

А.М. Касумов, О.І. Дмитрієв, М.В. Радченко, О.Є. Байбара, О.І. Биков,
К.А. Коротков, В.М. Караваєва, К.О. Вишневська, О.І. Оліфан, А.І. Євтушенко

АНОМАЛЬНИЙ ЕФЕКТ ХОЛЛА В ДВОШАРОВИХ НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВКАХ Ni / Gd₂O₃

*Інститут проблем матеріалознавства ім І.М. Францевича Національної академії наук України
вул. Академіка Кржижановського, 3, Київ, 03142, Україна, E-mail: kasumov@ipms.kiev.ua*

Методом аномального ефекту Холла показано, що при контакті нанорозмірних по товщині шарів металу групи заліза (Ni) і оксиду РЗМ (Gd₂O₃) спостерігається збільшення намагніченості феромагнітного металу на 15–35%. Таке збільшення, яке не потребує витрат енергії і застосування підсилювальної апаратури, є вельми перспективним для застосування в нанотехнологіях. Посилення намагніченості обумовлено виникненням в області контакту обмінної *f-d* взаємодії між атомами з незаповненими *d*- та *f*-електронними оболонками, що входять до складу шарів. Обмінна взаємодія стимулює впорядкування магнітної структури феромагнітного металу і підвищення його намагніченості. Можливість обмінної *f-d* взаємодії в області контакту шарів металів групи заліза і оксидів РЗМ була підтверджена методом електронного парамагнітного резонансу в наших попередніх дослідженнях. В даній роботі показано також відсутність впливу на зростання намагніченості інших можливих механізмів, що породжуються різницею параметрів кристалічної ґратки, опору, магнітних та термомагнітних властивостей контактуючих шарів.

Встановлено математичний зв'язок потенціалу на холлівських контактах та додаткової намагніченості, що викликана обмінною *f-d* взаємодією. Використовуючи даний зв'язок, виявлено механізм впливу зовнішнього магнітного поля на додаткову намагніченість. Показано, що ця намагніченість залежить від співвідношення товщини шарів Ni і Gd₂O₃. Встановлено, що вектор цієї намагніченості направлений від шару Gd₂O₃ до шару Ni.

Ключові слова: аномальний ефект Холла, обмінна *f-d* взаємодія, намагніченість

ВСТУП

Двошарові структури, що складаються з контактуючих шарів металів групи заліза (Fe, Co, Ni) та оксидів рідкісноземельних металів (РЗМ), відрізняються тим, що в результаті їхнього контакту спостерігається посилення гальваномагнітних (магнітоопір) [1] та магнітооптичних (ефект Фарадея) [2] властивостей металевих шарів. У плівках нанорозмірної товщини посилення відбувається без споживання енергії та використання підсилювального обладнання, що безперечно репрезентує інтерес для використання в нанотехнологіях. Можливе пояснення для спостережуваного посилення полягає в тому, що при контакті шарів з атомами, які мають незаповнені *d*- та *f*-електронні оболонки (відповідно Fe, Co, Ni та РЗМ), між шарами встановлюється обмінна *f-d* взаємодія (EfdI – exchange *f-d* interaction), що впорядковує магнітну структуру полікристалічних феромагнітних металів та тим самим підвищує їхню намагніченість. Останнє приводить до посилення

гальваномагнітних та магнітооптичних властивостей.

Можливість EfdI в області контакту шарів металів групи заліза та оксидів РЗМ була підтверджена методом ЕПР [3]. На прикладі двошарової плівки Fe/Gd₂O₃ було показано, що параметр обмінної взаємодії значно посилюється: відносно Gd₂O₃ в ~ 10 разів, відносно Fe в 4.5 рази.

В роботах [4–6] була здійснена спроба визначення намагніченості шарів Fe, Co, Ni/оксид РЗМ методом SQUID-вимірювань. Проте, попри високу чутливість методики вимірювання, мала товщина використаних шарів (1÷2 нм) не дозволила визначити величину намагніченості та її зв'язок з *f-d* взаємодією. Як видно з робіт [1, 2], EfdI стає помітною при товщині понад 30 нм.

