

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Коломієць Володимир Миколайович**



УДК 539.216:544.003.26

**СТРУКТУРА, ЕЛЕКТРО- ТА МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ  
БАГАТОШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ  
ФЕРОМАГНІТНИХ МЕТАЛІВ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному педагогічному університеті імені А. С. Макаренка Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук, професор  
**Лобода Валерій Борисович**,  
Сумський педагогічний університет імені А. С. Макаренка,  
професор кафедри фізики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, доцент  
**Семенько Михайло Петрович**,  
Київський національний університет імені Тараса  
Шевченка, професор кафедри фізики металів;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Проценко Сергій Іванович**,  
Сумський державний університет,  
декан факультету електроніки та інформаційних  
технологій.

Захист відбудеться «17» жовтня 2014 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету.

Автореферат розісланий «9» вересня 2014 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради



І. В. Чешко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сьогодні вивчення фізичних властивостей нанорозмірних систем є одним із перспективних напрямів сучасної фізики твердого тіла. Він включає в себе дослідження одношарових тонких плівок, різних мультишарових і гранульованих структур, спін-вентилів та має важливе значення для їх практичного використання. Зокрема, такі структури широко використовуються в різноманітних пристроях мікро- і наноелектроніки як чутливі елементи сенсорів у магнітних вимірюваннях, у пристроях для зберігання інформації (магнітна пам'ять) тощо.

Слід зазначити, що актуальність таких досліджень обумовлена також бурхливим розвитком нової галузі твердотільної електроніки – спінтроніки, основна ідея якої полягає в практичному використанні не тільки заряду електрона, а й його спіну. Наявність такого додаткового «ступеня вільності», а також можливість керувати елементами спінтроніки за допомогою зовнішнього магнітного поля, може дозволити розширити функціональні можливості як уже існуючих, так і майбутніх пристроїв спінтроніки.

Водночас значний інтерес до вивчення нанорозмірних систем пов'язаний і з розв'язанням деяких фундаментальних проблем фізики твердого тіла, зокрема, встановлення особливостей електронного транспорту в магнітних гетероструктурах. Дослідження в цій галузі стимулювалися як відкриттям явища гігантського магнітоопору (ГМО) (фізичною основою ефекту ГМО є спін-залежне розсіювання електронів провідності в об'ємі феромагнітного (ФМ) матеріалу і на поверхні розділення шарів (інтерфейсів)) та міжшарової обмінної взаємодії, так і появою принципово нових технологій отримання нанооб'єктів.

Багатошарові плівкові системи дають унікальну можливість керувати характеристиками обмінної взаємодії, вивчати вплив орієнтації спіну на транспортні властивості електронів. Виявлення оптимальних умов для отримання максимально можливої амплітуди ГМО, впливу структури інтерфейсів на фізичні властивості системи, специфіка гібридних кластерно-шаруватих наноструктур та систем з односпрямованою анізотропією й перемагнічуванням є найбільш популярними в останні роки галузями дослідження у фізиці тонких магнітних плівок.

Багатошарові структури, які складаються з ФМ шарів, розділених відносно товстими немагнітними (НМ) прошарками, є одним із можливих способів реалізації систем, у яких спостерігається явище ГМО. Натепер відома велика кількість робіт, які присвячені вивченню такого класу об'єктів. У якості прошарків між ФМ шарами використовуються як неферомагнітні матеріали, так й ізолятори. Актуальною науковою проблемою залишається розробка (на основі існуючих технологій) нових методик отримання наноматеріалів на основі багатошарових плівок з новим складом і функціональними можливостями, встановлення нових фізичних закономірностей та побудова нових фізичних моделей для їх описання. У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на встановлення більш глибокого розуміння фізичних механізмів переносу носіїв заряду в багатошарових системах типу ФМ/НМ/ФМ, є актуальними.

