

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Федченко Олена Вікторівна

УДК 544.015; 537.622; 54-165

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВИЙ СТАН І МАГНІТООПТИЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ Fe, Co, Cr
ТА БЛАГОРОДНИХ МЕТАЛІВ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, доцент
Проценко Сергій Іванович,
декан факультету електроніки та інформаційних
технологій Сумського державного університету.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, доцент
Семенько Михайло Петрович,
доцент кафедри фізики металів Київського національного
університету ім. Тараса Шевченка;

доктор фізико-математичних наук, професор
Дехтярук Леонід Васильович,
професор кафедри фізики Харківського національного
університету будівництва та архітектури.

Захист відбудеться « 27 » грудня 2013 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розіслано « 21 » листопада 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. О. Рибалко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний розвиток електроніки і приладобудування тісно пов'язаний із спінтронікою – наукою, що вивчає властивості та ефекти у матеріалах із спін-залежним розсіюванням, зокрема мультишарах, гранульованих сплавах та спін-вентильних структурах, які мають високі значення магнітоопору (МО). Залежно від сфери практичного використання до магнітних характеристик цих структур ставляться певні вимоги. Так, наприклад, для магнітного запису потрібні системи з одновісною магнітною анізотропією, які б мали високі значення магнітної проникності, температури Кюрі та поля насичення. З точки зору практичного застосування плівки феромагнітних (Co, Fe, Ni) і парамагнітних (Cr) металів та їх сплавів є перспективними магнітними матеріалами. Вони, наприклад, використовуються у спін-вентильних структурах із немагнітними прошарками на основі Au, Ag та Cu. Стосовно магнітних властивостей цих структур на сьогодні накопичений значний теоретичний і експериментальний матеріал. Однак маловивченими залишаються питання щодо впливу на їхні властивості процесів фазоутворення, рекристалізації та дифузії, що виникають при термообробленні і можуть призвести до зміни обмінної взаємодії між магнітними шарами та порушити магнітне впорядкування. Тому актуальними на сьогодні є питання пошуку матеріалів, які б мали термостабільні структурні та магнітні характеристики.

Вищезазначене свідчить про актуальність розв'язання задач, пов'язаних із комплексним дослідженням процесів фазоутворення, електрофізичних та магнітних властивостей плівкових систем на основі Fe, Co, Cr та благородних металів.

Важливим питанням також є встановлення оптимальних умов отримання багатошарових плівкових систем, оскільки швидкість конденсації, матеріал та температура підкладки істотно впливають на структурно-фазовий стан, електрофізичні та магнітні характеристики систем у цілому.

Із вищенаведеного випливає доцільність комплексного вивчення властивостей спін-вентильних структур на основі Fe, Co та Au, оскільки вони поєднують у собі високі значення поля насичення шару Fe та анізотропію шару Co. Крім того, мають магнітні шари з різними значеннями індукції розмагнічування (B_c) та суцільний немагнітний прошарок (на основі Au) вже при ефективній товщині $d_{Au} \cong 5 - 6$ нм.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету в рамках держбюджетної теми № 0112U001381 «Електрофізичні і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів» (2012-2014 рр.) та міжнародного науково-технічного співробітництва між Сумським державним

університетом та Інститутом фізики при Університеті ім. Й. Гутенберга (Німеччина) (2011 – 2012 рр.). Здобувач брала участь у проведенні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень.

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи полягала у встановленні кореляції між структурно-фазовим станом та МО і магнітооптичним ефектом Керра (МОКЕ) двошарових плівкових систем та спін-вентильних структур на основі Fe, Co, Cr та Au в умовах протікання дифузійних процесів та фазоутворення. Крім того, задачею було визначити оптимальні умови конденсації та концентрації компонент у двошарових плівкових системах, які є фрагментами спін-вентильних структур, для забезпечення термічної стабільності їхніх магнітних характеристик.

Відповідно до поставленої мети були вирішені такі задачі:

- досліджені фазовий склад і процеси взаємної дифузії у двошарових плівкових системах, які є фрагментами спін-вентильних структур;
- визначені коефіцієнти конденсаційно-стимульованої (КСД) та термічної дифузії (ТД) у плівкових системах Fe/Cr та Fe/Co;
- визначене оптимальне співвідношення загальної концентрації компонент у двошарових плівкових системах на основі Fe, Co та Cr для досягнення найбільших за величиною і термостабільних значень магнітних характеристик;
- досліджений вплив матеріалу підкладки та умов конденсації на інтенсивність протікання дифузійних процесів, структурно-фазовий стан, МО та МОКЕ двошарових плівкових систем;
- досліджені магніторезистивні та магнітооптичні властивості плівкових систем на основі Fe, Co, Cr та Au і встановлені кореляції цих властивостей із структурно-фазовим станом.

Об'єкт дослідження – вплив процесів взаємної дифузії атомів та фазоутворення на магніторезистивні й магнітооптичні властивості двошарових плівкових систем і спін-вентильних структур на їх основі.

Предмет дослідження – фазовий склад, електрофізичні, магніторезистивні та магнітооптичні властивості двошарових плівкових систем та спін-вентильних структур на основі Cr, Fe, Co та благородних металів.

Методи дослідження: формування двошарових плівкових систем та спін-вентильних структур методом пошарової вакуумної конденсації металів; просвічувальна електронна (ПЕМ) та атомно-силова мікроскопія (АСМ); дифракція повільних електронів (ДПЕ); енергодисперсійний рентгенівський мікроаналіз (ЕДА) та рентгенографія; вторинно-іонна мас-спектрометрія (ВІМС) та оже-електронна спектроскопія (ОЕС); магніторезистивні вимірювання; магнітооптичний ефект Керра (МОКЕ) у поздовжній та перпендикулярній геометріях.

Наукова новизна отриманих результатів. Проведені в роботі комплексні дослідження дозволили встановити кореляцію між фазовим складом та

магніторезистивними і магнітооптичними властивостями двошарових систем та спін-вентильних структур:

1. Знайшли подальшого розвитку дослідження методом ОЕС особливостей дифузійних процесів у нанорозмірних плівкових системах у широкому інтервалі температур. Установлена ефективність методу ОЕС при дослідженні в нанорозмірних шарах КСД, ТД та, у сукупності з результатами ВІМС, ролі іонно-стимульованої дифузії.

2. Уперше установлені оптимальні загальні концентрації компонент у двошарових плівкових системах на основі Fe, Co та Cr, що забезпечують максимальні за величиною і термостабільні магнітні характеристики. Також визначені зміни характеру та ізотропності залежностей магнітних характеристик плівкових систем при змінах загальної концентрації однієї з компонент.

3. Уперше проведений порівняльний аналіз відомих теоретичних моделей для розрахунку коефіцієнтів КСД та ТД двошарових плівкових систем Fe/Cr. Зроблено висновок про високу ефективність методу функцій помилок Гауса та уточненого методу Уїпла, які враховують середній розмір зерен та товщину шару, що дифундує.

4. Установлена кореляція між товщиною і порядком чергування магнітних шарів спін-вентильних структур на основі Fe, Co, Au та магніторезистивними і магнітооптичними властивостями.

5. Експериментально визначений вплив процесів фазоутворення при відпалюванні спін-вентилів на порушення обмінної взаємодії між магнітними шарами, яке впливає на зміну характеру залежності та знака МО у структурах з відносно товстим ($d \cong 20$ нм) шаром Co.

