: 580 (1969).
 25. J. S. Moodera and R. Meservey, *Phys. Rev. B*, **29**: 2943 (1984).
 26. Z. Q. Qiu, H. Tang, Y. W. Du, G. P. Stern, and J. C. Walker, *J. Appl. Phys.*, **63**: 3657 (1988).
 27. N. Garcia and A. Hernando, *J. Magn. Magn. Mater.*, **99**: L12 (1991).
 28. I. Navarro and M. Ortuco, and A. Hernando, *Phys. Rev. B*, **53**: 11 656 (1996).
 29. M. G. Samant, J. Stühr, S. S. P. Parkin, G. A. Held, B. D. Hermsmeier, F. Herman, M. van Schilfgaarde, L.-C. Duda, D. C. Mancini, N. Wassdahl, and R. Nakajima, *Phys. Rev. Lett.*, **72**: 1112 (1994).
 30. P. Swaminathan, R. A. Rosenberg, G. K. Shenoy, J. S. Palmer, and J. H. Weaver, *Appl. Phys. Lett.*, **91**: 202506 (2007).
 31. B. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, and D. Mauri, *Phys. Rev. B*, **43**: 1297 (1991).
 32. B. Dieny, V. S. Speriosu, S. Metin, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, P. Baumgart, and D. R. Wilhoit, *J. Appl. Phys.*, **69**: 4774 (1991).
 33. J. van Driel, F. R. de Boer, K.-M. H. Lenssen, and R. Coehoorn, *J. Appl. Phys.*, **88**: 975 (2000).
 34. I. L. Prejbeanu, M. Kerekes, R. C. Sousa, H. Sibuet, O. Redon, B. Dieny, and J. P. Nozières, *J. Phys.: Condens. Matter*, **19**: 165218 (2007).
 35. S. N. Okuno and K. Inomata, *Phys. Rev. Lett.*, **70**: 1711 (1993).
 36. S. S. P. Parkin, C. Chappert, and F. Hermann, *Europhys. Lett.*, **24**: 71 (1993).
 37. J.-F. Bobo, L. Hennet, M. Piecuch, and J. Hubsch, *J. Phys.: Condens. Matter*, **6**: 2689 (1994).
 38. R. Nakatani, K. Hoshino, H. Hoshiya, and Y. Sugita, *J. Magn. Magn. Mater.*, **166**: 261 (1997).
 39. N. N. Lathiotakis, B. L. Györffy, E. Bruno, and B. Ginatempo, *Phys. Rev. B*, **62**: 9005 (2000).
 40. J. L. Leal and M. H. Kryder, *J. Appl. Phys.*, **79**: 2801 (1996).
 41. J. C. S. Kools, W. Kula, D. Mauri, and T. Lin, *J. Appl. Phys.*, **85**: 4466 (1999).