В даній роботі поставлено за мету вивчити вплив EfdI на намагніченість феромагнітного шару в двошарових нанорозмірних плівках Ni/Gd₂O₃ методом аномального ефекту Холла, сприйнятливою до даної властивості [7]. Для додаткового

підвищення чутливості методу товщина шарів в структурах обиралася більшою за 30 нм.

Зв'язок між потенціалом ефекту Холла та намагніченістю, що викликана EfdI взаємодією, може бути встановлений наступним чином.

ЗВ'ЯЗОК ПОТЕНЦІАЛУ ЕФЕКТУ ХОЛЛА ТА НАМАГНІЧЕНІСТЮ, ЯКА ЗУМОВЛЕНА $f-d$ ВЗАЄМОДІЄЮ

Аномальний ефект Холла описує поведінку досліджуваного об'єкта, що має магнітні властивості та вимірюється класичним двозондовим методом при постійному струмі [8]. Позначимо через V_1 величину потенціалу між холлівськими контактами при струмі I , що тече вздовж зразка. У випадку феромагнітної наноплівки нікелю холлівський потенціал V_1 , у відповідності з [8, 9], можна записати у вигляді:

$$V_1 = \frac{R_0 B}{h} I + \frac{R_s M}{h} I + W, \quad (1)$$

де R_0 та R_s – коефіцієнти нормального та аномального ефектів Холла; h – товщина зразка; B – індукція магнітного поля; M – намагніченість зразка; $W = V_E + V_{HE} + V_{PL} + V_\delta$ – сума потенціалів, визначених ефектами Етінгсаузена, Нернста-Етінгсаузена, Рігі-Ледюка та нееквівалентності контактів, відповідно.

Якщо на феромагнітний нанорозмірний шар металу групи заліза наноситься шар РЗМ, то в області їхнього інтерфейсу виникає EfdI, що змінює намагніченість зразка на величину M_{f-d} , та холлівський потенціал такої системи дорівнює:

$$V_2 = \frac{R_0 B}{h} I + \frac{R_s (M \pm M_{f-d})}{h} I + W. \quad (2)$$

Тут знак «+» та «-» залежить від того, чи співпадають вектори \vec{M} та \vec{M}_{f-d} за напрямком.

Припускаючи, що в (1) та (2) величина W залишається незмінною [9], одержимо:

$$R = \frac{(V_2 - V_1) h}{I} = \pm R_s M_{f-d}. \quad (3)$$

Вираз (3) встановлює шуканий зв'язок між потенціалами на холлівських контактах та намагніченістю M_{f-d} , яка викликана EfdI. З (3) видно, що для знаходження M_{f-d} необхідно провести порівняння потенціалів на холлівських контактах феромагнітного шару до та після нанесення на нього оксиду РЗМ.

ЕКСПЕРИМЕНТ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

В якості зразка для дослідження M_{f-d} був використаний шар Ni товщиною $h_{Ni} = 70$ нм. до та після нанесення на нього шару оксиду РЗМ Gd_2O_3 . Плівки Ni та Gd_2O_3 наносилися електронно-променевим випаровуванням нікелю марки Н-О та хімічно чистого Gd_2O_3 за умов: Ni – тиск в робочій камері $1 \cdot 10^{-3}$ Па, температура ситалової (pyrokers – USA) підкладки 260 °С, швидкість осадження шару 14 нм/хв; Gd_2O_3 – парціальний тиск O_2 в робочій камері $2 \cdot 10^{-2}$ Па, температура підкладки з шаром Ni 25 °С, швидкість осадження шару 30 нм/хв. Товщина шару Gd_2O_3 $h_{Gd_2O_3}$ варіювалась в межах 40 – 160 нм. Структуру шарів металу та оксиду контролювали за допомогою методу рентгенівської дифракції. Використовували дифрактометр ДРОН-3М та CuK_α випромінювання. Порівняння дифракційних картин ситалової підкладки та осаджених на неї шарів нікелю та оксиду гадолінію представлено на рис. 1.

