

PACS numbers: 75.30.Ds, 75.47.De, 75.30.Gw

МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ СПІН-ВЕНТИЛЬНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ Co ТА Cu АБО Au

М.Г. Демиденко, С.І. Проценко, Д.М. Костюк, І.В. Чешко

Сумський державний університет
вул. Р.-Корсакова 2, 40007 Суми, Україна
E-mail: serhiy.protsenko@elit.sumdu.edu.ua

Запропонована конструкція модуля автоматизованого вимірювання магнітоопору (МО) і коерцитивності (B_c) спін-вентильних структур на основі плівок Co та Cu або Au. Вивчені особливості залежності МО і B_c від кута α між площиною підкладки і напрямом індукції зовнішнього магнітного поля. Установлено, що в інтервалі $\alpha = 70^\circ - 90^\circ$ спостерігається різке збільшення МО і B_c . Характер залежності МО від α визначається ступенем розчинності атомів нижнього феромагнітного шару Co(3 нм) чи Co(20 нм) у шарі Cu(6 нм), оскільки атоми шару Co(3 нм) переважно повністю розчиняються, а у випадку Co(20 нм) – лише частково. У залежності від цього перемагнічування системи магнітних шарів Co(20 нм) і т.р. [Cu, Co(3 нм)] та Co(3 нм) і [Co(20 нм – x)] + т.р.[Cu, Co(x)] відбувається по-різному, що і спричиняє збільшення чи зменшення величини МО.

Ключові слова: СПІН ВЕНТИЛЬ, МАГНІТООПІР, ІНДУКЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ, КОЕРЦИТИВНІСТЬ.

*(Одержано 07.09.2011, у відредагованій формі – 04.10.2011,
опубліковано online 30.12.2011)*

1. ВСТУП

Явище гігантського магнітоопору (ГМО) детально досліджено на прикладі різних плівкових систем. Значний інтерес науковців викликає вивчення ГМО в спін-вентильних структурах [1-3]. Величина ефекту ГМО залежить від багатьох факторів, зокрема від геометрії вимірювання. Істотний вплив на магніторезистивні властивості плівкових систем має величина кута α між напрямом зовнішнього магнітного поля і площиною протікання струму. Виділяють дві основні геометрії прикладеного магнітного поля: FIP (лінії магнітної індукції паралельні площині плівкової системи) і FPP (лінії індукції перпендикулярні до зразка) та дві геометрії пропускання струму через плівкову систему: SIP (напрямок пропускання струму паралельний площині зразка) і SPP (напрямок струму перпендикулярний до площини плівкової системи).

Мета даної роботи полягала у розробленні модулю автоматизованого комплексу для вимірювання МО і коерцитивності у залежності від кута α .

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

У ході експериментального дослідження магніторезистивних властивостей спін-вентильних структур було вивчено багатошарові плівкові системи: Au(1нм)/Co(3нм)/Au(6нм)/Co(20нм)/SiO₂/Si (спін-вентиль №1); Au(1нм)/Co(3нм)/Cu(6нм)/Co(20нм)/SiO₂/Si (спін-вентиль №2); Au(1нм)/Co(20нм)/Au(6нм)/Co(3нм)/SiO₂/Si (спін-вентиль №3); Au(1нм)/Co(20нм)/Cu(6нм)/Co(3нм)/SiO₂/Si (спін-вентиль №4)

в залежності від напрямку дії зовнішнього магнітного поля. Зразки представляють собою спін-вентильні структури, що були отримані електронно-променевим методом осадження у вакуумі при тиску залишкових газів 10⁻⁷ Па на підкладки з монокристалічного кремнію з природнім шаром діоксиду кремнію. Контроль товщини здійснювався методом кварцового резонатора під час конденсації. Особливість систем полягає у відмінності матеріалу немагнітного прошарку (мідь або золото) та різна товщина верхнього й нижнього магнітного шару кобальту (3 або 20 нм).

