

В.М. Коломієць, В.Б. Лобода, Ю.О. Шкурдода, В.О. Кравченко, С.М. Хурсенко

Магніторезистивні властивості плівок Co/Cu/Co/П з додатковим ультратонким шаром Cr

Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка,
вул. Роменська, 87, 40002, Суми, Україна, e-mail: kolomicvladimir@rambler.ru

Представлені результати експериментальних досліджень ефекту гігантського магнітоопору в плівкових зразках Co/Cu/Co/Cr/П та Co/Cu/Cr/Co/П з товщиною шарів в інтервалі $d_{Co} = 20 - 50$ нм $d_{Cu} = 2 - 20$ нм та $d_{Cr} = 2 - 20$ нм. Встановлено, що для зразків Co/Cu/Co/Cr/П з товщиною шарів $d_{Co} = 20-40$ нм, $d_{Cu} = 3 - 15$ нм, $d_{Cr} = 3-10$ нм спостерігається ефект ГМО з максимальною амплітудою (1,8 %) після відпалювання за температури 550 К. Для всіх досліджуваних зразків Co/Cu/Cr/Co/П спостерігається анізотропний магнітоопір.

Ключові слова: гігантський магнітоопір, анізотропний магнітоопір, спин-залежне розсіювання, домішки, інтерфейси.

Стаття постуила до редакції 20.06.2012; прийнята до друку 15.12.2012.

Вступ

З часу висунення гіпотези про те, що ефект ГМО обумовлений асиметрією спин-залежного розсіювання (СЗР) носіїв заряду, було зроблено багато спроб модифікувати СЗР електронів шляхом введення відповідних домішок у інтерфейси або в об'єми магнітних шарів [1]. Але не дивлячись на велику кількість робіт у цьому напрямку, питання щодо впливу різних домішок на амплітуду ефекту ГМО залишається відкритим. У роботі [2], також, теоретично показано, що коли в феромагнітних шарах металу ефективними є носії заряду з різними спіновими індексами, тобто в одному магнітному шарі ефективними є електрони зі спіном $S = +$, а в іншому – носії заряду зі спіном $S = -$ ($\alpha_1 > 1$, $\alpha_2 < 1$ або навпаки), то можлива інверсія [3], тобто зміна знаку ефекту. Виходячи з вищесказаного метою даного дослідження було встановлення впливу додаткового дифундуючого шару Cr на магніторезистивні властивості тришарових плівок Co/Cu/Co/П.

I. Методика і техніка експерименту

Багатошарові плівкові системи з товщиною шарів (1 - 50) нм отримували у вакуумній камері установки ВУП-5М при тиску газів залишкової атмосфери 10^{-4} Па [4]. Почергова конденсація плівок здійснювалася в результаті випаровування металів чистотою не гірше 99,98% із незалежних джерел (Cu,

Cr - з вольфрамової стрічки, Co – з електронно-променевої гармати). Конденсація плівок проводилася при кімнатній температурі підкладки зі швидкістю $\omega = (0,5 - 1)$ нм/с залежно від режимів випаровування. Для дослідження електро- та магніторезистивних властивостей як підкладки використовувалися поліровані скляні пластини з попередньо нанесеними контактними площадками.

Конструкція виготовленого підкладкотримача дозволяла отримувати за один технологічний цикл два плівкові зразки з різною товщиною немагнітного прошарку та з майже однаковою товщиною феромагнітних шарів. Геометричні розміри плівок для вимірювання їх електричного опору задавалися вікнами, виготовленими з високою точністю у механічних масках з ніхромової фольги.

Товщина плівок вимірювалася за допомогою мікроінтерферометра МП - 4 з лазерним джерелом світла і комп'ютерною системою реєстрації інтерференційної картини, що дозволяло підвищити точність вимірювань, особливо в області товщини $d < 50$ нм.

Вимірювання повздожнього та поперечного магнітоопору і термомагнітна обробка плівок проводились у спеціальній установці в умовах надвисокого безмасляного вакууму ($10^{-6}-10^{-7}$) Па у магнітному полі напруженістю до $H = 150$ кА/м. Оскільки при дослідженні магнітоопору вимірюється безпосередньо величина електроопору зразка, а не його питомий опір, то похибка цих вимірювань становить 0,02 %.