Отже, існує очевидний як науковий, так і практичний інтерес до фундаментальної проблеми фізики тонких плівок, яка пов'язана з комплексним дослідженням кристалічної структури, фазового складу, розмірної і температурної залежності повздовжнього та поперечного магнітоопору (МО), електроопору і термічного коефіцієнта опору (ТКО) магнітних три- та багатошарових плівок, що відкриває широкі можливості для прогнозування поведінки електрофізичних та магніторезистивних властивостей багатошарових систем зі зміною товщини шарів металу, структури, температури та величини зовнішнього магнітного поля.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проводилися в рамках держбюджетної теми № 0110U002726 «Дослідження спин-залежного розсіювання електронів у багатошарових нанорозмірних структурах» (2010 – 2012 рр.) Міністерства освіти і науки України.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягає у встановленні загальних закономірностей впливу температури, розмірних ефектів і додаткових шарів на електро- та магніторезистивні властивості тришарових плівкових систем та виявлення впливу на питомий опір, температурний коефіцієнт опору і гігантський магнітоопір елементного складу та структурно-фазового стану плівкових зразків.

У зв'язку з цим у роботі необхідно було вирішити такі наукові **завдання**:

- одержати плівкові структури Co/Cu(Ag)/Fe та Co/Cu/Co з додатковими шарами Fe, Ni і Cr і з товщинами окремих шарів (1 – 50) нм (ефективна товщина) методом термічного випаровування;

- дослідити структурно-фазовий стан плівкових зразків;

- провести порівняння експериментальних значень ТКО з розрахунковими на основі теоретичної моделі для розрахунку ТКО тришарових плівок Р. Дімміха та макроскопічної моделі, а також моделі для розрахунку електропровідності та ТКО тришарових плівок на основі модифікованої теорії Маядаса і Шатцкеса;

- дослідити дифузійні процеси в плівкових зразках;

- встановити особливості взаємозв'язку структурно-фазового стану плівкових систем з їх електро- і магніторезистивними властивостями;

- встановити закономірності в польових залежностях анізотропного магнітоопору (АМО) та ГМО для невідпалених та відпалених за різних температур плівкових систем при різних значеннях товщини магнітних, немагнітних і додаткових шарів.

**Об'єкт дослідження** – польові та розмірні ефекти в електрофізичних і магніторезистивних властивостях тришарових плівкових систем в умовах взаємної дифузії атомів та фазоутворення.

**Предмет дослідження** – електрофізичні (питомий опір і ТКО), магніторезистивні (МО і ГМО) та магнітні (поле насичення і коерцитивна сила) властивості тришарових нанокристалічних систем Co/Cu(Ag)/Fe, Co/Cu/Co з тонкими додатковими шарами Fe, Ni і Cr в інтервалі товщин магнітних  $d_f = (10 - 50)$  нм, немагнітних  $d_n = (1 - 30)$  нм та додаткових  $d_{imp} = (3 - 25)$  нм шарів при температурах вимірювання 150 К, 300 К.

Для вирішення поставлених завдань використовувалися такі **методи отримання та експериментального дослідження зразків**: вакуумна

пошарова конденсація металів термічним і електронно-променевим способами з незалежних джерел; метод резистометрії в умовах надвисокого безмасляного вакууму ( $(10^{-6} - 10^{-7})$  Па) та впливу зовнішніх температурних і магнітних полів; електронна мікроскопія та електронографія; вторинно-іонна мас-спектрометрія, атомно-силова мікроскопія, магнітостатичні вимірювання, методи теоретичного аналізу й узагальнення результатів.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Проведене в роботі комплексне дослідження кристалічної структури, фазового й елементного складу, електро- та магніторезистивних властивостей плівкових систем дозволило отримати такі нові результати:

1. Вивчено процеси фазоутворення у тришарових плівкових системах Co/Cu(Ag)/Fe, Co/Cu/Co з додатковими шарами Ni і Cr. Уперше встановлено, що в зразках з  $d_{Cu} < 5$  нм, при концентрації  $C_{Co} > 40$  %, після відпалювання при 700 К утворюється твердий розчин  $[\beta\text{-Co, (Fe, Cu)}]$  (система Co/Cu/Fe) з параметром решітки  $a = (0,357 - 0,358)$  нм та при  $C_{Co} > 55$  % – твердий розчин  $[\beta\text{-Co, (Ni, Cu)}]$  (система Co/Cu/Co з додатковим шаром Ni) з параметром решітки  $a = (0,355 - 0,359)$  нм;