Практичне значення результатів. Результати проведених досліджень поглиблюють розуміння проблеми впливу фазоутворення на величину і стабільність магнітних характеристик спін-вентильних структур. Крім того результати вивчення магніторезистивних та магнітооптичних властивостей чотирьох типів спін-вентилів дали можливість визначити оптимальний порядок чергування та товщину магнітних шарів для різних сфер використання цих структур. Так, для щільного магнітного запису оптимальними є плівкові системи, що мають відносно товстий верхній шар Fe, оскільки вони проявляють максимальні за величиною і термостабільні значення поля насичення (B_s). Для створення датчиків магнітного поля підходять спін-вентильні структури з відносно товстим шаром Co, оскільки вони проявляють максимальні за величиною і найбільш термостабільні значення МО та мінімальні значення B_s . Крім того, отримані в роботі результати модельних досліджень електрофізичних властивостей немагнітних плівок Ag та Au із покриттями ($d \leq 3$ нм) можуть бути використані при виборі матеріалів для магнітних шарів спін-вентильних структур.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, виготовленні плівкових зразків та дослідженні їх структурно-фазового стану, електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей, проведенні розрахунків коефіцієнтів дифузії за відомими теоретичними моделями та обробці отриманих результатів. Постановку задач дослідження й узагальнення експериментальних результатів проведено спільно з науковим керівником д.ф.-м.н. Проценком С. І. Частина експериментальних досліджень методом ВІМС проведена спільно з доц. Салтиковою А. І. (Сумський державний педагогічний університет), асистентом Демиденком М. Г. та співробітниками Інституту фізики Університету ім. Й. Гутенберга – проф. Шонхензе А. Г. та проф. Непійком С. А. Особисто автором підготовлено статтю [1] і тези доповідей [9; 13; 19], окремі розділи статей [2 – 5]. Матеріали робіт [6 – 8; 10 – 12; 14– 20] обговорювалися разом із співавторами. Основні наукові результати доповідались особисто автором на наукових конференціях і семінарах.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати оприлюднені та обговорені на таких конференціях: I та II Міжнародних конференціях «Nanomaterials. Application and properties» (Алушта, 2011, 2012 pp.); 8-й і 7-й Міжнародних конференціях «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (Москва, 2009, 2010 pp.); 4-й Міжнародній конференції «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур» (Харків, 2010 p.); Міжнародній науковій конференції «Модельовання-2010» (Київ, 2010 p.); Міжнародній конференції «Radiation Interaction With Material And Its Use In Technologies» (Kaunas, 2010 p.); 22-й Міжнародній конференції «СВЧ-техніка та телекомунікаційні технології» (Севастополь, 2012 p.); 8-й та 9-й Міжнародній конференції «Ion implantation and other applications of ions and electrons» (Kazimierz Dolny, 2010, 2012 pp.); 7-й Міжнародній конференції «New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation» (Zakopane, 2011 p.); науково-технічних конференціях факультету електроніки та інформаційних технологій (Суми, 2009–2012 pp.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображені у 20 публікаціях: 5 статтях у фахових наукових виданнях, 4 статтях у матеріалах конференцій і 11 тезах доповідей на наукових конференціях.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Вона викладена на 166 сторінках, із них 102 сторінки основного тексту, 68 рисунків і 25 таблиць, у тому числі 44 рисунки і 9 таблиць на 39 окремих аркушах та 4 додатки на 5 окремих аркушах. Список використаних джерел складається із 198 найменувань на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й основні задачі дослідження, висвітлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відмічений зв'язок роботи з науковою темою та міжнародним проектом науково-технічного співробітництва. Наведена інформація про апробацію отриманих результатів, особистий внесок здобувача та структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «*Структурно-фазовий стан та магнітооптичні властивості плівкових систем на основі Fe, Co та Cr* (літературний огляд)» поданий огляд літературних даних стосовно фазового складу двокомпонентних плівкових матеріалів на основі Fe та Co або Cr. Зокрема, у *першому підрозділі* вивчений вплив загальної концентрації компонент та умов конденсації (матеріалу та температури підкладки, швидкості конденсації) на структурно-фазовий стан цих систем.

Установлено, що при конденсації плівки Co на аморфну підкладку утворюється ГЦП-Co, вісь «с» (вона є віссю легкого намагнічування) якою перпендикулярна до площини плівки. При відпалюванні до 690 K відбувається перехід до високотемпературної фази ГЦК-Co. Однак стабілізація ГЦК-фази може відбуватись і при кімнатній температурі, якщо товщина плівки чи розмір зерен менші за критичну товщину (10 нм) або через велику концентрацію дефектів пакування. Крім того, аналіз літературних даних показав, що значення температури фазового перетворення Co під час нагрівання та під час охолодження істотно відрізняються. Так, температура аустенітного перетворення становить 690 K, а мартенситного – варіюється в інтервалі 570 – 670 K. Ступінь перетворення фаз та концентрація дефектів пакування можуть змінюватись залежно від умов термічної обробки плівки. Так, під час охолодження, перетворення β -Co \rightarrow α -Co реалізується неповністю, і деяка кількість високотемпературної фази зберігається і при кімнатній температурі. Тривале циклічне термооброблення збільшує активність перетворення, і після 20 циклів перехід β -Co \rightarrow α -Co реалізується повністю.

Проведений огляд літературних даних показав, що навіть при пошаровій конденсації Fe та Cr утворюється ОЦК-фаза – твердий розчин (т. р.) (Fe, Cr), який після відпалювання до $T_g = 710 - 820$ K розшаровується на тверді розчини, що збагачені атомами Fe та Cr. При збільшенні T_g до 1080 K знову утворюється гомогенний α -розчин (ОЦК-фаза).

У системі на основі Fe та Co розчинність компонент значно менша. Тому лише при температурі відпалювання 1250 K відбувається фазовий перехід α -Fe \rightarrow γ -Fe та утворення т. р. з ГЦК-Co – т. р. (Fe,Co).

У *другому підрозділі* наведені аналіз впливу дифузійних процесів на фазоутворення у плівкових системах та огляд теоретичних моделей, що

використовувалися для розрахунку коефіцієнтів КСД та ТД. Описана класифікація типів кінетики дифузії: А, В та С. Останній режим реалізується при нетривалому відпалюванні системи та малих значеннях об'ємної дифузії. Режим В реалізується при одночасному протіканні об'ємної та зерномежової дифузії та у разі, якщо межі зерен (МЗ) вважаються ізольованими. Режим А має місце, коли поля об'ємної дифузії від різних МЗ перекриваються.

У *третьому підрозділі* подані результати літературного огляду щодо залежності магнітооптичних властивостей систем на основі Fe, Co та Cr від умов конденсації (матеріалу, орієнтації та нахилу підкладки), концентрації компонентів, порядку осадження магнітних шарів та температури відпалювання систем.

У **другому розділі** «*Методика і техніка експерименту*» описані методи отримання плівкових систем на основі Fe, Co, Cr та Ag або Au і вивчення їх структурно-фазового стану, електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей.

Плівкові системи були отримані методом електропроменевого та термічного випаровування з використанням вакуумного обладнання (тиск залишкової атмосфери $10^{-7} - 10^{-4}$ Па). Швидкість конденсації плівок підбиралася таким чином, щоб виключити перемішування шарів: $\omega_{\text{Fe}} = 0,3$ нм/хв, $\omega_{\text{Co}} = 0,3$ нм/хв, $\omega_{\text{Au}} = 0,9$ нм/хв. Для контролю товщини плівок у процесі конденсації використовувався кварцовий резонатор. Загальна товщина плівкових систем контролювалася за допомогою інтерферометра.

Для дослідження структурно-фазового стану плівок, процесів дифузії та фазоутворення використовувалися методи електронної мікроскопії та дифракції (ПЕМ125-К), рентгенографічного аналізу (ДРОН-4), ОЕС (прилад Vacuum Microengineering Auger-spectrometer) та ВІМС (прилад МС-7201 М). Перевірка розрахункових значень концентрацій елементів проводилася методом ЕДА з урахуванням факторів Кліфа-Лорімера.

Розрахунок коефіцієнтів дифузії на основі експериментальних даних оже-спектроскопії для систем Fe/Cr та Fe/Co проводився за відомими теоретичними моделями: Матано, Лефакіса, Уїпла, Фур'є - аналізу, функцій помилок Гауса з урахуванням товщини шару дифузанта та за оцінною формулою. Найбільш точними виявились алгоритми, що враховують товщину шару матеріалу, який дифундує, – метод функції помилок Гауса (1), та розміри зерен – уточнений метод Уїпла (2).

Вивчення магнітооптичних властивостей плівкових систем на основі Fe, Co, Cr та Au проводилося за допомогою МОКЕ у двох геометріях вимірювання (поздовжній та перпендикулярній) при різних кутах повороту зразка в його площині на кут α . Вимірювання магнітоопору здійснювалося за чотири-точковою схемою у трьох геометріях (поздовжній, перпендикулярній та поперечній) при різних кутах повороту зразка відносно осі, паралельній його площині, на кут φ .

$$c'(x, \tau) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \eta = \frac{1}{2} (1 - \operatorname{erf} \eta), \quad \text{де } \eta = \frac{x + h/2}{2\sqrt{D\tau_1}} - \frac{x - h/2}{2\sqrt{D\tau_2}}, \quad (1)$$

$$c' = \frac{8\sqrt{D\tau}}{L\sqrt{\pi}} + \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D\tau}} \right) \left\{ 1 - \frac{8\sqrt{D\tau}}{L\sqrt{\pi}} \right\}, \quad (2)$$

де $c' = c/c_0$ – відносна концентрація певного елемента, що визначається з концентраційного профілю; h – товщина шару матеріалу, що дифундує; D – коефіцієнт дифузії; τ – час дифузії; x – координата, в якій визначалася концентрація компоненти; L – середній розмір зерен.