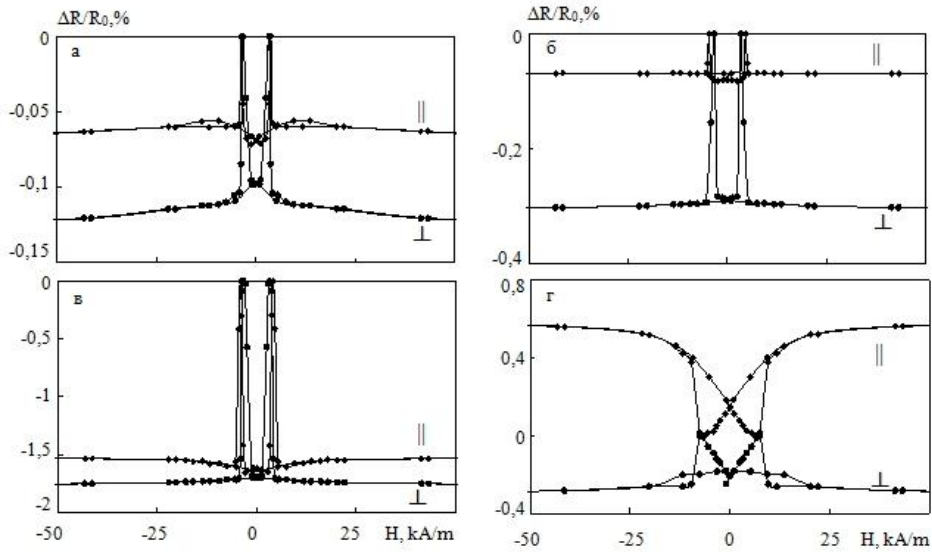


Рис. 1. Залежність повздовжнього (||) та поперечного (⊥) МО від напруженості магнітного поля для невідпаленої (а) та відпаленої при різних температурах (б – г) плівкової системи Co(30 нм)/Cu(7 нм)/Co(30 нм)/Cr(2 нм)/Π; б-температура відпалювання 400 К, в – температура відпалювання 550 К, г - температура відпалювання 700 К.

II. Експериментальні результати

Слід відмітити, що для свіжосконденсованих у аналогічних умовах тришарових зразків Co/Cu/Co/Π з $d_{Co} = 20 - 40$ нм та $d_{Cu} = 2 - 5$ нм [5] реалізується ефект ГМО величиною 0,5 - 1,2 %. Відпалювання цих зразків за температури $T_{відп} = 700$ К призводило до появи анізотропії магнітоопору (АМО). Для плівок Co/Cu/Co/Π з $d_{Cu} > 5$ нм не спостерігається переходу від ГМО до АМО після відпалювання за $T_{відп} = 700$ К. Максимальне значення ГМО 4 % при кімнатній температурі було отримано для плівок з $2d_{Co} = 30$ нм та $d_{Cu} = 5$ нм відпалених за 700 К.

Розглянемо особливості магніторезистивного

ефекту для тришарових плівок Co/Cu/Co/Π з додатковим ультратонким шаром Cr. На рис.1 в якості ілюстрації представлені польові залежності для невідпалених та відпалених за різних температур систем Co/Cu/Co/Cr/Π. Як видно з рисунків, деякі залежності $(\Delta R/R_0)(H)$ для повздовжнього МО мають нетиповий характер (див. також рис. 2) для зразків з гігантським магніторезистивним ефектом. Величина ефекту ГМО для свіжосконденсованих плівок Co/Cu/Co/Cr/Π з $d_{Co} = 20 - 40$ нм, $d_{Cu} = 3 - 15$ нм, $d_{Cr} = 3 - 10$ нм, дещо менша (0,2 - 0,5 %) в порівнянні з плівками Co/Cu/Co/Π, внаслідок шунтування додатковим шаром Cr.