У даній роботі вивчено магніторезистивні властивості спін-вентильних систем на основі Co та Cu або Au при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання. Зміна геометрії реалізовувалась шляхом повороту зразка у просторі між осердям електромагніту. Для встановлення необхідної геометрії було розроблено модуль, який входить до складу автоматизованого комплексу вимірювання зміни магнітоопору. Комплекс складається з електромагніту, уніполярного блока живлення електромагніту Philips PM 2811, мультиметра для вимірювання опору Keithley 2000 Digital, 12-ти бітного АЦП-ЦАП NI USB 6008, системи реле для зміни полярності магнітного поля та модуля повороту зразка. Структурна схема модуля повороту зразка та його управління приведена на Рис. 1. Розроблений модуль поміщається між осердям електромагніту (Рис. 1а поз. 1) і складається з консолі (поз. 4), на якій закріплено тримач контактів (поз. 3), столику для розміщення зразка (поз. 2) та крокового двигуна (поз. 5), що управляється за допомогою DAQ NI USB 6008 (поз. 6). Контакти виготовлені з золота та мають округлу форму, що мінімізує опір омичного контакту зі зразком та унеможливує його пошкодження під час установки у тримач. Контакти розміщені таким чином (Рис. 1б), що дозволяє змінювати геометрію протікання струму відносно прикладеного зовнішнього магнітного поля без зміни положення спін-вентилля. Вимірювання опору проводилося за стандартною 4-точковою схемою у спін-вентильях з паралельною (CIP) геометрією протікання струму.

Принциповою особливістю розробленого комплексу є можливість автоматичного вимірювання зміни магнітоопору в тонкоплівкових системах в різних геометріях вимірювання в тому числі при переході від перпендикулярної (Рис. 2а) до поперечної (Рис. 2б) та реалізована можливість повороту зразка під час вимірювання в діапазоні кутів ± 180° з мінімальним кроком 1°.

Розроблений комплекс управляється за допомогою програмного забезпечення, розробленого у середовищі графічного програмування LabVIEW 2010 SP1. Інтерфейсна панель розробленої програми приведена на Рис. 3.

Результат вимірювання відображається на графіку (Рис. 3 поз. 1). Група кнопок (поз. 2) використовується для повороту зразка на необхідний кут. Кнопка (поз. 3) дозволяє визвати підпрограму для початкової настройки приладів Keithley 2000 Digital та DAQ-mx NI USB 6008, встановлення

необхідних кутів повороту у процесі вимірювання, кількості циклів та швидкості вимірювання. Кнопка (поз. 4) починає процес вимірювання магнітоопору. Група індикаторів (поз. 5 та 7) інформує про величину індукції магнітного поля, статус операції, кут повороту зразка та полярність магнітного поля. Група кнопок (поз. 6) дозволяє провести обробку результатів вимірювання.

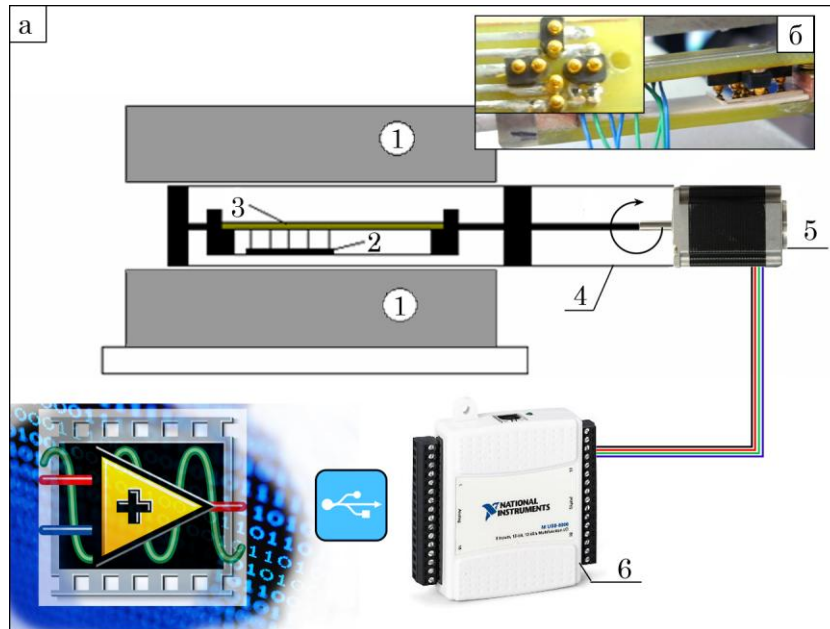


Рис. 1 – Схематичне зображення розробленого модулю з механізмом повороту зразка (а) та зовнішній вигляд контактів (б): 1 – осердя електромагніту; 2 – зразок; 3 – тримач контактів; 4 – консоль механізму повороту зразка; 5 – кроковий двигун; 6 – модуль збору даних NI USB 6008