Третій розділ «Структурно-фазовий стан плівкових систем Fe/Co, Fe/Cr та Ag(Au)/Co(Cr,Cu)» складається з трьох підрозділів.

У першому підрозділі наведені результати дослідження впливу температури підкладки ($T_{\text{п}}$) на структурний стан Fe. Мікроскопічні дослідження показали, що під час конденсації плівки при кімнатній температурі зразки мали велику кількість дефектів та тріщини. При підвищенні $T_{\text{п}}$ до 450 К плівки Fe у свіжосконденсованому стані ставали суцільними.

Крім того, у першому підрозділі наведені результати досліджень фазового складу свіжосконденсованих двошарових плівок на основі Fe, Co, Cr, Ag і Cu та спін-вентильних структур на основі Fe, Co і Au при термообробці в інтервалі температур $T_{\text{е}} \cong 300 - 750$ К. Установлено, що КСД у системі Au/Cr/Fe/П призводить до утворення т. р. (α -Fe,Cr). Дослідження фазового складу системи Au/Co/Fe/П при відпалюванні в інтервалі температур 300 – 800 К показало, що у свіжосконденсованих зразках зберігається індивідуальність окремих шарів. Утворення т. р. (Au,Co) на основі ГЦК-ґратки Au спостерігається в інтервалі температур $T_{\text{е}} = 570 - 770$ К (табл. 1).

Таблиця 1

Фазовий склад плівкової системи Au(3)/Co(20)/Fe(70)/П після різних температур відпалювання

300 К	570 К	770 К	800 К
Au ГЦП-Co ОЦК-Fe	Au ГЦП-Co ОЦК-Fe	т. р. (Au,Co) ГЦП-Co ГЦК-Co (сліди) ОЦК-Fe	т. р. (Au,Co) ГЦП-Co ГЦК-Co ОЦК-Fe+ГЦК-Fe ₃ O ₄

У свіжосконденсованій системі Au/Co/Fe/П спостерігалася низькотемпературна фаза ГЦП-Co, яка при відпалюванні частково переходила до ГЦК-фази. Після чого β -Co брав участь у формуванні т. р. (Au,Co). Елементний аналіз плівки Au(3)/Co(20)/Fe(70)/П показав, що шар Au після відпалювання до 570 К мав острівцеву структуру.

У першому підрозділі також подані результати дослідження структурного

стану системи Co/Fe/П, яка конденсувалася на підкладку із монокристал (100)MgO або аморфної системи SiO₂/Si. Результати досліджень методом ЕДА показали, що домішки у зразках відсутні (рис. 1).

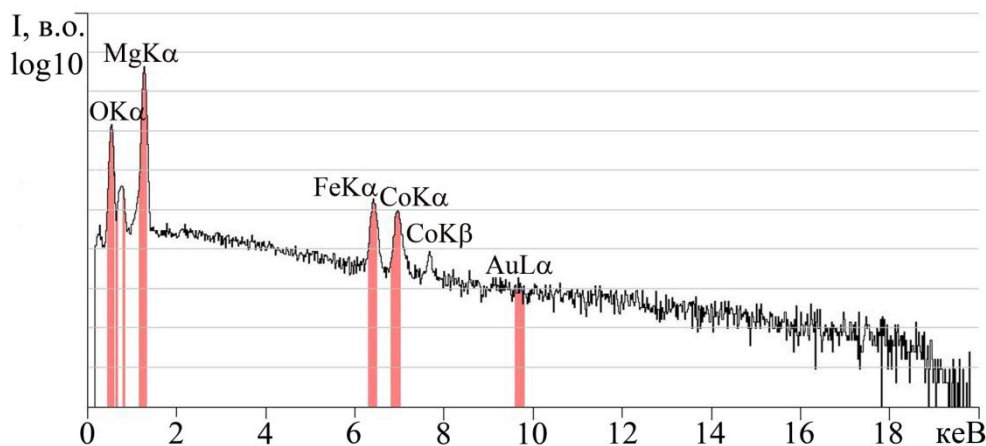


Рис. 1. ЕДА-спектр від системи Au(2)/Co(30)/Fe(30)/(100)MgO

Дослідження системи Au/Co/Fe/(100)MgO методом дифракції повільних електронів (ДПЕ) підтвердили епітаксціальний ріст плівки Fe на монокристалі (100)MgO. Параметри ґраток для ОЦК-Fe та ГЦК-MgO мають величини відповідно 0,287 та 0,422 нм. Епітаксціальний ріст для орієнтації (100)Fe||(100)MgO можливий, оскільки міжатомна відстань вздовж напрямку [110] $d_{\text{MgO}[110]} = 0,295$ нм, і різниця між a_{0Fe} та $d_{\text{MgO}[110]}$ становить $\cong 2,8$ %. Експериментальні дослідження методом ДПЕ показали розходження з табличними даними: різниця між a_{0Fe} та $d_{\text{MgO}[110]}$ становить $\cong 6,5$ %. Ця розбіжність пояснюється різними режимами роботи циліндра Венельта та лінз ДПЕ-системи під час отримання знімків від поверхні MgO та Fe. Крім того, картини дифракції повільних електронів для плівок Fe фіксувалися при товщині плівки $d \cong 30$ нм, а в такому разі виникають дислокації невідповідності, і шар Fe може бути вже не псевдоморфним.

У цьому підрозділі подані результати мікроскопічних досліджень плівок Ag(Au) із покриттями ($d \leq 3$ нм) Cr, Co та Cu. Встановлені залежності параметра ґратки та середнього розміру зерен (L) від товщини для плівки Ag. Значення $L_{\text{Ag}} = 40$ нм, яке було отримане на основі експериментальних даних, у подальшому використовувалося для розрахунків параметрів електроперенесення плівок Ag із тонкими покриттями. Точковий елементний аналіз дозволив установити, що концентрація матеріалу покриття (зокрема Cr) по межах зерен (МЗ) Ag на 67 % більша, ніж на поверхні зерен, що підтверджує протікання інтенсивної зерномежової дифузії.

Подані також результати досліджень структурно-фазового стану чотирьох типів спін-вентильних структур: Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/П (I), Au(3)/Co(20)/Au(6)/Fe(3)/П (II), Au(3)/Co(3)/Au(6)/Fe(20)/П (III) та Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/П (IV).

Мікроскопічні дослідження показали, що свіжосконденсовані структури зберігали індивідуальність окремих шарів (табл. 2).

Таблиця 2

Фазовий склад спін-вентильних структур

T_6 , К	300	450	600	750
Система				
II	Au ОЦК-Fe ГЦП-Co	Au ОЦК-Fe ГЦП-Co	т. р. (Au,Fe(Co)) ОЦК-Fe ГЦП-Co (сліди)	т. р. (Au,Fe(Co)) ОЦК-Fe
III	Au ОЦК-Fe ГЦП-Co	Au ОЦК-Fe ГЦП-Co	т. р. (Au,Co(Fe)) ОЦК-Fe (сліди) ГЦП-Co	т. р. (Au,Co(Fe)) ОЦК-Fe (сліди) ГЦП-Co
IV	Au ГЦП-Co ОЦК-Fe	Au ГЦП-Co ОЦК-Fe	Au т. р. (Au,Co(Fe)) ГЦП-Co	т. р. (Au,Co(Fe)) ГЦП-Co ГЦК-Co

При відпалюванні до 600 К частково відбувалися перехід α -Co \rightarrow β -Co та термічна дифузія атомів Co у шар Au, що спричиняло утворення т. р. (Au,Co) на основі ГЦК-Au. У системах, що мали відносно товстий шар Fe ($d = 20$ нм), спостерігалось утворення т. р. (Au,Fe).