2. Подальшого розвитку набуло питання апробації теоретичної моделі Р. Дімміха та моделі на основі модифікованої теорії Маядаса і Шатцкеса для ТКО на прикладі плівок системи Co/Cu/Fe, у яких зберігається індивідуальність окремих шарів, що дозволяє провести прогнозування величини ТКО для трикомпонентних плівкових систем. Показано, що експериментальні значення ТКО узгоджуються з розрахунковими з точністю до 20 % та 15 % відповідно.

3. Встановлені закономірності польових залежностей магнітоопору:

– уперше експериментально показано, що при ефективних товщинах прошарків ( $d_{Cu} = (3 - 15)$  нм,  $d_{Ag} = (6 - 25)$  нм) у полікристалічних плівкових системах Co/Cu(Ag)/Fe реалізується ефект ГМО з максимальним значенням (1 – 1,2) % за кімнатної температури і товщинах прошарків  $d_{Cu} \sim 3$  нм,  $d_{Ag} \sim 6$  нм відповідно, який зникає при розміщенні додаткових шарів Ni та Cr на інтерфейсі Co/Cu;

– вперше встановлено, що після термомагнітного відпалювання для всіх систем, за виключенням Co/Cu(Ag)/Fe, спостерігається перехід від ГМО до АМО; показано, що значення граничної температури відпалювання, після якої відбувається зазначений перехід, залежить від товщини і виду немагнітного прошарку;

– показано, що найбільше значення чутливості МО та ГМО ( $(40 - 90) \%$ /Тл) до магнітного поля спостерігається у зразках Co/Cu/Co/Cr/П після відпалювання при  $T_{відп} = 550$  К.

4. Досліджено вплив температури підкладки при конденсації на структурно-фазовий стан, електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових систем Co/Cu/Fe. Уперше встановлено, що для зразків, отриманих за  $T_{п} = 400$  К (з вихідним АМО), після їх відпалювання при  $T_{відп} = 550$  К, спостерігається поява ГМО з величиною (0,5 – 0,8) % за кімнатної температури.

**Практичне значення отриманих результатів.** Фундаментальне значення отриманих у роботі результатів полягає в подальшому накопиченні експериментальних даних стосовно впливу структурно-фазового стану, процесів дифузії, додаткових шарів та температури обробки на ефект ГМО у три- та

багатошарових плівкових системах. Ці результати розширюють та поглиблюють розуміння фізичних процесів у плівкових матеріалах в умовах впливу на них температурних та магнітних полів.

Результати дослідження впливу термостабілізації на величину ГМО мають прикладне значення та можуть бути застосовані при розробці елементів сенсорів магнітного поля, спін-вентилів тощо та визначенні умов їх експлуатації.

**Особистий внесок здобувача.** Особистий внесок автора полягає в самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, що стосуються теми дисертації. Постановка завдань дослідження, вибір експериментальних методик і обговорення отриманих результатів проводилися з науковим керівником професором В. Б. Лободою. Автором особисто проводилося отримання плівкових зразків, дослідження їх електрофізичних та магніторезистивних властивостей, кристалічної структури і фазового складу та обробка експериментальних результатів. Дослідження елементного складу методом вторинної іонної мас-спектрометрії проводилися з консультуванням з доцентом Салтиковою А. І. Магнітні вимірювання проводилися в Інституті фізики НАН України під керівництвом член-кор. НАН України Рябченка С. М. (м. Київ). Атомно-силові дослідження проводилися в Інституті фізики НАН України (м. Київ) та Центрі колективного користування приладами НАН України при Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ «Діагностика напівпровідникових матеріалів, структур та приладних систем» (м. Київ). Особисто автором підготовлено текст статей [2; 5; 8] і 13 тез. Матеріали робіт [1; 3; 4; 6; 7] обговорювалися спільно зі співавторами.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на таких наукових конференціях і семінарах: 3-rd International conference «Nanomaterials: Applications and Properties-2013» (Алушта, 2013 р.), XIII та XIV Міжнародних конференціях «Фізика і технології тонких плівок» (Івано-Франківськ, 2011, 2013 рр.); Міжнародних конференціях студентів і молодих учених з теоретичної та експериментальної фізики «ЄВРИКА» (Львів, 2010, 2011, 2012, 2013 рр.); Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету Сумського держуніверситету (Суми, 2010 р.), II Науковому семінарі «Сучасні проблеми наноелектроніки» (Суми, 2011 р.), Науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка» (Суми, 2013 р.), Конференціях молодих учених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання» (2010, 2011, 2012, 2013 рр.).