Загальний вигляд дифрактограм, записаних в одних умовах, дозволяє сказати, що при формуванні шару металу спостерігається поява додаткової аморфізованої речовини. Це викликає деяке збільшення фону дифракційної картини. Наступне нанесення шару Gd_2O_3 приводить до більш значного зростання значення інтенсивності фону дифрактограми. На дифрактограмі двошарового матеріалу відсутні сліди піків оксиду гадолінію. Ці факти свідчать про те, що шар оксиду не має дальнього порядку – він є аморфним.

Як свідчить дифрактограма підкладки, кристалічна складова ситалу у діапазоні кутів $2\theta = 43$ – 46° має дві дифракційні лінії. В цьому діапазоні також розташоване найбільш потужне відбиття нікелю – (111), яке при використанні CuK_α випромінювання відповідає куту 44.5° . Для виділення цього відбиття шару металу використали окремі

дифрактограми, записані з кроком 0,02° (рис. 1 б). Апроксимація піку нікелю (111) функцією Гаусса дозволила отримати параметри кристалічної комірки Ni та розрахувати значення областей когерентного розсіювання (ОКР). Параметри кристалічної

ґратки нікелю без шару оксиду дорівнюють 0.3529 нм, а у двошаровому матеріалі – 0.3525 нм. Розміри ОКР знаходяться в межах 10 нм. Шар Ni металу формується як полікристалічна структура, яка не має переважної орієнтації.

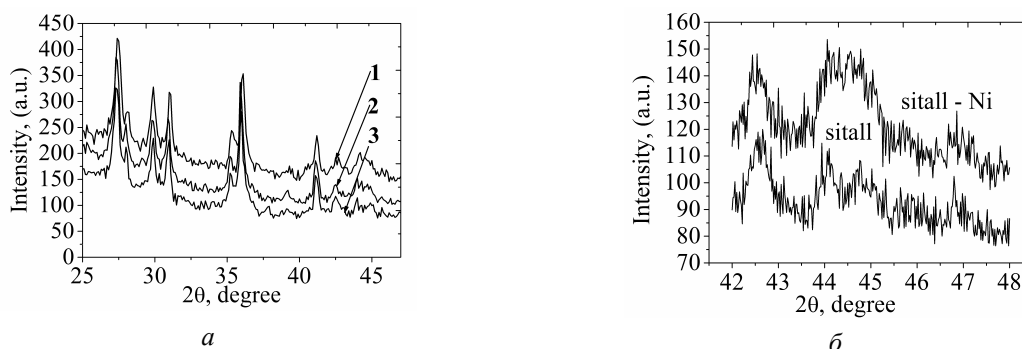


Рис. 1. Порівняння дифрактограм: а – ситалової підкладки (1), підкладки з осадженим Ni (2) та підкладки із шарами Ni та Gd₂O₃ (3); б – ситалової підкладки, та підкладки з осадженим Ni в діапазоні 2θ = 42–48°

При осадженні шару Gd₂O₃ зафіксоване також деяке зменшення міжплощинної відстані у пакеті площин (111): із значення 2.038 Å (2θ = 44.457°) до 2.035 Å (2θ = 44.522°). Такий ефект виникає при появі напруги стискання [10]. Такі напруги генеруються при осадженні високоенергетичних частинок оксиду гадолінію.

Аномальний ефект Холла досліджувався при кімнатній температурі на комп'ютерній установці з використанням програмного забезпечення, створеного на базі мультиметра Keithley 2700/E з системою збору даних. Величину струму 10 мА вибирали за умови відсутності нагріву зразка.

На рис. 2 представлені експериментальні залежності V₁ та V₂ шару Ni до та після нанесення на нього шару Gd₂O₃ в залежності від напруженості зовнішнього магнітного поля.

