

Формування приладових наноструктур спін-клапанного типу на основі Co і Cu

І.В. Чешко^{1,*}, М.В. Костенко¹, В.І. Гребинаха², А.М. Логвинов¹, С.І. Проценко¹

¹ Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

² Національний технічний університет України «КПІ», пр. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна

(Одержано 23.05.2016, опубліковано online 03.10.2016)

У роботі наведені результати дослідження структурно-фазового стану та магніторезистивних властивостей плівкових наносистем спін-клапанного типу на основі Co і Cu. Встановлено, що в процесі одержання та термічного відпалювання до температур $T_b = 700$ і 900 К в цих системах відбувається утворення твердого розчину атомів Co в матриці Cu. Було показано, що плівкову систему спін-клапанного типу Co(5)/Cu(x)/Co(20)/П доцільно модифікувати, використовуючи замість одного з магнітних шарів Co мультишар [Co/Cu]_n. Данна модифікація призводить до підвищення величини магнітоопору до $0,3 \div 0,5$ %, швидкості перемикавання з одного магнітного стану в інший та температурної стабільності всієї наносистеми до температури 700 К, хоча зменшує магнітну чутливість до значень $S_b = (0,1 \div 0,2) \times 10^{-2} \% / (\text{мТл})$.

Ключові слова: Спін-клапан, Магнітоопір, Тонка плівка, Коерцитивна сила, Твердий розчин.

DOI: [10.21272/jnep.8\(3\).03041](https://doi.org/10.21272/jnep.8(3).03041)

PACS numbers: 68.55.Ln, 73.50.Jt

1. ВСТУП

Мультишари на основі Co і Cu та Fe і Cr, у яких спостерігаються максимальні значення гігантського магнітоопору серед металевих наноструктур мають безліч переваг якщо вони сформовані у вигляді мультишарових структур з товщиною окремих шарів до 2-3 нм (див., наприклад, [1-2]). При більших товщинах у спін-клапанних структурах спостерігаються небажані ефекти пов'язані з посиленням інтенсивності протіканням дифузійних процесів та утворенням неупорядкованих твердих розчинів [3-6], що призводять до погіршення стабільності роботи приладових елементів створених на їх основі.

Прості спін-клапани виготовляють використовуючи схему формування у вигляді «сендвіча»: феромагнітний / немагнітний / феромагнітний / антиферомагнітний шари. Труднощі при реалізації такої схеми виникають через нестабільність інтерфейсів та неможливість формування достатньо магнітожорстких антиферомагнітних шарів. Спрощенням простих спін-клапанів є псевдо-спін-клапани, у яких лише два магнітних шари з різною коерцитивністю, що розділені немагнітним прошарком.

У даній роботі приведені результати дослідження магніторезистивних та магнітооптичних властивостей псевдоспін-клапанних структур на основі Co і Cu і запропоновано їх модифікувати, замінивши один магнітний шар мультишаром [Co/Cu]_n. Зазначимо, що застосування мультишарів при формуванні спін-клапанів було вивчено і раніше (див., наприклад, [7]), але здебільшого мова йде про спін-клапанний ефект в структурах на основі мультишарів або використання мультишарів на основі рідкоземельних та феромагнітних металів для формування антиферомагнітного шару в спін-клапані [8]. У нашому випадку передбачалося, що мультишар на основі Co і Cu може збільшити термічну стійкість всієї приладової плівкової структури. Крім того мультишар у складі спін-клапана може працювати самостійно, що знач-