**Публікації.** Основні матеріали дисертації відображені у 22 публікаціях: 1-й монографії (окремі розділи), 7-и статтях у фахових виданнях (4 статті опубліковані у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus), 1-й статті в матеріалах конференцій, 13-ти тезах доповідей на наукових конференціях і семінарах.

**Структура та зміст роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 171 посилання. Дисертацію викладено на 165 сторінках друкованого тексту, з них 90 сторінок основного тексту, 71 рисуноків і 15 таблиць, у т. ч. 55 рисуноків і 11 таблиць на 39 окремих аркушах.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання та визначені об'єкт і предмет дослідження, розкриті наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведені відомості про апробацію роботи та структуру дисертації.

У **першому розділі** «Структурно-фазовий стан та фізичні властивості багатошарових нанокристалічних плівок», що являє собою літературний огляд, подано та проаналізовано основні опубліковані теоретичні і експериментальні відомості про структурно-фазовий стан, дифузійні, електропровідні та магніторезистивні властивості двошарових та багатошарових наноструктур. У *першому та другому підрозділах* наведені дані щодо структурно-фазового стану та дифузійних процесів у плівкових системах на основі плівок Co, Cu і Fe. Відмічено той факт, що ці метали, як в масивному, так і в плівковому стані, характеризуються обмеженою розчинністю, з можливим утворенням твердого розчину біля межі розділення шарів. У *третьому підрозділі* проведено аналіз літературних даних стосовно електрофізичних властивостей плівкових систем, зокрема, розглянуті теоретичні моделі розрахунку ТКО і електропровідності для двошарових плівок (модель Р. Дімміха, макроскопічна модель та модель на основі модифікованої теорії Маядаса і Шатцкеса). У *четвертому підрозділі* представлено дані щодо явища ГМО й обмінної взаємодії багатошарових плівок з ФМ і НМ шарами, які чергуються. Проведено аналіз публікацій експериментальних досліджень МО плівкових систем з практично нульовою обмінною взаємодією та показано, що існує потреба у комплексному дослідженні таких систем, оскільки в них ефект ГМО реалізується у відносно слабких магнітних полях, що відкриває широкі можливості їх практичного застосування.

**Другий розділ** «Методика і техніка експерименту» складається з шести підрозділів та містить інформацію про методику отримання плівкових зразків, методи проведення досліджень їх елементного і фазового складу, кристалічної структури, електрофізичних і магніторезистивних властивостей.

Плівкові зразки з товщинами шарів (1 – 50) нм отримували у вакуумній камері установки ВУП-5 при тиску газів залишкової атмосфери  $10^{-4}$  Па. Почергова конденсація плівок здійснювалася в результаті випаровування металів чистотою не менше 99,98 % з незалежних джерел (Cr, Cu, Ag – з вольфрамової стрічки; Co, Fe та Ni – з електронно-променевої гармати). Конденсація плівок проводилася за температур підкладки 300 К, 400 К, 550 К та 700 К зі швидкістю  $\omega = (0,5 - 1,5)$  нм/с залежно від металу, який випаровувався. Для дослідження електро- та магніторезистивних властивостей як підкладки використовувалися поліровані скляні пластини з попередньо нанесеними контактними площадками, для електронно-мікроскопічних досліджень – монокристали NaCl (KBr) і вуглецеві плівки, а для визначення елементного складу – пластини ситалу.