З рис. 2 видно, що після нанесення на Ni шару Gd₂O₃ величина V₂ зростає на 15÷35%. Спостережуване збільшення V₂ шару Ni не може бути викликане виявленою на дифрактограмах (рис. 1) значно меншою зміною параметра його кристалічної ґратки на 0,14%, що виникає після нанесення шару Gd₂O₃. Дане збільшення V₂ не може бути викликано і проходженням струму по нанесеному на Ni шару Gd₂O₃, оскільки питомий опір нікелю (7.5·10⁻⁸ Ω м) набагато

менше, ніж у оксиду гадолінію (10² Ω м). Також малоімовірний і вплив на зростання V₂ магнітних властивостей Gd₂O₃, оскільки магнітна сприйнятливість феромагнітного нікелю ~ 12 набагато більше такої, ніж у парамагнетика оксиду гадолінію, для якого вона близька до 10⁻⁶. Таким чином, найбільш імовірною причиною збільшення V₂ є виникнення між шарами Ni та Gd₂O₃ обмінної f-d взаємодії, підтвердженої в роботі [3]. З рівняння (3) випливає, що таке зростання викликане збільшенням намагніченості на величину M_{f-d}, що обумовлена виникненням EfdI в структурі Ni/Gd₂O₃.

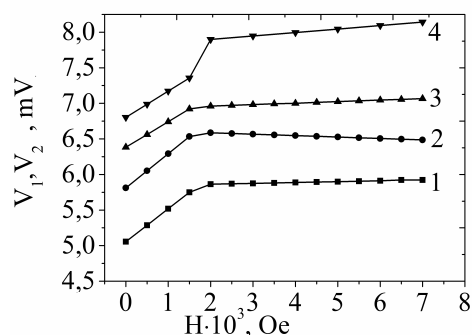


Рис. 2. Залежність V₁ від напруженості зовнішнього магнітного поля H для шару Ni – 1, а також V₂ для наноструктур Ni/Gd₂O₃ з товщиною шару Gd₂O₃ 40 нм – 2, 100 нм – 3, 160 нм – 4

Використовуючи вираз (3), можна на основі отриманих експериментальних залежностей $V_1(H)$ та $V_2(H)$ для плівки Ni та структури Ni/Gd₂O₃ (рис. 2) отримати польову залежність $R(H)$, тобто з врахуванням того, що $R_s = const$, здобути залежність $M_{f-d}(H)$, яка обумовлена EfdI. На рис. 3 представлено таку залежність R від H для структур Ni (70 нм)/Gd₂O₃ (40; 100; 160 нм) в області насичення намагніченості ($H = 2 \div 7$ кОе).

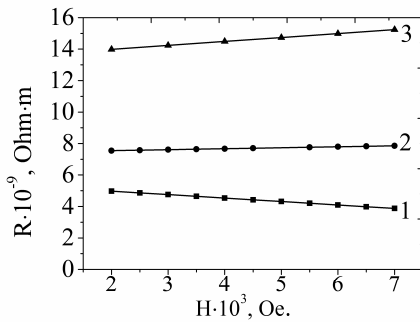


Рис. 3. Залежність R від напруженості зовнішнього магнітного поля H для структур Ni/Gd₂O₃ з товщиною шарів Ni (70 нм) та Gd₂O₃ 40 нм – 1, 100 нм – 2, 160 нм – 3. Вектор \vec{H} направлений від шару Ni до шару Gd₂O₃

З рис. 3 випливає, що зі зростанням товщини шару Gd₂O₃ від 40 до 160 нм спостерігається зміна характеру залежності $R(H)$ від спадного (рис. 3, лінія 1) до зростаючого (рис. 3, лінії 2 і 3). Стає зрозумілим, що повинна існувати така товщина шару Gd₂O₃ (h_0), за якої R не буде залежати від магнітного поля. Таку величину h_0 можна отримати побудувавши на основі рис. 3 залежність характеристики нахилу $T = \frac{\Delta R}{\Delta H}$ ліній 1, 2, 3 (рис. 3) за різних значень $h_{Gd_2O_3}$:

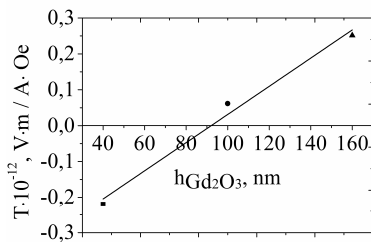


Рис. 4. Залежність характеристики нахилу T ліній 1, 2, 3, (рис. 3) від товщини шару $h_{Gd_2O_3}$