При зменшенні напруженості зовнішнього магнітного поля від значення поля насичення H_S до 0 величина електроопору спочатку слабо зростає, а

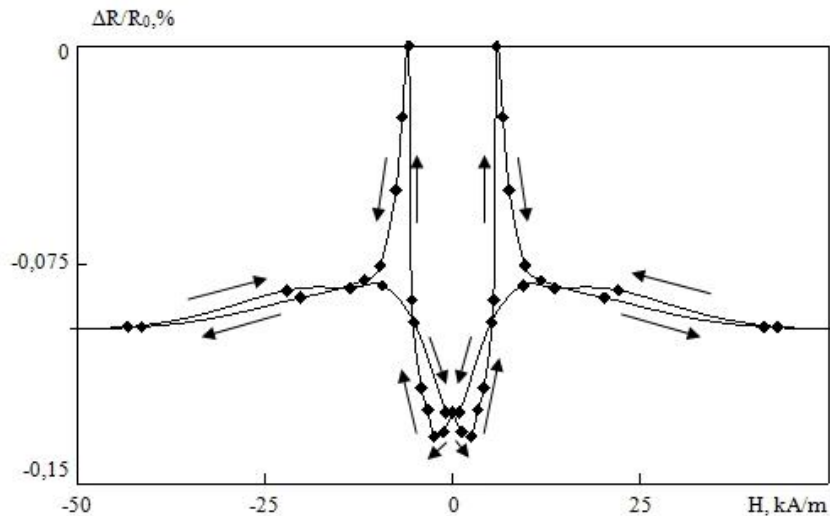


Рис. 2. Залежність повздовжнього МО від напруженості магнітного поля для відпаленої за температури 400 К плівкової системи Co(30 нм)/Cu(5 нм)/Co(30 нм)/Cr(5 нм)/Π.