У другому підрозділі наведені результати досліджень морфології поверхні пліткових систем Co/Fe/П (П – MgO або SiO₂/Si) та спін-вентильних структур на основі Fe, Co та Au методом АСМ. Установлено, що шорсткість для системи, яка вирощена орієнтовно, приблизно у чотири рази менша, ніж для системи на аморфній підкладці. Це підтверджують результати розрахунків середньоквадратичного відхилення нерівностей σ_{rms} . Для Au(2)/Co(30)/Fe(30)/(100)MgO $\sigma_{\text{rms}} \cong 1,4$ нм, а для Au(2)/Co(30)/Fe(30)/SiO₂/Si – 4,6 нм. При відпалюванні плівок до 570 К шорсткість плівки на SiO₂/Si знизилася до 1,2 нм, що пов'язано із поверхневою дифузією атомів.

Дослідження спін-вентильних структур методом АСМ показало, що збільшення розміру кристалітів відбувається лише в інтервалі $T_6 = 570 - 750$ К, тобто після поліморфного переходу ГЦП \rightarrow ГЦК-Co.

Крім того, було встановлено, що свіжосконденсовані зразки із тонким ($d = 3$ нм) та відносно товстим ($d = 20$ нм) верхніми шарами Co або Fe мають однакову шорсткість: $\sigma_{\text{rms}} \cong 2,4$ нм та $\sigma_{\text{rms}} \cong 3,0$ нм відповідно.

У третьому підрозділі подані результати дослідження дифузійних процесів у системі Au/Co(30)/Fe(30)/П під час використання підкладками SiO₂/Si та монокристала MgO. Розрахунки коефіцієнтів КСД та ТД проводилися на основі концентраційних профілів (рис. 2). Установлено, що в обох системах (на аморфній підкладці і на монокристалі) дифузія верхнього шару (Co) в нижній (Fe) протікає інтенсивніше, ніж у зворотному напрямку. Так, для П – (100)MgO: $D_{\text{K}}(\text{Co} \rightarrow \text{Fe}) \cong 33,8 \cdot 10^{-19}$ м²/с, а $D_{\text{K}}(\text{Fe} \rightarrow \text{Co}) \cong 21,3 \cdot 10^{-19}$ м²/с. При використанні аморфної підкладки $D_{\text{K}}(\text{Co} \rightarrow \text{Fe}) \cong 41,7 \cdot 10^{-19}$ м²/с та

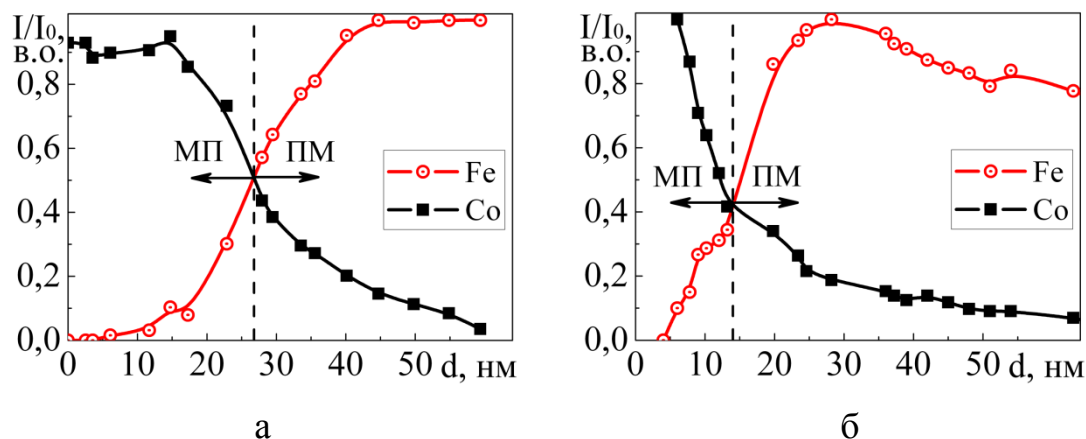


Рис. 2. Дифузійні профілі для систем $Au(2)/Co(30)/Fe(30)/(100)MgO$ (а) та $Au(2)/Co(30)/Fe(30)/SiO_2/Si$ (б) у невідпаленому стані. МП – межа поділу шарів, ПМ – площина Матано

$D_K(Fe \rightarrow Co) \cong 27,0 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$. Інтенсивність КСД для системи, що вирощена орієнтовно, в обох напрямках нижча порівняно із системою на аморфній підкладці (рис. 2 б). Під час відпалювання, коефіцієнт дифузії в обох системах зменшується на два порядки, що свідчить про початок дифузії в об'ємі зерен.

Для визначення коефіцієнтів КСД та ТД для двошарових плівкових систем на основі Fe та Cr використовувались оже-спектри, що були отримані під час конденсації, при кожному збільшенні товщини верхнього шару на 0,5 – 1 нм та під час відпалювання систем в інтервалі температур (300 – 680) К (рис. 3). Розрахунки методом Уїпла (2) дозволили оцінити інтенсивність КСД в обох напрямках протікання: $D_K(Fe \rightarrow Cr) \cong 0,6 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$ та $D_K(Cr \rightarrow Fe) \cong 0,2 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$. Коефіцієнт ТД при $T_g = 673 \text{ К}$ на два порядки менший за коефіцієнт КСД: $3,2 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2/\text{с}$ для системи Fe(5)/Cr(15)/П. Інтенсивні дифузійні процеси у системах на основі Fe та Cr можуть спричинити утворення т. р. (Fe,Cr) уже на стадії конденсації. Тому для забезпечення стабільності структури спін-вентилів як матеріали магнітних шарів використовувалися Fe та Co.

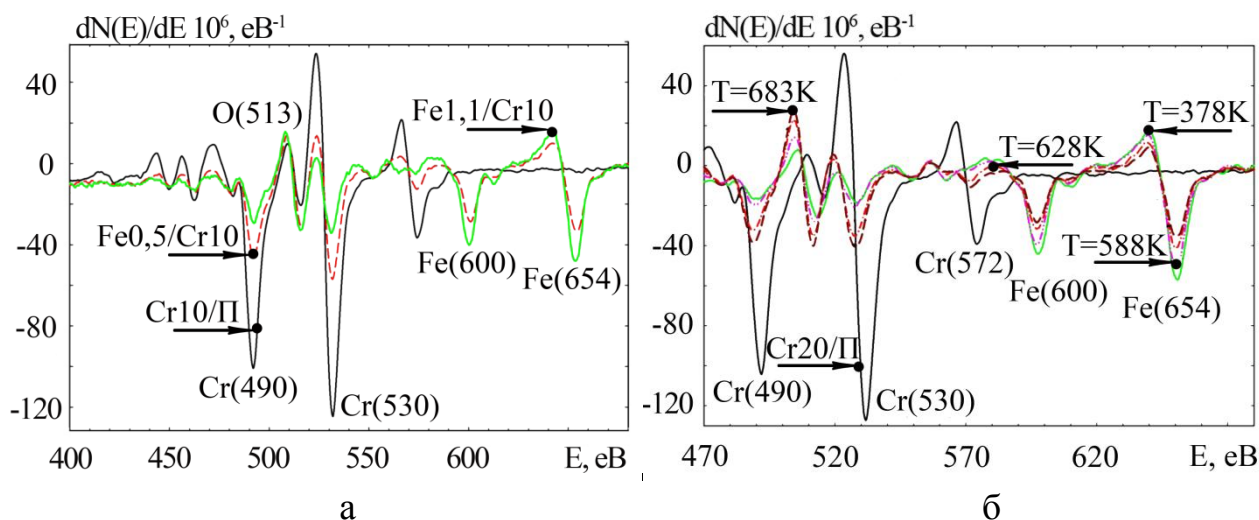


Рис. 3. Оже-спектри систем $Fe(1)/Cr(10)/P$ (а) та $Fe(1)/Cr(20)/P$ (б)

Третій підрозділ присвячений еліпсометричним дослідженням плівкової системи Au/Co/Fe/П та спін-вентильних структур на основі Fe, Co та Au (I – IV). Установлено, що спін-вентильні структури до відпалювання зберігають індивідуальність усіх своїх шарів, а після відпалювання до 600 К утворюються т. р., що повністю підтверджує результати мікроскопічних досліджень. Крім того, експериментальні значення головного азимута (Ψ) та різниці фаз (Δ) еліпса поляризації дозволили визначити оптичні показники матеріалів: n – це коефіцієнт заломлення та k – коефіцієнт загасання хвилі для шарів Fe, Co та Au та проміжних шарів – т. р. на їх основі, що виникають при відпалюванні систем.

Розрахунок оберненої задачі еліпсометрії показав відмінність табличних даних для масивних матеріалів (n_0, k_0) та показників для тонких плівок (табл. 3).