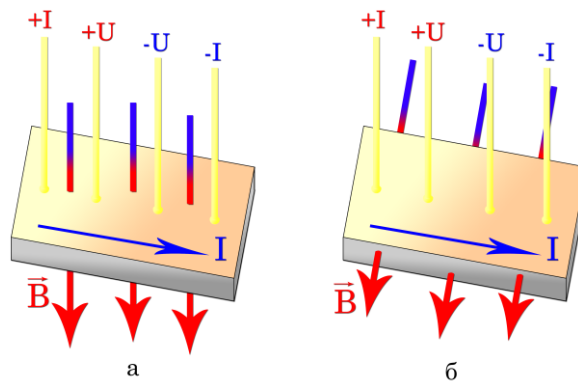


Рис. 2 – Схема перпендикулярної (а) та поперечної (б) геометрії вимірювання

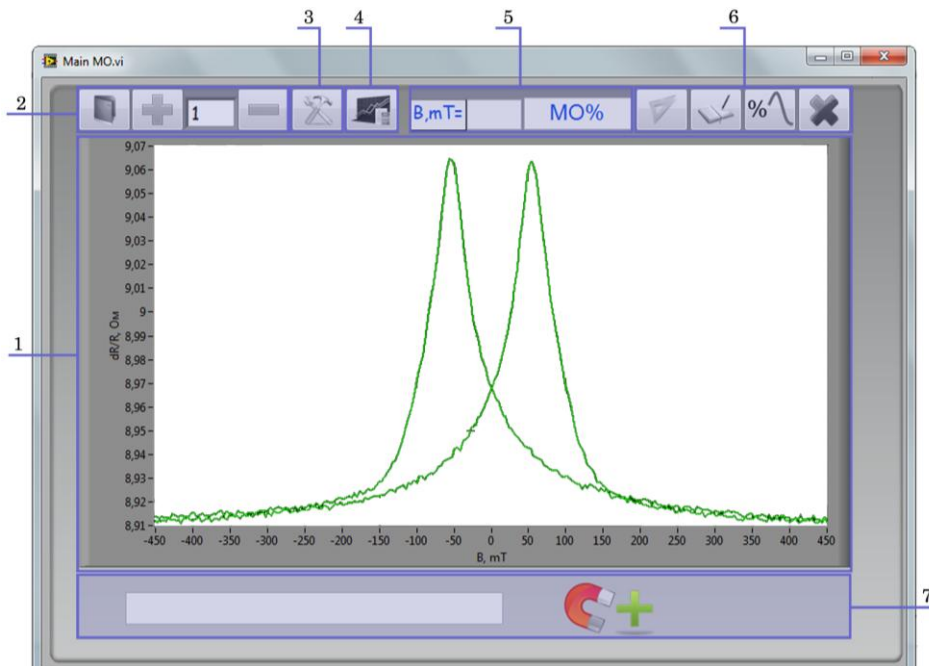


Рис. 3 – Інтерфейсна панель розробленого програмного забезпечення: 1 – графік відображення результатів вимірювання; 2 – група кнопок для управління поворотом зразка; 3 – виклик підпрограми для настройки режиму вимірювання; 4 – кнопка запуску процесу вимірювання; 5, 7 – індикатори статусу роботи програми та службових повідомлень; 6 – група кнопок для проведення обробки результатів вимірювання

3. РЕЗУЛЬТАТИ

У ході експериментальних досліджень було отримано залежності зміни магнітоопору та величини коерцитивної сили від прикладеного зовнішнього магнітного поля в різних геометрія його дії для спін-вентильних структур з СІР геометрією протікання струму: №1-4.