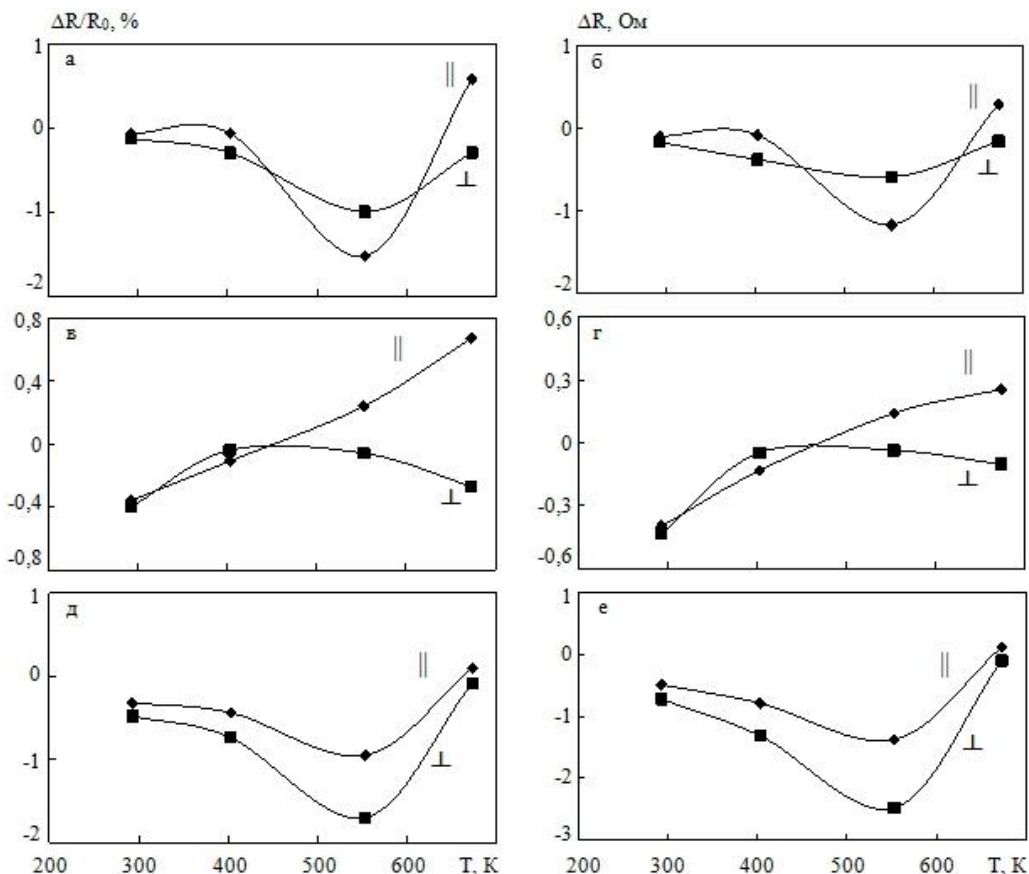


Рис. 3. Залежність $(\Delta R/R_0)_{\text{max}}$ (а, в, д) та ΔR (б, г, е) від $T_{\text{відп}}$ для плівкових структур: а, б – Co(30 нм)/Cu(7 нм)/Co(30 нм)/Cr(2 нм)/П; в, г – Co(30 нм)/Cu(5 нм)/Co(30 нм)/Cr(5 нм)/П; д, е – Co(30 нм)/Cu(7 нм)/Co(30 нм)/Cr(10 нм)/П.

потім різко падає. Після зміни напрямку зовнішнього магнітного поля опір різко зростає і досягає максимального значення у полі коерцитивної сили H_C . Подальше збільшення напруженості магнітного поля призводить до різкого падіння МО, аналогічно до типових ізотропних польових залежностей ГМО. Слід відмітити, що для тришарових плівок Co/Cu/Co/П з ГМО, як невідпалених так і відпалених за різних температур спостерігаються типові ізотропні польові залежності ГМО, хоча деяка макроскопічна анізотропія магнітоопору, пов'язана з магнітною анізотропією, зберігається. Про це свідчать дещо різні значення магніторезистивних відношень виміряних при двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Нетипова поведінка польових залежностей для плівок Co/Cu/Co/Cr/П, в яких спостерігається ефект ГМО, на нашу думку, пов'язана наявністю домішок Cr в одному з шарів Co, оскільки навіть у свіжосконденсованих плівках атоми Cr можуть проникати в шар Co в наслідок конденсаційно-стимульованої дифузії.

Аномальний хід польових залежностей для плівок Co/Cu/Co/Cr/П з $d_{\text{Cu}} < 3$ нм можна було б пояснити значним вкладом анізотропного магнітоопору, оскільки в плівках з такою ефективною товщиною прошарку початкова

щільність мікроотворів у прошарку може бути близькою до критичної їх щільності при переході до феромагнітного впорядкування намагніченостей обох шарів. Це призводить до суттєвого зменшення вкладу спин-залежного розсіювання електронів і посилення анізотропного розсіювання електронів провідності, обумовленого спин-орбітальною взаємодією. В такому випадку, навіть низькотемпературне відпалювання ($T_{\text{відп}} = 400, 500$ К) привело б до появи типового анізотропного МО. Хоча слід звернути увагу на малі значення поперечного МО (0,02 - 0,05 %) в порівнянні з повздовжнім (0,15 - 0,3 %). Але для плівок з $d_{\text{Cu}} = 5 - 10$ нм відпалювання за $T_{\text{відп}} = 700$ К призводить до майже зникнення аномальної поведінки польових залежностей. Розглянемо детальніше, як змінюються при відпалюванні польові залежності та величина максимального магніторезистивного відношення $(\Delta R/R_0)_{\text{max}}$. На рис. 3 представлені залежності $(\Delta R/R_0)_{\text{max}}(T_{\text{відп}})$ та $\Delta R(T_{\text{відп}})$ для плівок з різною товщиною додаткового шару Cr. Як видно з рис. 3 хід залежностей $(\Delta R/R_0)_{\text{max}}(T_{\text{відп}})$ майже повністю визначається ходом відповідних залежностей $\Delta R(T_{\text{відп}})$.