но розширює функціональність такої структури як приладового елементу спінтроніки або чутливого елементу сенсорної електроніки.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Були отримані серії зразків спін-клапанного типу Au(10)/Co(x)/Cu(x)/Co(20)/П (П – підкладка, товщина вказана в нм), де $x = 6 - 10$ нм; серія зразків спін-клапанного типу з використанням мультишарів Au(10)/[Cu(3)/Co(3)]_n/Cu(5)/Co(20)/П і Au(10)/Co(6)/Cu(5)/[Cu(3)/Co(3)]_n/П та серія відповідних мультишарів Au(10)/[Cu(3)/Co(3)]_n/П, де $n = 2 - 8$. Всі зразки покривалися верхнім допоміжним захисним шаром Au(10) для запобігання окисненню робочих шарів Co та забезпечення надійного контакту при вимірюваннях опору. Зразки конденсувалися термічним методом у вакуумі (10^{-4} Па) на сітлові пластини при температурі підкладки $T_n = 300$ К зі швидкістю конденсації $\omega = 0,1-0,2$ нм/с. Для контролю фазового складу та структури зразків (із використанням просвічуючого електронного мікроскопу ПЕМ-125М) застосовувалися плівки із вуглецю товщиною 20 нм. Товщина окремих шарів контролювалась за допомогою кварцового резонатора в процесі одержання. Для дослідження термічної стабільності фізичних властивостей зразки відпалювалися у вакуумній камері до температур $T_b = 700$ та 900 К (далі в тексті $T_b = 300$ К відповідає невідпаленому зразку).

Дослідження магніторезистивних властивостей проводилися при кімнатній температурі з використанням чотириточкової схеми в інтервалі магнітного поля від 0 до 500 мТл [9]. В процесі вимірювання електричний струм був направлений паралельно площині зразка, а вимірювання магнітоопору здійснювалося у трьох геометріях – поздовжній (лінії магнітної індукції B направлені вздовж напрямку протікання струму), поперечній (лінії B направлені перпендикулярно до лінії протікання струму) та перпендикулярній (лінії B перпендикулярні площині

* i.cheshko@aph.sumdu.edu.ua

зразка). Величина магнітоопору (МО) визначалася за співвідношенням:

$$MO = \Delta R/R_S = (R_B - R_S)/R_S, \quad (1)$$

де R_B і R_S – опір зразка при заданому полі і при насиченні.

За отриманим максимальним значенням МО розраховувалася чутливість зразків по МО до магнітного поля за формулою:

$$S_B = \left| \frac{MO_{max}}{\Delta B} \right|, \quad (2)$$

де MO_{max} – максимальне значення магнітоопору; ΔB – зміна магнітної індукції від насичення B_S до розмагнічування.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Результати дослідження фазового складу та структурних характеристик багат шарових плівкових систем на основі Co і Cu вказують на утворення твердих розчинів (т. р.) атомів Co в матриці ГЦК-Cu. У наших експериментах при $T_B > 300$ К так як і було показано в [4] процес утворення т. р. (Co, Cu) на межах поділу між шарами відбувається в процесі формування зразків при кімнатній температурі в результаті конденсаційно-стимульованої дифузії та подальшій термообробці до $T_B = 400-700$ К. При $T_B = 900$ К спостерігається частковий розпад т.р. з утворенням гранульованого стану Co. На рис. 1 представлені типова кристалічна структура та відповідна електронограма плівкових систем на основі Co і Cu у вигляді спін-кляпанних структур або мультишарів на прикладі спін-кляпану Au(10)/Co(5)/Cu(10)/Co(20)/П при $T_B = 300$ К. На електронограмі відмічені дві групи ліній, що відповідають фазам ГЦК-Co та т. р. (Co, Cu) (параметр $a_{т.р.} (Co, Cu) = 0,3588$ нм). Після відпалювання даного зразка до $T_B = 700$ К параметр $a_{т.р.} (Co, Cu)$ зменшується до 0,3575 нм у результаті подальшого перемішування шарів Co і Cu. Слід відмітити, що при термообробці зразків у вигляді мультишарів зміна параметру решітки не помітна.