Як видно з рис. 4, характеристика нахилу відрізків прямих 1, 2, 3 (рис. 3) проходить через нуль при $h_{Gd_2O_3} = 90$ нм. Отже, за такої товщини шару Gd₂O₃ намагніченість M_{f-d} , яка обумовлена $f-d$ взаємодією згідно рис. 3, не залежить від зовнішнього магнітного поля. Можна припустити, що при даній товщині шару Gd₂O₃ неспарені $d-$ та $f-$ електрони контактуючих шарів беруть участь в $f-d$ взаємодії, в зв'язку з цим магнітне поле вже не може змінити M_{f-d} . Якщо в шарі Ni є $d-$ електрони, що не беруть участі в $f-d$ взаємодії, наприклад, коли $h_{Ni} > h_{Gd_2O_3}$, то дані залишкові електрони можуть брати участь в формуванні феромагнітної структури цього шару. Магнітне поле, підсилюючи таке формування, перешкоджає $f-d$ взаємодії, викликаючи зниження прямої $R(H)$ (рис. 3, крива 1). При цьому $T < 0$ (рис. 4). У випадку ж, якщо в шарі Gd₂O₃ є залишкові $f-$ електрони, що не беруть участі в $f-d$ взаємодії, наприклад при $h_{Ni} < h_{Gd_2O_3}$, то магнітне поле, навпаки, стимулює їхню участь в даній взаємодії, й викликає зростання $R(H)$ (рис. 3, криві 2 та 3). При цьому $T > 0$ (рис. 4). Таким чином, рис. 3 та 4 дозволяють зрозуміти механізм впливу магнітного поля на величину M_{f-d} .

Напрямок вектора \vec{M}_{f-d} може бути визначено шляхом порівняння польової залежності $R(H)$ для протилежних напрямків поля. На рис. 5 проведено порівняння експериментальних значень $R(H)$ для вектора зовнішнього магнітного поля $+\vec{H}$, що направлений від шару Ni до шару Gd₂O₃ (представлено на рис. 3), з тією самою залежністю для оберненого напрямку $-\vec{H}$.

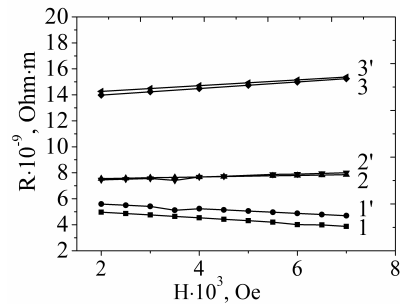


Рис. 5. Залежність R від напруженості вектора магнітного поля \vec{H} , який направлений від шару Ni до шару Gd₂O₃ (1, 2, 3) та від Gd₂O₃ до Ni (1', 2', 3'). $h_{Ni} = 70$ нм, $h_{Gd_2O_3} = 40$ нм (1, 1'), 100 нм (2, 2'), 160 нм (3, 3')

З даного рисунку видно, що при $h_{Gd_2O_3} = 100$ нм, коли, як було показано вище, вплив магнітного поля на M_{f-d} послаблений, відрізки 2 та 2' майже зливаються. В інших випадках ($h_{Gd_2O_3} = 40$ та 160 нм) величина R для напрямку поля $-\vec{H}$ перевищує таку саму для напрямку $+\vec{H}$. Це може бути пов'язано з тим, що вектор \vec{M}_{f-d} співпадає з вектором $-\vec{H}$, тобто направлено від шару Gd₂O₃ до Ni. В цьому випадку магнітне поле підсилює EfdI, що призводить до спостережуваного зростання M_{f-d} . Знання напрямку вектора \vec{M}_{f-d} може сприяти квантовомеханічному розрахунку EfdI в інтерфейсі d -металів групи заліза та оксидів РЗМ.