Тому явище зростання $(\Delta R/R)_{\text{max}}$ може бути пов'язане як зі збільшенням $\Delta R = R_{\text{max}} - R_s$, (R_{max} -електричний опір зразка виміряний у полі

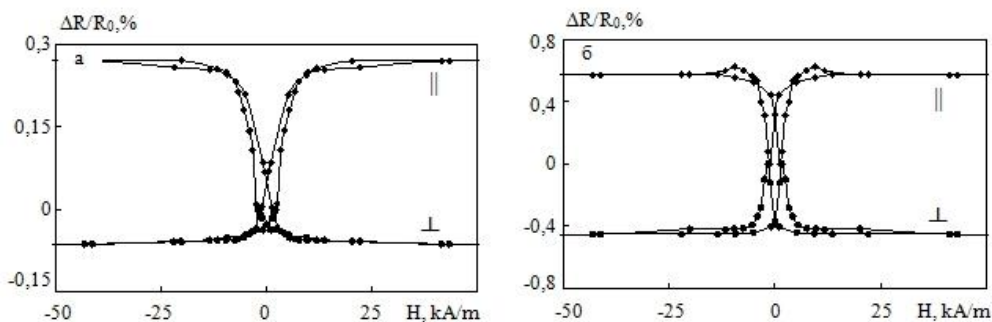


Рис. 4. Залежність повздовжнього (||) та поперечного (⊥) МО від напруженості магнітного поля відпаленої за температури 550 К (а) та 700 К (б) плівкової системи Co(25 нм)/Cu(15 нм)/Cr(10 нм)/Co(25 нм)/П.

$H = H_C$, R_s – електричний опір виміряний у максимальному полі), так і зі зменшенням R_s . Дійсно, для всіх досліджуваних зразків електричний опір у процесі відпалювання зменшується. Зменшення електроопору плівок може свідчити про згладжування поверхневих меж поділу плівок (відмітимо, що загальна товщина мультишарової структури менша довжини вільного пробігу електронів) – це так зване підвищення ступеня «дзеркальності відбиття» [3]. Для плівок з $d_{Cu} = 7 - 10$ нм спостерігається зростання різниці ΔR (рис. 3, б, е). Зростання різниці ΔR пояснити складніше, але і це явище також має бути пов'язано з процесами, що відбуваються при відпалюванні в області поверхонь розділу (не лише зовнішніх, але і внутрішніх). Відомо, що вплив шорсткостей меж поділу на амплітуду ефекту ГМО визначається конфігурацією центрів, що асиметрично розсіюють електрони з різною поляризацією спіну по відношенню до вектора локальної намагніченості в магнітному шарі металу. Як показано в теоретичній роботі [6], при незначній амплітуді шорсткості розсіяння носіїв заряду зовнішніми межами та інтерфейсами практично дзеркальне і ефект максимальний. Зі збільшенням величини шорсткості амплітуда ефекту ГМО зменшується внаслідок втрати кореляції між відбитим і падаючим електроном. У системах, у яких компоненти не змішуються (до них відносяться і досліджувані системи), шорсткість меж поділу може істотно зменшуватися внаслідок згладжування при відпалюванні. Цей процес можливий завдяки тому, що зниження вільної енергії такої структури досягається при дифузії атомів уздовж поверхні розділу для того, щоб зменшити її площу. При відпалюванні відбувається зміна шорсткості в оптимальну сторону і, при умові, що домінуючим механізмом спін-залежного розсіювання електронів є їх розсіювання в об'ємі магнітних шарів, а зразки мають дрібнодисперсну структуру, амплітуда ефекту ГМО буде збільшуватися. На жаль, це досить важко перевірити експериментально в зв'язку з тим, що зміна шорсткості повинна відбуватися в масштабі розмірів декількох атомів.