Геометричні розміри плівок задавалися вікнами у масках з ніхромової фольги.

Товщина плівок вимірювалася за допомогою мікроінтерферометра МП-4 з лазерним джерелом світла та комп'ютерною системою реєстрації інтерференційної

картини. Для визначення товщини надтонких плівок, з товщиною менше 15 нм, використовувався розрахунковий метод за співвідношенням для випадку випарника з малою площею поверхні.

Термостабілізація фізичних властивостей зразків та дослідження залежностей їх електричного опору від температури здійснювалися за схемою «нагрівання – витримка при максимальній температурі для кожного етапу відпалювання – охолодження» з постійною швидкістю (2 – 3) К/хв в інтервалі температур (300 – 700) К. Похибка при знаходженні питомого електроопору  $\rho$  визначалася в основному похибкою вимірювання товщини плівки: (10 – 15) % при  $d < 50$  нм і (5 – 10) % при  $d > 50$  нм. Оскільки при дослідженні МО вимірюється безпосередньо величина електричного опору зразка, а не його питомий опір, то похибка цих вимірювань становить 0,02%.

Дослідження структурно-фазового стану, елементного складу та топології поверхні плівкових зразків проводилися відповідно методами електронної мікроскопії (ПЕМ-125) і електроннографії (електроннограф на базі електронного мікроскопа УЕМБ-100К), вторинно-іонної мас-спектрометрії (мас-спектрометр МС-7201 М) та атомно-силової мікроскопії (скануючий зондовий мікроскоп NanoScope IIIa Dimension 3000<sup>TM</sup>).

Вимірювання МО та термомагнітна обробка плівок здійснювалися у спеціальній установці в умовах надвисокого безмасляного вакууму ( $10^{-6} - 10^{-7}$ ) Па у постійному магнітному полі напруженістю до  $H = 100$  кА/м. Магнітостатичні вимірювання проводилися за допомогою вібраційного магнітометра LDJ-9500 за кімнатної температури в діапазоні магнітних полів  $\pm 10$  кОе, прикладених в площині плівки та перпендикулярно до неї.

**Третій розділ** «Кристалічна структура та фазовий склад багат шарових плівок» складається з чотирьох підрозділів. У *першому підрозділі* наводяться результати вивчення фазового складу та кристалічної структури плівкових систем. Розмір зерна для невідпалених плівок системи Co/Cu/Fe (рис. 1 а) та системи Co/Ag/Fe (рис. 1 д) не перевищує 10 нм, а на електроннограмах (рис. 1 б, е) спостерігаються відбиття, що відповідають кристалографічним площинам фаз ГЦП-Co, ГЦК-Cu або ГЦК-Ag і ОЦК-Fe. Параметри решіток для ГЦП-Co ( $a = (0,251 - 0,252)$  нм,  $c = (0,410 - 0,412)$  нм) та ОЦК-Fe ( $a = (0,285 - 0,287)$  нм) узгоджуються в межах похибки визначення з даними для масивних зразків кобальту і заліза ( $a_{0\alpha-Co} = 0,2514$  нм,  $c_{0\alpha-Co} = 0,4105$  нм,  $a_{0Fe} = 0,2853$  нм). Слід зазначити, що на електроннограмах від невідпалених плівок із  $d_{Cu} < 5$  нм лінії, які належать фазі ГЦК-Cu, не спостерігаються. Після відпалювання цих систем при температурі 700 К розмір зерна збільшується в (2 – 20) разів (рис. 1 в, ж) залежно від металу, а на електроннограмах фіксуються лінії, які відповідають фазам ГЦК-Co, ГЦК-Cu або ГЦК-Ag та ОЦК-Fe (рис. 1 г, з). Для зразків з  $d_{Cu} < 5$  нм, з вмістом Co  $> 40$  %, після відпалювання за  $T_{відп} = 700$  К відбувається утворення ГЦК твердого розчину [ $\beta$ -Co,(Fe,Cu)] з параметром решітки  $a = (0,357 - 0,358)$  нм.