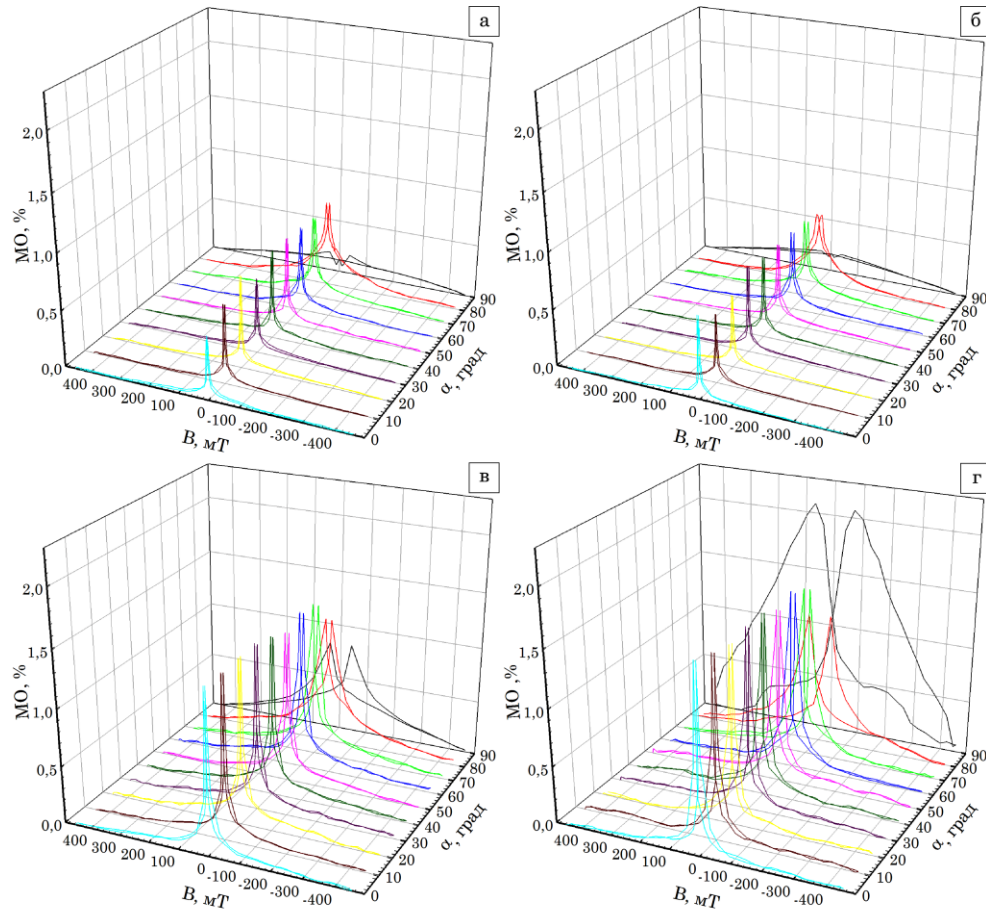
На Рис. 4 приведено експериментальні залежності зміни МО від зовнішнього магнітного поля B при його дії під кутами $\alpha = 0^\circ-90^\circ$.

З Рис. 4 видно, що суттєва зміна МО відбувається при наближенні до перпендикулярної геометрії прикладання магнітного поля, коли площина плівкової системи знаходиться під кутом $\alpha = 90^\circ$ до напрямку дії зовнішнього магнітного поля. На рис. 5 приведено залежності зміни МО від індукції магнітного поля при її дії в інтервалі кутів $80^\circ-90^\circ$.