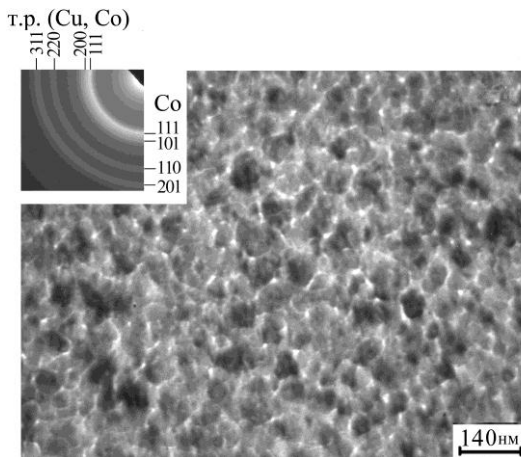


Рис. 1 – Кристалічна структура та електронограма (на вставці) плівкової системи спін-кляпанного типу Co(5)/Cu(10)/Co(20)/П при $T_B = 300$ К

Результати дослідження магніторезистивних властивостей плівкових зразків спін-кляпанного типу з фіксованими товщинами магнітних шарів та змінною товщиною немагнітного шару Cu представлені на рис. 2 та в табл. 1. Нестабільність інтерфейсів в даній системі, що пов'язано з процесами утворення т. р. (Co, Cu), можна відстежити по зміні характеру залежностей МО з ростом T_B на рис. 2. Найбільша стабільність магніторезистивних властивостей, максимальні значення $MO = 0,15 \div 0,18$ % та максимальні значення магнітної чутливості $S_B = (0,2 \div 2,4) \times 10^{-2} \%$ /(мТл) при $T_B = 900$ К (табл. 1) спостерігаються в системі з немагнітним прошарком товщиною $d_{Cu} = 10$ нм (рис. 2б).

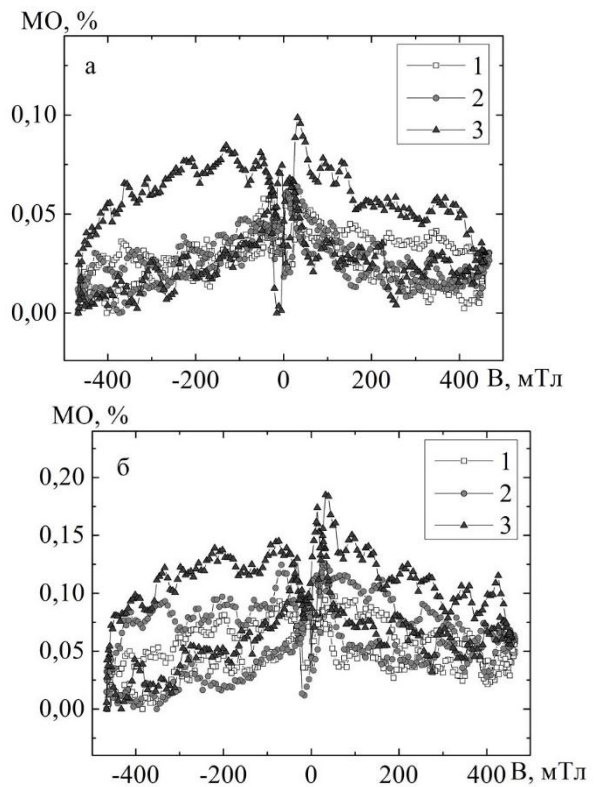


Рис. 2 – МО плівкових систем спін-кляпанного типу Au(10)/Co(5)/Cu(x)/Co(20)/П, де $x = 5$ (а) та 10 (б) нм в поздовжній геометрії вимірювання при різних T_B К: 1 – 300; 2 – 700; 3 – 900

Таблиця 1 – Магнітні характеристики структур спін-кляпанного типу Au(10)/Co(5)/Cu(x)/Co(20)/П зі змінною товщиною шару Cu в поздовжній геометрії вимірювання

x , нм	T_B , К	ΔB , мТл	$S_B \times 10^2$, %/мТл
2	300	37,4	0,1
	700	129,8	0,1
	900	78,04	0,1
8	300	35,2	0,2
	700	37,04	0,1
	900	15,3	0,7
10	300	10,1	1,4
	700	12,4	0,9
	900	9,7	2,4

На відміну від систем спін-клапанного типу мультишари $Au(10)/[Co/Cu]_n/PI$ мають виражену форму залежності МО з максимумом при $B = 0$ мТл у всіх геометріях вимірювання (рис. 3) притаманну наносистемам з антиферомагнітною взаємодією. Максимальне значення МО = 0,27 % спостерігається у зразках з найбільшою кількістю повторів фрагменту мультишару $n = 10$. Можна відмітити, що при збільшенні T_b до 900 К форма залежностей на рис. 3 стає більш лінійною, але істотних змін характеру залежності і величин значень МО не спостерігається.