Крім того, встановлено, що оптичні показники твердих розчинів (Au,Co) та (Au,Fe) суттєво відрізняються від n та k чистих матеріалів. Проведені також дослідження впливу концентрації компонент та температури відпалювання на

Таблиця 3
Табличні та розраховані значення
 n і k

Матеріал	n_0	n	k_0	k
Au	0,25	0,24	2,99	2,97
Co	1,86	2,01	4,02	4,12
Fe	2,21	1,99	3,07	3,17

коефіцієнти заломлення та загасання хвилі шарів твердих розчинів. Встановлено, що із збільшенням температури відпалювання для т. р. із певним відношенням концентрацій коефіцієнт n у проміжному шарі (Au,Co) зростає, а k – зменшується.

Зміни оптичних показників відбуваються немонотонно. В інтервалі температур $T_e = 570 - 770$ К спостерігається різке зниження n і k , що пояснюється поліморфним переходом Co до високотемпературної фази. Також встановлено, що збільшення концентрації Co у т. р. (Au,Co) призводить до зменшення коефіцієнта заломлення та до зростання коефіцієнта загасання хвилі, що пояснюється збільшенням розмірів кристалітів Co. Розв'язання оберненої задачі еліпсометрії для т. р. (Au,Fe) дозволило виявити подібну до т. р. (Au,Co) залежність оптичних показників від температури відпалювання. Зі збільшенням концентрації Co (c_{Co}) у проміжному шарі відбуваються зростання n та зниження k . Це пояснюється тим, що при температурах відпалювання до 770 К лише невелика частина Fe має ГЦК-гратку (γ -Fe), оскільки поліморфний перехід α -Fe \rightarrow γ -Fe відбувається при $T_e = 1170$ К. Тому збільшення загальної концентрації c_{Co} (зменшення c_{Fe}) призведе до утворення меншої кількості т. р. (Fe,Co) і відповідно до зменшення коефіцієнта загасання хвилі.

Четвертий розділ «Магніторезистивні та магнітооптичні властивості плівкових систем Fe/Co і Fe/Cr» складається із чотирьох підрозділів.

У першому та другому підрозділах наведені результати досліджень магнітооптичних властивостей двошарових плівок на основі Fe, Co та Cr. Встановлено, що значення B_C для системи Cr(2)/Fe(25)/П суттєво відрізняються

при різних температурах підкладки (T_n) під час конденсації шару Fe. Це пояснюється різною структурою плівок, що отримуються. Так, при $T_n = 300$ К B_C буде майже у 2 рази більшою, ніж при $T_n = 450$ К: 15 та 7 мТл відповідно.

Дослідження магнітооптичних властивостей двошарових плівок на основі Cr та Fe дозволили встановити, що системи, в яких загальна концентрація Cr $c_{Cr} = 5 - 20$ ат. %, проявляють найменші значення B_C (8 – 12 мТл) та найбільший рівень МОКЕ-сигналу у поздовжній та перпендикулярній геометріях вимірювання. При збільшенні c_{Cr} , зростає значення B_C у поздовжній геометрії вимірювання (до $B_C = 20,5$ мТл при $c_{Cr} = 94$ ат. %) та знижується рівень МОКЕ-сигналу у перпендикулярній геометрії. Для двошарових систем на основі Fe та Co також характерна залежність величини та термічної стабільності магнітних параметрів від концентрації компонент. Так, при $c_{Co} = 22$ ат. % значення індукції розмагнічування для всієї системи $B_C = 13$ мТл, а при $c_{Co} = 50$ ат. % – $B_C = 8$ мТл.

Встановлено, що системи із загальною концентрацією c_{Co} до 22 ат. % проявляють найбільш термічно стабільні магнітні властивості в обох геометріях вимірювання МОКЕ.

У *третьому підрозділі* дослідження впливу матеріалу підкладки на магнітні властивості плівкової системи Au(2)/Co(30)/Fe(30)/П показали, що система, яка вирощувалась епітаксіально на монокристалі (100)MgO, проявляє чітку анізотропію при повороті зразка в його площині на $\alpha = 45^\circ$, а саме: B_C зростає у 2 рази (рис. 4). Ці дані підтверджувалися результатами МОКЕ-мікроскопії.

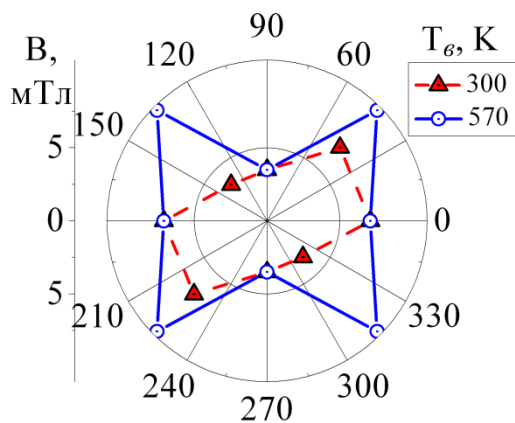


Рис.4. Залежність $B_C(\alpha)$ у полярних координатах для системи на монокристалі (100)MgO

Крім того, вона проявляє анізотропію МО при різних кутах повороту зразка (φ) щодо силових ліній магнітного поля (рис. 5). Подібний ефект спостерігається під час переходу як від перпендикулярної до поздовжньої, так і до поперечної геометрії вимірювання МО. Система Au/Co(30)/Fe(30)/SiO₂/Si має незмінні залежності МО в усіх геометріях вимірювання. У системі на аморфній підкладці під час конденсації протікають дифузійні процеси, що спричиняє менші значення МО порівняно із системою на монокристалі (100)MgO у поперечній і поздовжній геометріях вимірювання: 0,3 і 0,4 % та 0,4 і 0,7 % відповідно. При відпалюванні системи Au(2)/Co(30)/Fe(30)/SiO₂/Si значення B_C спочатку знижується, що пов'язано із заліковуванням дефектів у матеріалах, а після $T_e = 770$ К стрімко зростає через збільшення середнього розміру кристалітів Co.

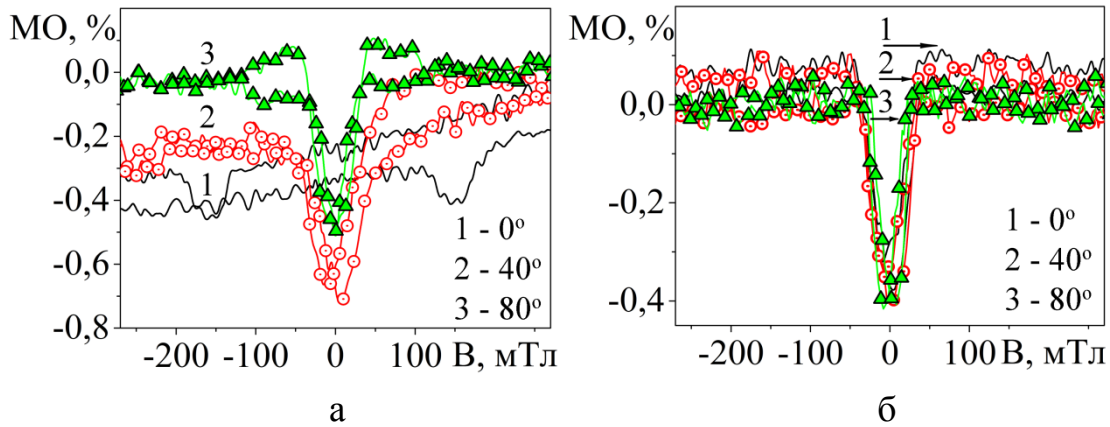


Рис. 5. Залежності $MO(\varphi)$ для систем $Au/Co(30)/Fe(30)/(100)MgO$ (а) $Au/Co(30)/Fe(30)/SiO_2/Si$ (б) при переході від перпендикулярної до поздовжньої геометрії вимірювання ($\varphi = 0^\circ - 80^\circ$)

У четвертому підрозділі наведені результати досліджень магніторезистивних і магнітооптичних властивостей спін-вентильних структур в умовах фазоутворення. Встановлено, що для систем, які мають відносно товстий ($d \cong 20$ нм) шар Co (спін-вентилі III та IV типів), при відпалюванні до 600 К змінюється характер залежності $B_C(\alpha)$, що непрямо свідчить про фазоутворення (рис. 6).