Виходячи з даних, наведених на Рис. 4 та 5, узагальнені результати максимального значення зміни МО при відповідних полі коерцитивності та куті між площиною зразка та напрямом ліній магнітної індукції наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Узагальнені результати найбільшого значення зміни МО для кожної досліджуваної спін-вентильної системи

| Система | МО, % | B_c , мТ | α , град |
|---|-------|------------|-----------------|
| Au(1)/Co(3)/Au(6)/Co(20)/SiO ₂ /Si | 0,8 | 2,76 | 50 |
| Au(1)/Co(3)/Cu(6)/Co(20)/SiO ₂ /Si | 0,77 | 2,88 | 30 |
| Au(1)/Co(20)/Au(6)/Co(3)/SiO ₂ /Si | 1,48 | 3,94 | 20 |
| Au(1)/Co(20)/Cu(6)/Co(3)/SiO ₂ /Si | 2,13 | 68,47 | 90 |

**Рис. 4** – Експериментальні залежності зміни МО від індукції магнітного поля при кутах її дії 0°-90° для спін-вентилів: №1 (а), №2 (б), №3 (в), №4 (г)

4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Характерними особливостями результатів дослідження є те, що величина зміни МО практично не залежить від кута α в інтервалі $\alpha = 0^\circ-70^\circ$. В діапазоні $70^\circ-90^\circ$ величина МО різко зменшується у випадку спін-вентилів №1-3 або, навпаки, – різко збільшується у спін-вентилі №4. Це ілюструється залежностями МО від величини B при різних кутах її орієнтації відносно площини підкладки (Рис. 6а). У випадку коерцитивності (Рис. 6б), її

величина також практично не залежить від кута α в інтервалі $\alpha = 0^\circ-70^\circ$, що пов'язано з наявністю осі легкого намагнічування у цьому інтервалі значень кута α , яка дозволяє намагнічувати та перемагнічувати спін-вентильні структури при малому полі. Різке зростання коерцитивної сили в інтервалі $\alpha = 0^\circ-90^\circ$ у всіх чотирьох типах спін-вентилів можна пояснити анізотропією шарів Co у площині підкладки.

Для вірної інтерпретації отриманих результатів необхідно підкреслити, що спін-вентилі №1 і №2 мають класичну структуру, в якій нижній «закріплюючий» феромагнітний шар Co(20) більш магнітожорсткий у порівнянні із верхнім магнітом'яким шаром Co(3), який починає перемагнічуватися при меншому значенні індукції зовнішнього магнітного поля у порівнянні із шаром Co(20). Різка зміна МО якраз і відбувається в інтервалі значень індукції, коли починають перемагнічуватися шари Co(3) і Co(20), що відбувається, скоріше за все, в інтервалі $\alpha = 70^\circ-90^\circ$. Перестановка цих шарів місцями у спін-вентилів №1 і №3 не призводить до зміни характеру залежності МО і B_c від кута α за виключенням спін-вентеля №4. Особливість структури цього спін-вентеля полягає в тому, що із шаром Co(3) граничить із шаром Si(6), утворюючи твердий розчин т.р. (Si, Co) із необмеженою розчинністю і елементами гранульованого стану ще на етапі конденсації багат шарової плівкової системи, як це