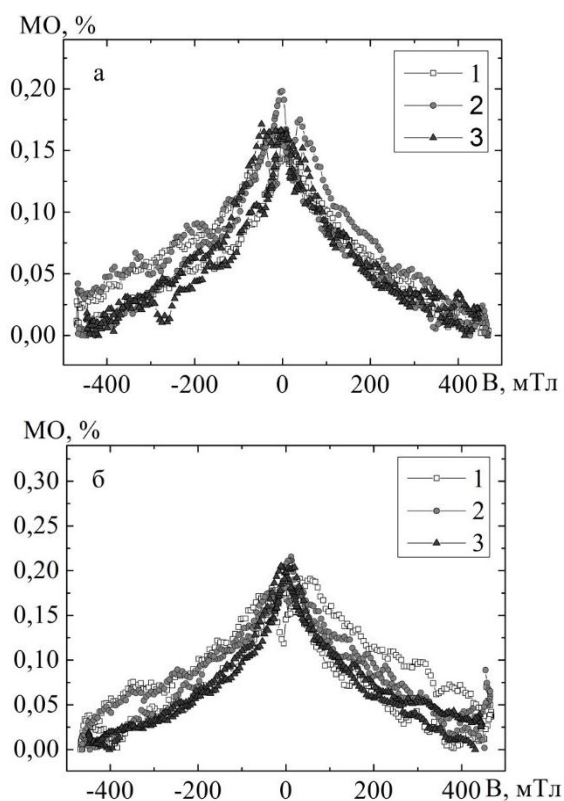


Рис.3 – МО мультишарів $Au(10)/[Co(3)/Cu(3)]_n/PI$ (а) та $Au(10)/[Co(3)/Cu(3)]_{10}/PI$ (б) в поздовжній геометрії вимірювання при різних T_b К: 1 – 300; 2 – 700; 3 – 900

Використовувати мультишар $[Co/Cu]_n$ при формуванні приладових систем спін-клапанного типу можна замість одного із магнітних шарів за умови збереження іншого. Суцільний шар Со з високим значенням коерцитивності у порівнянні з мультишаром буде відігравати роль закріпленого магнітожорсткого шару для забезпечення спін-клапанного ефекту. У загальному випадку результатом такої зміни стало збільшення значень МО до $0,3 \div 0,5$ % (рис. 4. і 5) але зменшення чутливості S_B до значень $(0,1 \div 0,2) \times 10^{-2} \% / \text{мТл}$ (табл. 2 і 3). Крім того в таких наносистемах температура відпалювання помітно менше впливає на характер залежності МО у всіх геометріях вимірювання. Хоча при використанні мультишару замість верхнього магнітного шару у невіддалених зразках спостерігається анізотропний характер МО, який після відпалювання до $T_b = 700$ К знакає як це показано на рис. 5а і б на прикладі зразка $Au(10)/[Co(3)/Cu(3)]_4/Cu(5)/Co(20)/PI$.