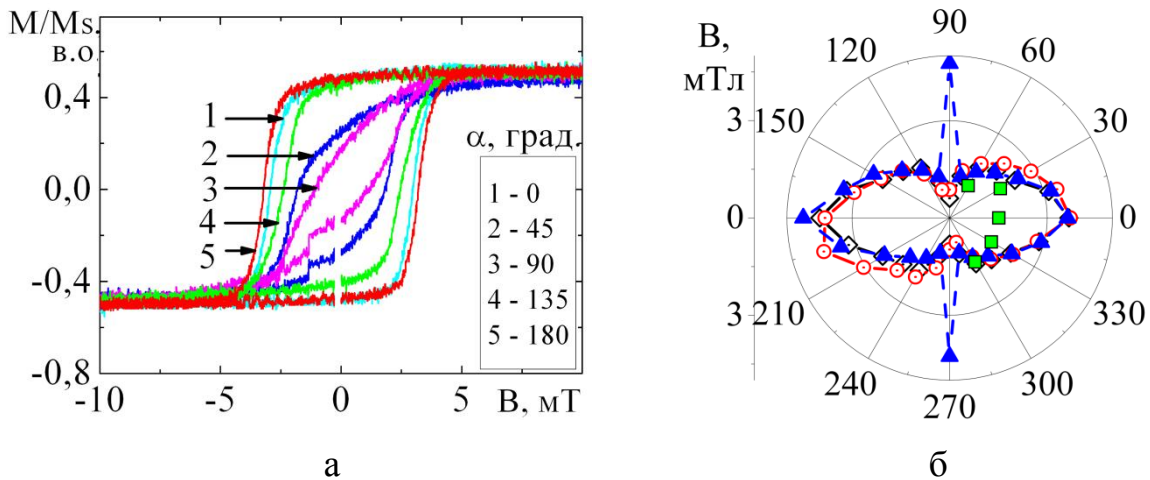


Рис.6. Крива намагнічування до відпалювання (а) та залежність $B_C(\alpha)$ при різних температурах відпалювання (б) для спін-вентилі III типу. Позначення: $\blacklozenge - T_g \cong 300$ К; $\circ - T_g \cong 450$ К; $\blacktriangle - T_g \cong 600$ К; $\blacksquare - T_g \cong 750$ К

Магніторезистивні дослідження дозволили визначити, що лише спін-вентиль II типу – $Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/\Pi$ – проявляє ізотропність MO в усіх трьох геометріях вимірювання, має максимальне за величиною та термостабільне значення поля насичення (рис. 7).

Спін-вентильна структура III типу – $Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/\Pi$ – має максимальні та найбільш термо-стабільні значення MO , але для неї характерні зміни типу непрямої обмінної взаємодії магнітних шарів. Вони пояснюються появою т. р. (Au,Co) , що призводить до зменшення товщини суцільного немагніт-

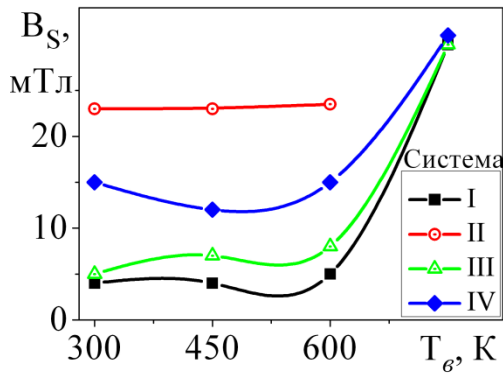
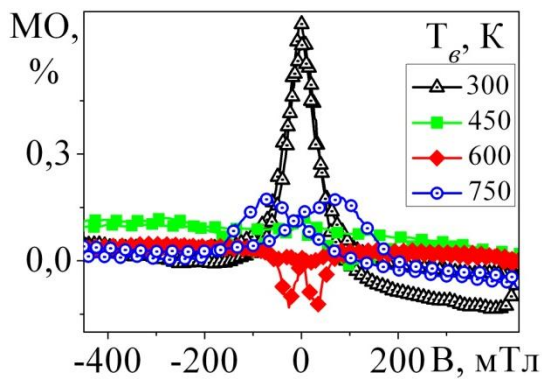
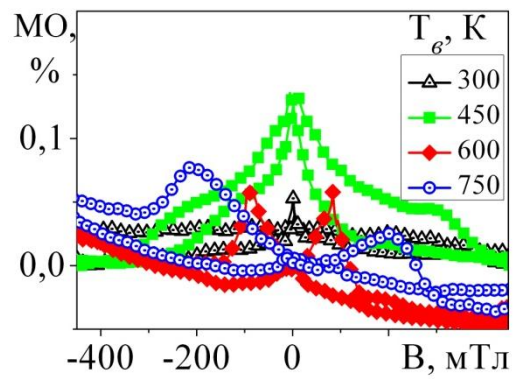


Рис.7. Залежності V_S від T_a для спін-вентилів I, II, III та IV типів



а



б

Рис.8. Залежності $MO(V)$, що визначені у перпендикулярній геометрії вимірювання при різних температурах відпалювання для $Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/Pt$ (а) та $Au(3)/Co(3)/Au(6)/Fe(20)/Pt$ (б)

Структури, які не мають відносно товстого шару Со, не зазнають змін у обмінному зв'язку між магнітними шарами (рис. 8 б).

Розрахунки чутливості спін-вентилів S (у $\% \backslash \text{Тл}$) до змін магнітного поля при різних температурах відпалювання та геометріях вимірювання показали, що найбільші значення S має структура III типу – $Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/Pt$.

Значення чутливості з підвищенням температури знижується для всіх структур. Для структури III типу при $T_a = 300$ та 750 К вони дорівнюють $5,02$ та $0,48$ $\% \backslash \text{Тл}$ відповідно.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведені комплексні дослідження взаємозв'язку між дифузійними процесами, структурно-фазовим станом та магніто-резистивними і магнітооптичними властивостями двошарових плівкових систем Fe/Co, Fe/Cr та спін-вентильних структур на основі Fe, Co та Au, які можуть бути використані як чутливі елементи датчиків магнітного поля та головок зчитування інформації.

ного прошарку і відповідно до зміни інтерференції електронних хвиль, відбитих від меж інтерфейсів. Це викликає зміни непрямого обмінного зв'язку між феромагнітними шарами. Отже, при відпалюванні відбуваються переходи від антиферомагнітної до феро-магнітної взаємодії магнітних шарів (рис. 8 а).

1. Здійснені апробація та порівняльний аналіз відомих теоретичних моделей для розрахунку коефіцієнтів дифузії (КСД та ТД). Встановлено, що найбільш точними є моделі, які враховують товщину шару матеріалу, що дифундує, та середній розмір кристалітів, тобто методи Уїпла та функції помилок Гауса.

На основі експериментальних даних ОЕС проведена оцінка коефіцієнтів дифузії у нанорозмірних плівкових системах Fe/Cr. Встановлені значення коефіцієнтів КСД в обох напрямках її протікання $D_{\text{к}}(\text{Fe} \rightarrow \text{Cr}) \cong 0,6 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$ та $D_{\text{к}}(\text{Cr} \rightarrow \text{Fe}) \cong 0,2 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$. Коефіцієнт ТД для системи Fe/Cr/П при $T_{\text{с}} = 673 \text{ К}$ на два порядки менший за коефіцієнт КСД ($3,2 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2/\text{с}$).

2. Дослідження структурно-фазового стану чотирьох типів спін-вентилів на основі Fe, Co та Au показало, що у свіжосконденсованих плівкових структурах зберігається індивідуальність окремих шарів. Після відпалювання до 600 – 750 К у всіх спін-вентильних структурах утворюються т. р. (Au,Fe) та (Au,Co).

3. Дослідження фазового складу двошарових плівкових систем на основі Fe, Co та Cr дозволили встановити оптимальні співвідношення загальних концентрацій елементів, які забезпечують високі за величиною та термостабільні магнітні властивості системи в цілому. Плівки на основі Fe і Cr, в яких концентрація Cr $c_{\text{Cr}} = 5 - 20 \text{ ат. \%}$, мають найменші значення індукції розмагнічування ($B_{\text{с}} = 8 - 12 \text{ мТл}$) та найбільший рівень МОКЕ-сигналу в поздовжній та перпендикулярній геометріях вимірювання. При збільшенні c_{Cr} зростає значення $B_{\text{с}}$ у поздовжній геометрії вимірювання ($B_{\text{с}} = 20,5 \text{ мТл}$ при $c_{\text{Cr}} = 94 \text{ ат. \%}$) та знижується рівень МОКЕ-сигналу у перпендикулярній геометрії. Для двошарових систем на основі Fe та Co також характерна залежність величини та термічної стабільності магнітних параметрів від концентрації компонент. Так, при $c_{\text{Co}} = 22 \text{ ат. \%}$ значення індукції розмагнічування для всієї системи $B_{\text{с}} = 13 \text{ мТл}$, а при $c_{\text{Co}} = 50 \text{ ат. \%}$ – $B_{\text{с}} = 8 \text{ мТл}$. Крім того, встановлено, що при концентрації c_{Co} до 22 ат. % вони проявляють найбільш термічно стабільні магнітооптичні властивості в обох геометріях вимірювання МОКЕ.