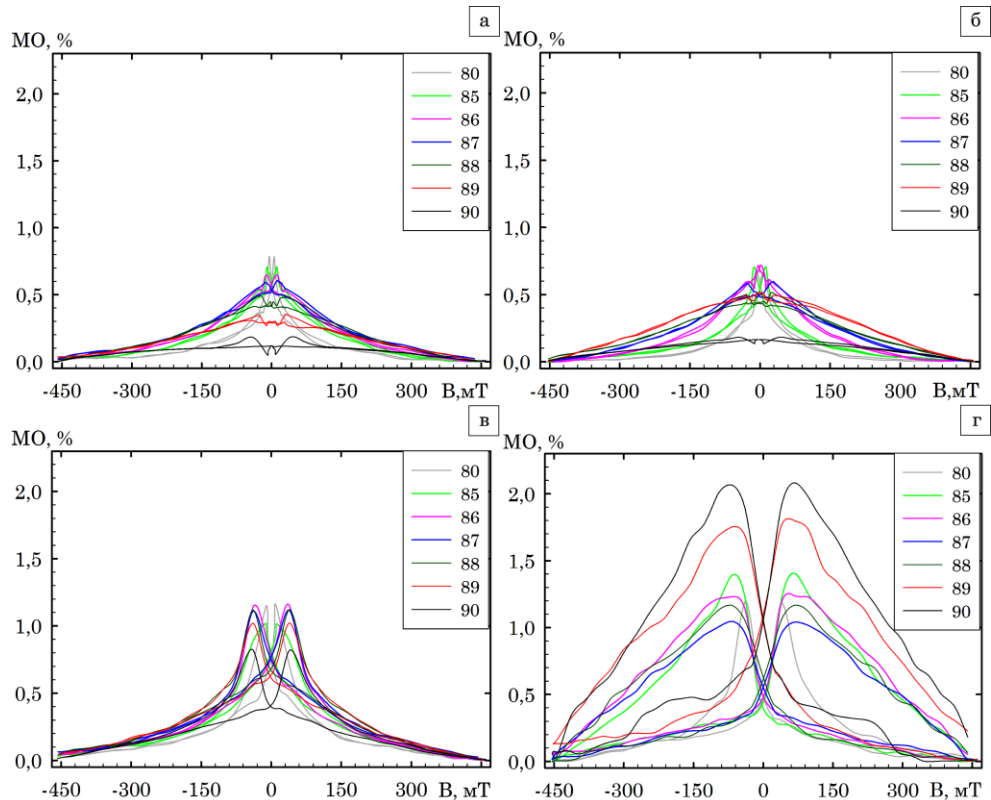


Рис. 5 – Експериментальні залежності зміни МО від індукції магнітного поля при кутах її дії $80^\circ-90^\circ$ для спін-вентилів: №1 (а), №2 (б), №3 (в), №4 (г)

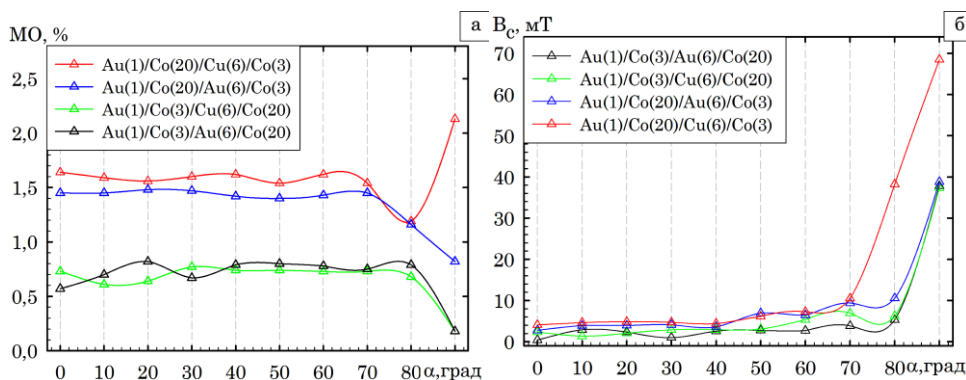


Рис. 6 – Залежності зміни МО (а) та коерцитивної сили (б) від кута дії зовнішнього магнітного поля для спін-вентильних структур

описано авторами у роботах [4, 5]. Особливість перемагнічування шару т.р. і призводить до «аномальної» залежності МО від α . При заміні шару Cu(6) на Au(6) також стабілізується т.р. (Au, Co), але з дуже обмеженою розчинністю [4-6], що не впливає на процес перемагнічування шару Co(3). У випадку закріплюючого шару Co(20) він розчиняється лише частково, зберігаючи до великої міри свою індивідуальність і не призводить до значного впливу на зміну МО спін-вентильних структур.

5. ВИСНОВКИ

Проведені дослідження МО і коерцитивності B_c чотирьох типів спін-вентильних структур на основі шарів Co і Cu або Au в залежності від кута α між площиною підкладки SiO_2/Si і напрямом індукції зовнішнього магнітного поля. Встановлено, що в інтервалі $\alpha = 0^\circ - 70^\circ$ величина зміни МО і B_c практично не залежать від α , але при $\alpha = 70^\circ - 90^\circ$ МО зменшується у випадку спін-вентилів (№1, №2 та №3), а B_c різко збільшується для есих спін-вентилів. Характер залежності має однаковий характер у трьох випадках спін-вентилів незалежно від того закріплюючим шаром виступає Co з товщиною 3 або 20 нм. Аномальне збільшення МО спостерігається у спін-вентилі (№4), що пояснюється утворенням твердого розчину атомів шару Co(3) у шарі Cu(6) на стадії конденсації багат шарової плівкової системи.