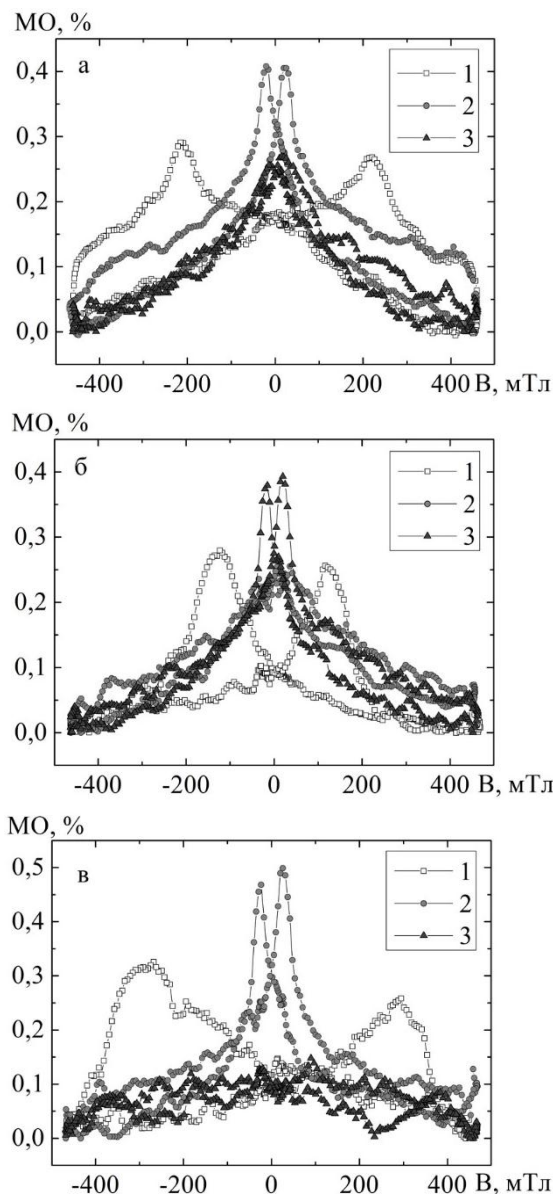


Рис. 4 – МО плівкової структури спін-клапанного типу $Au(10)/Co(5)/Cu(6)/[Co(3)/Cu(3)]_s/PI$ при $T_b = 300$ (а), 700 (б) та 900 (в) К в перпендикулярній (1), поперечній (2) та поздовжній (3) геометрії вимірювання

На рис. 4 приведені результати дослідження магніторезистивних властивостей систем спін-клапанного типу $Au(10)/Co(5)/Cu(6)/[Co(3)/Cu(3)]_s/PI$ у якій нижній магнітний шар замінений мультишаром. Переміщення максимумів на приведених залежностях при зміні T_b , що особливо проявляється в перпендикулярній геометрії вимірювання, пов'язані із зміною коерцитивності B_c верхнього магнітного шару Со та його магнітною анізотропією внаслідок зміни ефективної товщини шару в процесі термодифузії та рекристалізації і зміни доменної структури. В поперечній та поздовжній геометріях вимірювання магніторезистивні властивості даної системи до $T_b = 700$ К стабільні (рис. 4 а і б). При підвищенні T_b до 900 К істотно зменшуються значення МО в поздовжній геометрії (рис. 4 б), що можна пов'язати з руйнуванням межі поділу між магнітним верхнім

Таблиця 2 – Магнітні характеристики плівкових структур спіно-кляпанного типу Au(10)/Co(5)/Cu(6)/[Co(3)/Cu(3)]_n/П з різною кількістю повторів фрагменту мультишару *n* в поздовжній геометрії вимірювання

<i>n</i>	<i>T_b</i> , К	ΔB , мТл	$S_B \times 10^2$, % / мТл
2	300	47,7	0,7
	700	157,1	0,1
	900	122,0	0,2
6	300	176,4	0,1
	700	61,9	0,2
	900	199,5	0,1
8	300	217,1	0,1
	700	119,7	0,2
	900	281,3	0,1
10	300	47,5	0,1
	700	67,1	0,1
	900	184,6	0,1

Таблиця 3 – Магнітні характеристики плівкових структур спіно-кляпанного типу Au(10)/[Co(3)/Cu(3)]_n/Cu(5)/Co(20)/П з різною кількістю повторів фрагменту мультишару *n* в поздовжній геометрії вимірювання

<i>n</i>	<i>T</i> , К	ΔB , мТл	$S_B \times 10^2$, % / мТл
2	300	37,4	0,1
	700	129,8	0,1
	900	78,0	0,1
4	300	15,3	1,2
	700	78,4	0,3
	900	123,2	0,2

шаром Co та немагнітним прошарком Cu в результаті утворення т.р. (Co, Cu).