ВИСНОВКИ

1. Контакт нанорозмірного шару з металу групи заліза (Ni) та оксиду РЗМ (Gd₂O₃)

приводить до виникнення на їхній межі обмінної $f-d$ взаємодії, яка стимулює зростання намагніченості ферромагнітного шару на величину M_{f-d} .

2. Вплив структурних, електричних і парамагнітних властивостей шару Gd₂O₃ на виникнення M_{f-d} відсутній.
3. Величина M_{f-d} зростає зі збільшенням шару Gd₂O₃ від 40 до 160 нм. Встановлено механізм залежності M_{f-d} від зовнішнього магнітного поля, який визначений співвідношенням товщини шарів Ni та Gd₂O₃.
4. Вектор \vec{M}_{f-d} направлено від шару Gd₂O₃ до шару Ni. Знання напрямку вектора \vec{M}_{f-d} може сприяти квантовомеханічному розрахунку EfdI на межі шарів d -металів групи заліза та оксидів РЗМ.

Anomalous Hall effect in a double-layer Ni / Gd₂O₃ nanosized films

A.M. Kasumov, A.I. Dmitriev, M.V. Radchenko, A.E. Baybara, O.I. Bykov, K.A. Korotkov, V.M. Karavaeva, K.O. Vyshnevskaya, O.I. Olifan, A.I. Ievtushenko

*Institute for Problems of Material Sciences of National Academy of Sciences of Ukraine
3 Akademik Krzhizhanovsky Str., Kyiv, 03142, Ukraine, kasumov@ipms.kiev.ua*

It has been shown by the anomalous Hall effect method that upon contact of layers of iron group metal (Ni) and REM oxide (Gd₂O₃) nanosized films, an increase by 15–35 % in the magnetization of the ferromagnetic metal is observed. Such an increase does not require energy consumption and the use of amplifying equipment, is very promising for nanotechnology. The enhancement of magnetization is due to the appearance in the contact region of the exchange $f-d$ interaction between atoms with empty d - and f -electron shells that are parts of the layers. The exchange interaction stimulates the ordering of the magnetic structure of the ferromagnetic metal and an increase in its magnetization. The possibility of exchange $f-d$ interaction in the region of contact of layers of metals of the iron group and REM oxides was confirmed by the method of electronic paramagnetic resonance in our previous studies. This paper also shows the lack of influence on the growth of magnetization of other possible mechanisms due to the difference in the parameters of the crystal lattice, resistance, magnetic and thermomagnetic properties of the contacting layers.

A mathematical connection is found of the potential of Hall contacts and additional magnetization stimulated by the exchange $f-d$ interaction. Using this relationship, the mechanism of the effect of an external magnetic field on additional magnetization had revealed. It is shown that this magnetization depends on the ratio of the thicknesses of the Ni and Gd₂O₃ layers. It has been found that the vector of this magnetization is directed from the Gd₂O₃ layer to the Ni layer.