4. Дослідження магніторезистивних і магнітооптичних властивостей двошарової системи Co(30)/Fe(30)/П при використанні різних матеріалів підкладки виявили, що при орієнтовному вирощуванні плівки на монокристалі (100)MgO система проявляє суттєву анізотропію МО та індукції розмагнічування ($B_{\text{с}}$ збільшується у два рази при повороті зразка на 45°). Встановлено, що у поперечній та поздовжній геометріях вимірювання МО більший, ніж для системи, яка конденсувалася на аморфну підкладку SiO₂/Si, що пояснюється меншою інтенсивністю протікання дифузійних процесів під час конденсації.

5. Дослідження МО показали, що всі спін-вентильні структури, окрім Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/П, проявляють анізотропію, зокрема МО має різний

знак у поздовжній та поперечній геометріях вимірювання. Уперше встановлено, що в тих спін-вентиліях, які мають відносно товстий ($d = 20$ нм) шар Co, двічі спостерігається зміна знака МО у перпендикулярній геометрії вимірювання при збільшенні T_g . Це пояснюється утворенням т. р. (Au,Co), що призводить до зміни товщини «суцільного» немагнітного прошарку Au. Спін-вентиль Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/П проявляє ізотропність МО у всіх трьох геометріях вимірювання. Крім того, має максимальне та термостабільне значення B_S . Спін-вентиль Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/П проявляє максимальні за величиною та найбільш термостабільні значення МО, але для нього характерні зміни типу непрямої обмінної взаємодії магнітних шарів при відпалюванні.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. **Федченко О. В.** Вплив матеріалу підкладки на магніторезистивні та магнітооптичні властивості плівкової системи Co/Fe / О. В. Федченко, А. І. Салтикова, С. І. Проценко // Ж. нано-електрон. физ. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 03016-1–03016-6.

2. Determination of diffusion coefficients in film systems on the basis of Fe/Cr and Cu/Cr / **О. Fedchenko**, S. Protsenko, P. Zukowski, M. Marszalek // Vacuum. – 2012. – V. 86, № 12. – P. 1934–1938.

3. Программно-аппаратный комплекс исследований оптических свойств тонких пленок / М. Г. Демиденко, С. И. Проценко, К. В. Тищенко, **О. В. Федченко** // Ж. нано-електрон. физ. – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 02038-1–02038-6.

4. Проценко С. І. Дифузійні процеси в нанорозмірних плівкових системах Fe(1нм)/Cr/П та Cr(1нм)/Fe/П / С. І. Проценко, **О. В. Федченко**, М. Маршалек // Металлофиз. новейш. технол. – 2011. – № 7. – С. 945–950.

5. Використання генетичного алгоритму для розв'язку оберненої задачі еліпсометрії / М. Г. Демиденко, С. І. Проценко, О. Б. Проценко, **О. В. Федченко** // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2008. – № 1. – С. 33–42.

2. Наукові праці апробаційного характеру

6. **Федченко Е. В.** Использование генетического алгоритма для обработки экспериментальных данных / Е. В. Федченко, С. И. Проценко // Матеріали Міжнар. конф. [“Моделювання та інформаційні технології”], (Київ, 12–14 травня 2010 р.) / Київ, 2010. – Т. 3. – С. 258–265.

7. Magneto-optical Properties Of Spin-Valve Systems On the Basis Of Au/Fe/Au/Co/Si / **О. Fedchenko**, M. Demydenko, S. Protsenko, J. Partyka]// Proc. of 2nd Int. Conf. [“Nanomaterials: Applications and Properties”], (Alushta, 17–22 September 2012) / Суми, 2012. – V. 1, № 3. – P. 03TF22(4).

8. Protsenko S Strain resistive properties of films On the basis of copper and cobalt in wide deformation range / S. Protsenko, **O. Fedchenko** // Proc. of 1st Int. Conf. ["Nanomaterials: Applications and Properties"], (Alushta, 27–30 September 2011) / Суми, 2011. –V. 2, № 1. – P. 234–237.

9. Маршалек М. Особенности конденсационно-стимулированной и термической диффузии в наноразмерных пленочных системах Fe(1нм)/Cr(20нм) Cr(1нм)/Fe(20нм) / М. Маршалек, С. И. Проценко, **Е. В. Федченко** // Матеріали 4-ї Міжнар. конф. ["Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур"], (Харків, 6–8 жовтня, 2010 р.) / Харків, 2010. – Т. 1. – С. 53–55.

10. **Федченко Е. В.** Применение LabVIEW для обработки экспериментальных данных оже-спектроскопии / Е. В. Федченко, С. И. Проценко // Сборник трудов Девятой междунар. научно-практической конф. ["Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments"], (Москва, 3–4 декабря, 2010 г.) / Москва, 2010. – С. 402–404.

11. **Проценко С. И.** Использование генетических алгоритмов при разработке кластерного программного обеспечения для определения параметров многослойных пленочных структур на основе экспериментальных данных XRR и эллипсометрии / С. И. Проценко, К. В. Тищенко, **Е. В. Федченко** // Сборник трудов Восьмой междунар. научно-практической конф. ["Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments"], (Москва, 20–21 ноября, 2009 г.) / Москва, 2009. – С. 118–120.

12. **Protsenko S.** Thermal Stability of the Magnetical Properties of Film Systems Based on Fe, Co and Cr/ S. Protsenko, O. Fedchenko // Proc. of 9th International Conference ["New Electrical and Elecronic Technologies and their Industrial Implementation"], (Zakopane, Poland, 18–21 June, 2013) / Zakopane, 2013. –V.1 – P. 120.

13. **Федченко Е. В.** Магниторезистивные и магнетооптические характеристики наноразмерных систем на основе Fe и Co / Е. В. Федченко, М. Г. Демиденко, С. И. Проценко // Матеріали 22-й Міждунар. конф. ["СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"], (Севастополь, 10–14 сентября 2012 г.) / Севастополь, 2012. – Т. 2. – С. 699–700.

14. **Fedchenko O.** Phase-structural and magneto-optical properties of spin-valve systems on the basis of Sub/Fe/Au/Co/Au and Sub/Co/Au/Fe/Au / O. Fedchenko, M. Demydenko, S. Protsenko // Proc. of IX-th Int. conf. ["Ion implantation and other applications of ions and electrons"], (Kazimierz Dolny, 25–28 June, 2012) / Kazimierz Dolny, 2012. – P. 62.

15. **Федченко О. В.** Дослідження магнітооптичних властивостей плівкових систем на основі Fe та Co / О. В. Федченко, С. І. Проценко // Матеріали конференції ["ФЕЕ-2012"], (Суми, 16–21 квітня, 2012 р.) / Суми, 2012. – С. 108.

16. **Fedchenko O. V.** Influence of thin copper coating on electrophysical properties of silver films / O. V. Fedchenko, S. I. Protsenko // Proc. of 7th Int. Conf. [“NEET-2011”], (Zakopane, June 28 – July 1, 2011) / Zakopane, 2011. – P. 194.

3. Праці, які додатково відображають наукові результати

17. Computation of diffusion processes in nanoscale thin films system based on Fe and Cr / **O. Fedchenko**, S. Protsenko, M. Marszalek, P. Zukowski // Proc. of VIIIth International conference [“Ion implantation and other applications of ions and electrons”], (Kazimierz Dolny, 14–17 June, 2010) / Kazimierz Dolny, 2010. – P. 99.

18. **Федченко О. В.** Розроблення програмного забезпечення для розрахунку коефіцієнтів дифузії за експериментальними даними оже-спектроскопії / О. В. Федченко, С. І. Проценко // Матеріали конференції [“ФЕЕ-2010”], (Суми, 19–23 квітня, 2010 р.) / Суми, 2010. – С. 90–91.