На рис. 5 приведені результати дослідження наносистем із застосування мультишару замість верхнього магнітного шару. Анізотропний характер залежностей МО спостерігається у цих зразках тільки при *T_b* = 300 К. При підвищенні *T_b* до 700 К вид залежностей аналогічний до приведених на рис. 4 і залишається незмінним при *T_b* = 900 К. Таку стабільність магніторезистивних властивостей забезпечує наявність в системах нижнього більш товстого шару Co з початковою товщиною *d_{Co}* = 20 нм, який при відпалюванні залишається суцільним, а його коерцетивність зростає завдяки збільшенню середнього розміру кристалітів [8] та покращенню доменної структури шару Co.

Малі значення чутливості *S_B* наносистем спіно-кляпанного типу з використанням мультишарів на основі Co і Cu при більших значеннях МО (табл. 2 та 3) пов'язані з високою швидкістю переключення з одного магнітного стану в інший. Цей факт робить такі наносистеми придатними для використання при виготовленні цифрових функціональних елементів спінтроники тоді, коли системи у вигляді мультишару з високими значеннями магнітної чутливості більше підходять для створення тонкоплівкових магнітних чутливих елементів сенсорів магнітного поля з робочим діапазоном полів до 500 мТл.

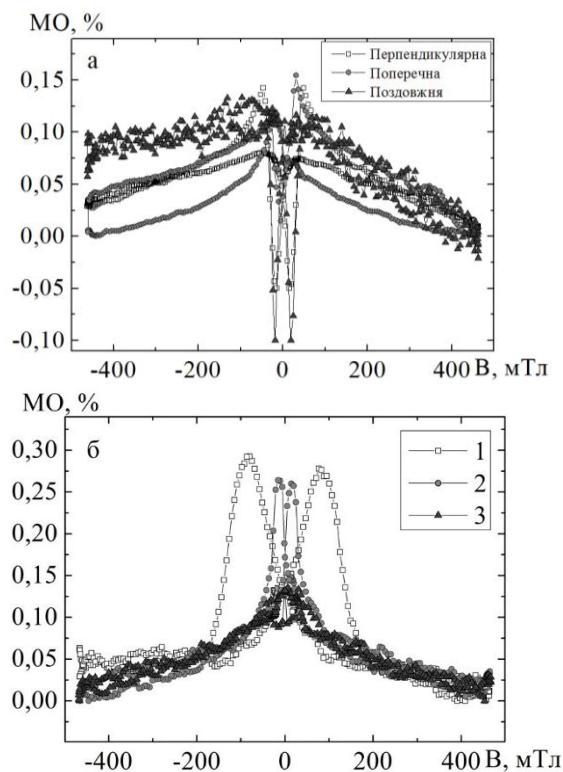


Рис. 5 – МО плівкової структури спіно-кляпанного типу Au(10)/[Co(3)/Cu(3)]₄/Cu(5)/Co(20)/П при *T_b* = 300 (а) та 700 (б) К в перпендикулярній (1), поперечній (2) та поздовжній (3) геометрії вимірювання

4. ВИСНОВКИ

Результати дослідження структурно-фазового складу плівкових багатошарових наносистем спіно-кляпанного типу на основі Co і Cu вказують на утворення в них т.р. атомів Co в матриці Cu на межах поділу між шарами з чим пов'язана нестабільність їх магніторезистивних властивостей при різних температурах відпалювання.

Плівкову систему спіно-кляпанного типу Co(5)/Cu(*x*)/Co(20)/П доцільно модифікувати використовуючи замість одного з магнітних шарів Co мультишар [Co/Cu]_{*n*}. Як показали результати дослідження магніторезистивних властивостей в залежності від температури відпалювання така модифікація призводить до підвищення значення величини МО = 0,3 ÷ 0,5 %, підвищує швидкість перемикання з одного магнітного стану в інший, хоча зменшує магнітну чутливість до значень *S_B* = (0,1 ÷ 0,2) × 10⁻² % / мТл. Також можна стверджувати, що підвищується температурна стабільність всієї наносистеми до температури 700 К.

Подальші дослідження фізичних властивостей модифікованих спіно-кляпанних структур на основі Co і Cu будуть направлені на створення функціонального елемента спіно-кляпану з наперед заданими робочими характеристиками в діапазоні температур 300 ÷ 900 К.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми № 0116U002623.