MAGNETO-RESISTIVE PROPERTIES OF SPIN-VALVE STRUCTURES BASED ON Co AND Cu OR Au

M.H. Demydenko, S.I. Protsenko, D.M. Kostyuk, I.V. Cheshko

Sumy State University,
2, R.-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine
E-mail: serhiy.protsenko@elit.sumdu.edu.ua

The construction of module for automation measurement of magnetoresistance (MR) and coercitivity force (B_c) in spin-valve structures based on Co and Cu or Au film systems was proposed. The peculiarities of dependences of MR and B_c from angle α

between substrate plane and direction of external magnetic field induction were studied. The abrupt changes of MR and B_c in the range $\alpha = 70^\circ-90^\circ$ were determined. The dependence character of MR from α describes as a level of solution of atoms of bottom ferromagnetic layer Co(3 nm) or Co(20 nm) in layer Cu(6 nm) as long as atoms Co(3 nm) have a practically full solution but Co(20 nm) – only limited solution. In this case magnetization of magnet layers of Co(20) and solid solution (s. s.) [Cu, Co(3 nm)] and layers of [Co(20 nm-x)] + s.s.[Cu, Co(x)] realize in different ways. This fact is cause of increase or decrease of MR.

Keywords: SPIN-VALVE, MR, INDUCTION OF MAGNETIC FIELD, COERCITIVITY.

МАГНИТО-РЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА СПИН-ВЕНТИЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ Co И Cu ИЛИ Au

М.Г. Демиденко, С.И. Проценко, Д.Н. Костюк, И.В. Чешко

Сумский государственный университет,
ул. Р.-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина
E-mail: serhiy.protsenko@elit.sumdu.edu.ua

Предложена конструкция модуля автоматизированного измерения магнито-сопротивления (МС) и коэрцитивности (B_c) спин-вентильных структур на основе пленок Co и Cu или Au. Изучены особенности зависимости МС и B_c от угла α между плоскостью подложки и направлением индукции внешнего магнитного поля. Установлено, что в интервале $\alpha = 70^\circ-90^\circ$ наблюдается резкое изменение МС и B_c . Характер зависимости МС от α определяется степенью растворения атомов нижнего ферромагнитного слоя Co(3 нм) или Co(20 нм) в слое Cu(6 нм), поскольку атомы слоя Co(3 нм) практически полностью растворяются, а в случае Co(20 нм) – только частично. В зависимости от этого перемагничивание системы магнитных слоев Co(20 нм) и т.р. [Cu, Co(3 нм)], а также Co(3 нм) и [Co(20 нм-x)] + т.р.[Cu, Co(x)] происходит по-разному, что и определяет увеличение или уменьшение величины МС.

Ключевые слова: СПИН-ВЕНТИЛЬ, МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ, ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, КОЭРЦИТИВНОСТЬ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. B. Anwarzaia, V. Aca, S. Luby, E. Majkovab, R. Senderak, *Vacuum* **84**, 108 (2010).
2. G.S. Katranasa, T. Meydana, A. Ovaria, F. Borzaa, M. Yasina, C. Malvicino, H. Pfützner, M. Vázquez, M. Rohne, B. Marquardt, *Sensor Actuat. A-Phys.* **129**, 43 (2006).
3. І.В. Чешко, С.І. Проценко, П. Шіфаловіч, *Вісник СумДУ, Серія «Фізика, математика, механіка»*, **2** 106 (2008).
4. І.В. Чешко, І.Ю. Проценко, *Металлофиз. Новейшие технол.* **31**, 963 (2009).
5. С.Н. Вдовичев, Б.А. Грибков, А.Ю. Климов, В.В. Рогов, *Письма в ЖТФ* **34**, 81 (2008) (S.N. Vdovichev, B.A. Gribkov, A.Y. Klimov, V.V. Rogov, *Tech. Phys. Lett.* **34**, 671 (2008)).