Keywords: *anomalous Hall effect, $f-d$ exchange interaction, magnetization*

ЛІТЕРАТУРА

1. Kasumov A.M., Karavaeva V.M., Mikitchenko A.A. et al. Galvanomagnetic Properties of Thin – film (Fe, Co, Ni)/Rare – Earth metal oxide Structures // Powder metallurgy and Metal Ceramics. – 2018. – V. 57, Issue 5–6. – P. 325–328.
2. Kasumov A.M., Karavaeva V.M., Shapoval K.O. et al. Enhancement of the Faraday effect in thin film structure Fe/Tb₂O₃ due to f–d layer interaction // Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii. – 2018. – V. 16, N 1. – P. 181–189.
3. Kasumov A.M., Dmitriev A.I., Bataev Yu.N. et al. EPR study of interlayer interaction in Gd₂O₃/Fe nanostructure // Him. Fiz. Tehnol. Poverhni. – 2021. – V. 12, N 2. – P. 144–148.
4. Kawaguchi K., Sohma M., Oosawa Y. Magnetic properties of Fe/EuO multilayered film // J. Magn. Magn. Mater. – 1996. – V. 156, N 1–3. – P. 235–236.
5. Kawaguchi K., Sohma M., Oosawa Y., Manago T. ¹⁵¹Eu and ⁵⁷Fe Mössbauer and magnetization study on EuO_xFe multilayered films // J. Magn. Magn. Mater. – 1998. – V. 177–181, Part 2. – P. 1186–1188.
6. Kawaguchi K., Sohma M., Manago T. Perpendicular magnetic anisotropy of R₂O₃/Fe multilayer // J. Magn. Magn. Mater. – 1999. – V. 198–199. – P. 513–515.
7. Mikhailovsky Yu.O., Prudnikov V.N., Chernoglazov K.Yu. et al. Anomalous Hall effect in (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_x(Al–O)_{100–x} nanocomposites // Solid State Phenomena. – 2015. – V. 233–234. – P. 403–406.
8. Воробьев Ю.В., Добовольский В.Н., Стриха В.И. Методы исследования полупроводников. – Київ: Вища школа. – 1988. – 231 с.
9. Кудрин А.В. Данилов Ю.А. Аномальный эффект Холла. Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. ун-т, 2017. – 16 с.
10. Бохонов Б.Б., Васков Д.Г., Дорофейчик С.С. и др. Кристаллическая структура и удельная намагниченность компактных образцов, полученных из наноразмерных порошков Ni–C в условиях высоких давлений и температур // Физика и техника высоких давлений. – 2006. – Т. 16, № 4. – С. 123–134.

REFERENCES

1. Kasumov A.M., Karavaeva V.M., Mikitchenko A.A., Shapoval K.O., Perepelytsia M.A., Lashkariov G.V. Galvanomagnetic Properties of Thin – film (Fe, Co, Ni)/Rare – Earth metal oxide Structures. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. **57**(5–6): 325.
2. Kasumov A.M., Karavaeva V.M., Shapoval K.O., Perepelytsia M.A., Lashkariov G.V. Enhancement of the Faraday effect in thin film structure Fe/Tb₂O₃ due to f–d layer interaction. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. 2018. **16**(1): 181.
3. Kasumov A.M., Dmitriev A.I., Bataev Yu.M., Bataev M.M., Karavaeva V.M., Korotkov K.A., Ievtushenko A.I. EPR study of interlayer interaction in Gd₂O₃/Fe nanostructure. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. 2021. **12**(2): 144.
4. Kawaguchi K., Sohma M., Oosawa Y. Magnetic properties of Fe/EuO multilayered film. *J. Magn. Magn. Mater.* 1996. **156**(1–3): 235.
5. Kawaguchi K., Sohma M., Oosawa Y., Manago T. ¹⁵¹Eu and ⁵⁷Fe Mössbauer and magnetization study on EuO_xFe multilayered films. *J. Magn. Magn. Mater.* 1998. **177–181**(2): 1186.
6. Kawaguchi K., Sohma M., Manago T. Perpendicular magnetic anisotropy of R₂O₃/Fe multilayer *J. Magn. Magn. Mater.* 1999. **198–199**: 513.
7. Mikhailovsky Yu.O., Prudnikov V.N., Chernoglazov K.Yu., Nikolaev S.N., Sitnikov A.V., Kalinin Yu E., Bartov D., Gerber A., Granovsky A.B. Anomalous Hall effect in (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_x(Al–O)_{100–x} nanocomposites. *Solid State Phenomena*. 2015. **233–234**: 403.
8. Vorobyov Yu.V., Dobovolsky V.N., Strikha V.I. *Methods for the study of semiconductors*. (Kyiv: Vishcha shkola, 1988). [in Russian].
9. Kudrin A.V. Danilov Yu.A. *Anomalous Hall Effect. Workshop*. (Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State un-t, 2017). [in Russian].
10. Bokhonov B.B., Vaskov D.G., Dorofeychik S.S., Makovetskiy G.I., Shipilo V.B., Yanushkevich K.I. Crystal structure and specific magnetization of compact samples obtained from nanosized Ni–C powders at high pressures and temperatures. *Physics and Technology of High Pressures*. 2006. **16**(4): 123. [in Russian].

Надійшла 22.09.2021, прийнята 03.03.2022