Формирование приборных структур спин-клапанного типа на основе Co и CuИ.В. Чешко¹, М.В. Костенко¹, В.И. Гребинаха², А.Н. Логвинов¹, С.И. Проценко¹¹ Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина² Национальный технический университет Украины «КПИ», просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина

В работе приведены результаты исследования структурно-фазового состояния и магнеторезистивных свойств пленочных наносистем спин-клапанного типа на основе Co и Cu. Установлено, что в процессе получения и термического отжига до температур $T_B = 700$ и 900 К в этих системах происходит образование твердого раствора атомов Co в матрице Cu. Было показано, что пленочную систему спин-клапанного типа $Co(5)/Cu(x)/Co(20)/P$ целесообразно модифицировать используя вместо одного из магнитных слоев Co мультислой $[Co/Cu]_n$. Данная модификация приводит к повышению значения магнетосопротивления до $0,3 \div 0,5$ %, скорости переключения с одного магнитного состояния в другое и температурной стабильности всей наносистемы до температуры 700 К, хотя уменьшает магнитную чувствительность до значений $S_B = (0,1 \div 0,2) \times 10^{-2}$ % / мТл.

Ключевые слова: Спин-клапан, Магнетосопротивление, Тонкая пленка, Коэрцитивная сила, Твердый раствор.

Formation of Device Structures Spin-valve Type Based on Co and CuI.V. Cheshko¹, M.V. Kostenko¹, V.I. Hrebynakha², A.M. Lohvynov¹, S.I. Protsenko¹¹ Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov st., 40007 Sumy, Ukraine² National Technical University of Ukraine «KPI», 37, Peremogy prosp., 03056 Kyiv, Ukraine

The study results of structural-phase state and magnetoresistive properties of spin-valve type nano-film based on Co and Cu are shown in this work. It is found that in these systems during the preparation and annealing at temperatures $T_{ann} = 700$ and 900 K solid solutions of Co atoms in Cu matrix are formed. Was shown that the spin-valve type film system $Co(5)/Cu(x)/Co(20)/S$ expedient modified using multilayers $[Co/Cu]_n$ instead one of the magnetic Co layer. This modification increases the magnetoresistance values up to $0,3 \div 0,5$ %, increases the switching speed from one magnetic state to another and thermal stability of nanosystems to temperature 700 K. Although magnetic sensitivity decreases to a value $S_B = (0,1 \div 0,2) \times 10^{-2}$ % / mT.

Keywords: Spin-valve, Magnetoresistance, Coercive force, Magnetization, Solid Solution.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. I.M. Pazukha, I.Y. Protsenko, *Tech. Phys.* **55** (4), 571 (2010).
2. J. Kimling, R.B. Wilson, K. Rott, J. Kimling, G. Reiss, D.G. Cahill, *Phys. Rev. B* **91**, 144405 (2015).
3. A.K. Singha, A. Subramaniam, *J. Alloy. Compd.* **587**, 113 (2014).
4. I.Y. Protsenko, I.V. Cheshko, *Metallofiz. Nov. Tekh.* **31** (7) 921 (2009).
5. M.H. Demydenko, S.I. Protsenko, D.M. Kostyuk, I.V. Cheshko *J. Nano- Electron. Phys.* **3** (4), 106 (2011).
6. A.G. Basov, S.I. Vorobiov, YO. Shkurdoda, L.F. Dekhtyaruk, *J. Nano- Electron. Phys.* **3** (2) 78 (2010).
7. S.J. Callori, J. Bertinshaw, D.L. Cortie, J.W. Cai, A.P. Le Brun, T. Zhu, F. Klose, *J. Appl. Phys.* **116**, 033909 (2014).
8. C. David, B. Arumugam, A. Rajamani, *J. Supercond. Nov. Magn.* **27** (6) 1561 (2014).
9. S.I. Vorobiov, I.V. Cheshko, A.M. Chornous, H. Shirzadfar, O.V. Shutylieva, *J. Nano- Electron. Phys.* **6** (2) 02022 (2014).