19. **Protsenko S.** Peculiarities of condensation stimulated and thermal diffusion in nano-scale film systems Fe/Cr and Cr/Fe / S. Protsenko, **O. Fedchenko**, M. Marszalek // Proc. of 3rd Int. Conf. [“Radiation Interaction With Material And Its Use In Technologies”], (Kaunas, 20-23 September, 2010) / Kaunas, 2010. – P. 263–265.

20. **Федченко О. В.** Тензорезистивні властивості плівок Ag з тонким покриттям Cu / О. В. Федченко, С. І. Проценко // Матеріали конференції [“ФЕЕ-2011”], (Суми, 18–22 квітня, 2011 р.) / Суми, 2011. – С. 94.

АНОТАЦІЯ

Федченко О. В. Структурно-фазовий стан і магнітооптичні властивості плівкових систем на основі Fe, Co, Cr та благородних металів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2013.

Дисертацію присвячено комплексному дослідженню структурно-фазового стану, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей плівкових систем та спін-вентильних структур на основі Fe, Co, Cr та Ag або Au. У роботі визначені оптимальні умови формування плівкових систем та досліджені процеси фазоутворення в них при відпалюванні.

Визначені оптимальні загальні концентрації компонент у двошарових системах Fe/Cr (c_{Cr} = до 20 ат. %) та Fe/Co (c_{Co} = до 22 ат. %), які забезпечують термічно стабільні, ізотропні та максимальні за величиною магнітні характеристики.

Проведені розрахунки коефіцієнтів дифузії для системи Fe/Cr за відомими теоретичними моделями. Визначені найбільш ефективні з них, а саме уточнений метод Уїпла та метод функцій помилок Гауса, які враховують

середній розмір зерен та товщину шару матеріалу, що дифундує.

Установлена залежність структурного стану та магнітних властивостей двошарових плівок Co/Fe/P від матеріалу підкладки та умов конденсації.

Установлена кореляція між структурно-фазовим станом, магніто-резистивними і магнітооптичними властивостями спін-вентильних структур на основі Fe, Co та Au. Запропоновані конфігурації спін-вентилів, які забезпечують найбільш високі за величиною та термічно стабільні магнітні характеристики.

Ключові слова: коефіцієнт дифузії, твердий розчин, спін-вентильні структури, двошарові системи, магнітоопір, магнітооптичний ефект Керра.

АННОТАЦИЯ

Федченко Е. В. Структурно-фазовое состояние и магнитооптические свойства пленочных систем на основе Fe, Co, Cr и благородных металлов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2013.

Диссертация посвящена комплексному исследованию структурно-фазового состояния, магниторезистивных и магнитооптических свойств двухслойных пленочных систем и спин-вентильных структур на основе Fe, Co, Cr и Ag или Au. В работе определены оптимальные условия формирования пленочных систем, которые обеспечивают невысокую дефектность и целостность пленок. Кроме того, исследованы процессы фазообразования в системах при термоотжиге.

Определены оптимальные общие концентрации компонент в двухслойных системах Fe/Cr и Fe/Co, которые обеспечивают термически стабильные, изотропные и максимальные по величине магнитные характеристики (магнитосопротивление – MC , индукцию перемагничивания – B_C , индукцию насыщения – B_S). Так, двухслойные пленки на основе Cr и Fe при общей концентрации $c_{Cr} = 5 - 20$ ат. % проявляют наименьшие значения B_C (8 – 12 мТл) и наибольший уровень МОКЕ-сигнала в перпендикулярной и продольной геометриях измерения. Увеличение общей концентрации атомов Cr приводит к росту значений B_C в продольной геометрии измерения (до $B_C = 20,5$ мТл при $c_{Cr} = 94$ ат. %) и снижению уровня МОКЕ-сигнала в перпендикулярной геометрии. Для двухслойных пленочных систем на основе Fe и Co также характерна зависимость величины и термической стабильности магнитных параметров от концентрации компонент. Так, при $c_{Co} = 22$ ат. % значения индукции размагничивания для всей системы $B_C = 13$ мТл, а при $c_{Co} = 50$ ат. % – $B_C = 8$ мТл. Системы с общей концентрацией атомов Co

до 22 ат. % проявляют наиболее термически стабильные магнитные свойства во всех геометриях измерения МОКЕ.

Проведены расчеты коэффициентов диффузии для системы Fe/Cr по известным теоретическим моделям. Сделаны выводы об эффективности методов Уиппла и функций ошибок Гаусса, которые учитывают средний размер зерна и толщину слоя диффузанта.

Исследования двухслойных пленочных систем Co/Fe/П, выращенных на аморфных подложках и на монокристалле (100)MgO, позволили установить зависимость структурного состояния, магниторезистивных и магнитооптических свойств образцов от материала подложки и условий конденсации. Установлено, что при ориентированном росте на монокристалле система проявляет существенную анизотропию M_C и V_C . Так, при повороте образца в его плоскости на угол $\alpha = 45^\circ$ значение V_C увеличивается в два раза. Кроме того, образец на подложке (100)MgO имеет большие по величине значения M_C во всех геометриях измерения. Установлено, что интенсивность протекания конденсационно-стимулированной диффузии для системы, которая выращена ориентировочно, ниже по сравнению с системой на аморфной подложке.

Установлена корреляция между структурно-фазовым состоянием и магнитными свойствами четырех типов спин-вентильных структур на основе Fe, Co и Au. Определено, что для структур, которые имеют относительно толстый ($d = 20$ нм) слой Co (структуры III и IV типов), при отжиге до температур $T_0 > 600$ К изменяется характер зависимости $V_C(\alpha)$, что косвенно свидетельствует о фазообразовании. Установлено, что спин-вентильная структура II типа – Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/П – проявляет изотропность M_C во всех трех геометриях измерения и имеет максимальные по величине термостабильные значения M_C . Структура III типа имеет максимальные и наиболее термостабильные значения M_C , однако для нее характерны изменения типа непрямого обменного взаимодействия магнитных слоев, что объясняется появлением т. р. (Au,Co) при отжиге. Структуры, которые не имеют относительно толстого слоя Co, не проявляют изменений обменной связи между магнитными слоями. На основе полученных результатов в зависимости от области практического применения предложены конфигурации спин-вентилей, которые обеспечивают наиболее термически стабильные магнитные характеристики.

Проведены эллипсометрические исследования спин-вентильных структур, которые полностью подтвердили результаты, полученные с помощью просвечивающей микроскопии относительно структурно-фазового состава образцов. Также позволили определить оптические показатели (n , k) для тонких пленок, которые отличаются от табличных данных для массивных образцов.

Кроме того, проведены модельные исследования, позволяющие

определить изменения параметров электропереноса пленок Au (Ag), которые выступают в качестве немагнитных прослоек спин-вентилей, при конденсации верхнего слоя Co, Cr и Cu.

Ключевые слова: коэффициент диффузии, твердый раствор, спин-вентильные структуры, двухслойные системы, магнитосопротивление, магнитооптический эффект Керра.

ABSTRACT

Fedchenko O. V. Phase structural state and magneto-optical properties film systems on the basis of Fe, Co, Cr and noble metals. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D.) in Physics and Mathematics on speciality 01.04.07 – Solid-State Physics. – Sumy State University, Sumy, 2013.

The thesis is devoted to comprehensive investigation of phase structural state, magneto-optical and magneto-resistive properties of film systems and spin-valve structures on the basis of Fe, Co, Cr, and Ag or Au. This paper contains the study of optimal conditions for formation of the film systems that provide the least imperfection of the samples. Phase formation processes in such systems during annealing were investigated.

Optimal general concentration of the components in Fe/Cr (c_{Cr} up to 20 at. %) and Fe/Co (c_{Co} up to 22 at. %) bi-layer systems that provide thermally stable, isotropic and the greatest value of magnetic characteristic (magneto resistance – MR, demagnetization induction – B_c , saturation induction – B_s).

The computation of diffusion coefficients for Fe/Cr system was carried out with the help of widely used models. Optimal ones were determined: Weeple's model and Gauss error function, taking into account the grain dimensions and the thickness of diffusant material.

The investigation of Au/Co/Fe/Sub film systems showed the dependency of their structural state, magneto-optical and magneto-resistive properties on substrate material and condensation conditions.

The correlation between phase structural state and magneto-optical and magneto-resistive properties of spin-valve structures on the basis of Fe, Co and Au was found.

Key words: diffusion coefficients, solid solution, spin-valve structures, bi-layer film systems, magnetoresistance, magneto-optical Kerr effect.

Підписано до друку 23.10.2013.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3062 від 17.12.2007.