В цілому залежності $(\Delta R/R_0)_{max}$ від $T_{відп}$ для плівкових систем Co/Cu/Co/Cr/П подібні до відповідних залежностей для тришарових плівок

Co/Cu/Co/П. Слід лише відмітити таку особливість: для плівок Co/Cu/Co/П після відпалювання спостерігається збільшення величини ГМО в 2 - 5 разів, а для плівок з додатковим шаром Cr спостерігається зростання амплітуди ГМО в 10 - 15 разів. Високий рівень дефектності плівкових структур стимулює процеси швидкого переносу домішок у процесі відпалювання. На нашу думку, дифузія атомів Cr в шар Co призводить також до значного зростання амплітуди ГМО після відпалювання за $T_{відп} = 550$ К у порівнянні з плівками Co/Cu/Co/П. При подальшому відпалюванні за температури 700 К, атоми Cr досягають межі поділу Co/Cu, що й приводить до деградації ефекту ГМО.

Введення додаткового шару Cr з товщиною $d_{Cr} = 2 - 10$ нм на межу поділу шарів призводить до появи анізотропії МО незалежно від товщини прошарку Cu (рис. 4).

Висновки

1. У свіжосконденсованих плівкових системах Co/Cu/Co/Cr/П з $d_{Co} = 20 - 40$ нм, $d_{Cu} = 3 - 15$ нм та $d_{Cr} = 3 - 10$ нм реалізується ефект ГМО амплітуда якого складає 0,2 - 0,5 % при кімнатній температурі.
2. Відпалювання цих зразків за температури 550 К призводить до значного росту (у 10 - 15 разів) амплітуди ефекту ГМО.
3. Відпалювання цих зразків за температури 700 К призводить до переходу від ГМО до анізотропного МО.
4. Для плівкових систем Co/Cu/Cr/Co/П як свіжосконденсованих так і відпалених за температур 400 К, 550 К та 700 К незалежно від товщини шарів спостерігається лише анізотропний МО.

Коломієць В.М. - аспірант кафедри фізики;
Лобода В.Б. - кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри фізики;
Шкурдода Ю.О. - кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики;
Кравченко В.О. - кандидат фізико-математичних наук, старший викладач кафедри експериментальної і теоретичної фізики.

- [1] E.Y. Tsymbal, D.G. Pettifor. Solid State Physics (New York: Academic Press) 56, 113 (2001).
- [2] Ju.A. Shkurdoda, L.V Dehtjaruk. Metallofiz. i novejshe tehnol. 33(2), 149 (2011).
- [3] Yu. A. Shkurdoda, L.V. Dekhtyaruk, V.B. Loboda. Functional materials 15(1), 38 (2008).
- [4] V.B. Loboda, Yu.A. Shkurdoda, V.A. Kravchenko. Functional materials 14(1), 37 (2007).
- [5] V.B. Loboda, Ju.A. Shkurdoda, V.A. Kravchenko, S.N. Hursenko, V.N. Kolomiec. Metallofiz. i novejshe tehnol. 33(2), 161 (2011).
- [6] L.V. Dehtjaruk. Visnik SumDU. Serija: Fizika, matematika, mehanika 2, 115 (2007).

V.M. Kolomiets, V.B. Loboda, Yu.O. Shkurdoda, V.O. Kravchenko, S.M. Khursenko

Magnetoresistive Properties of Films Co/Cu/Co/S With an Additional Ultra Slim Layer Cr

Sumy State Pedagogical University named after A.S. Makarenko, Romens'ka str., 87, Sumy, 40002, Ukraine

Results of experimental studies of giant magnetoresistance effect in thin films of Co/Cu/Co/Cr/S and Co/Cu/Cr/Co/S with layer thicknesses in the range of $d_{Co} = 20 - 50$ nm, $d_{Cu} = 2 - 20$ nm and $d_{Cr} = 2 - 20$ nm are presented. One can find samples of Co/Cu/Co/Cr/S with layer thicknesses in the range of $d_{Co} = 20 - 40$ nm, $d_{Cu} = 3 - 15$ nm, $d_{Cr} = 3 - 10$ nm is observed the GMR effect with the maximum amplitude (1,8 %) after annealing at temperature 550 K. Anisotropic magnetoresistance is observed for all investigated samples Co/Cu/Cr/Co/S.

Keywords: giant magnetoresistance, spacer, anisotropic magnetoresistance, spin-dependent scattering, impurities, interfaces.