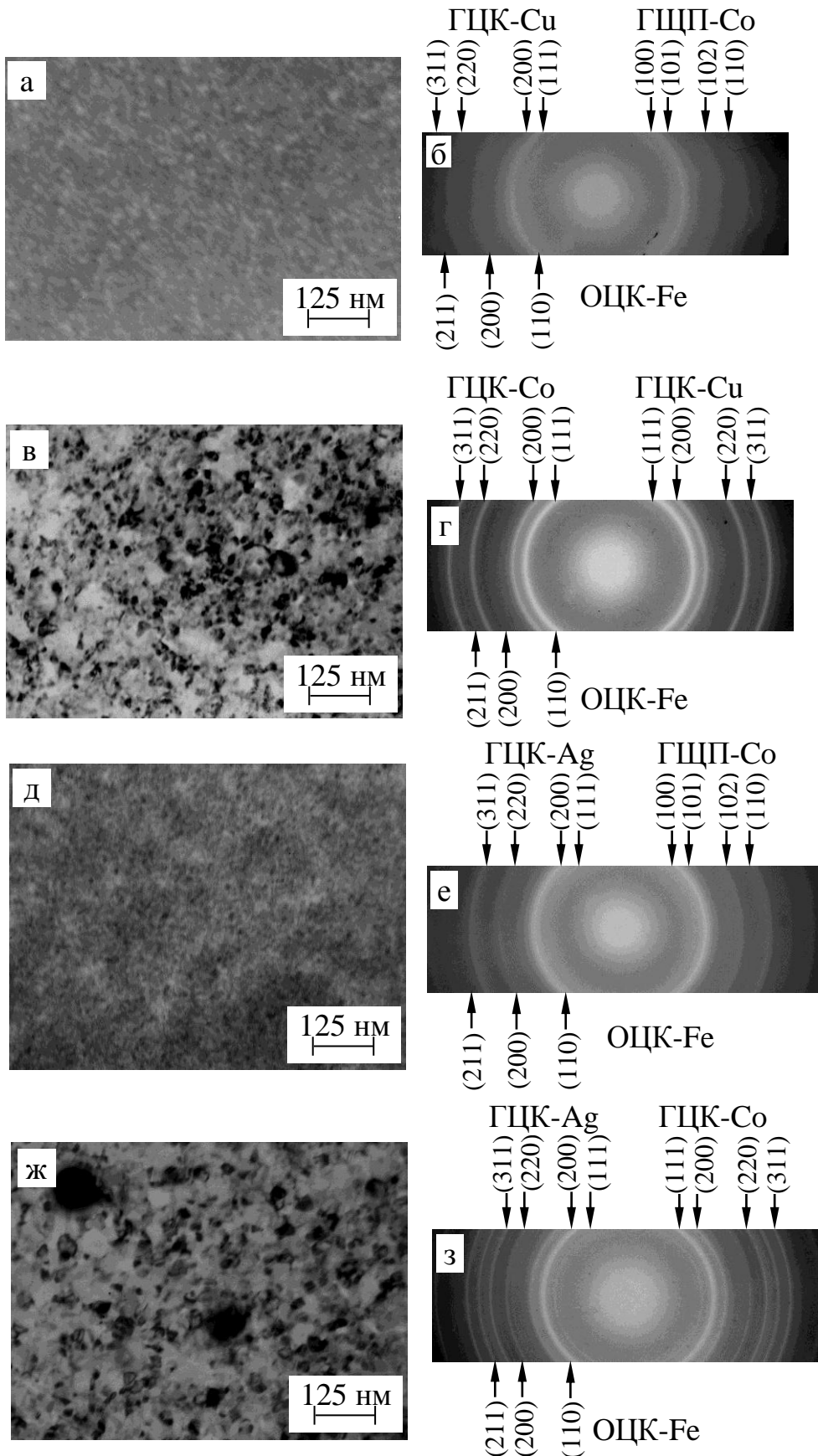


Рис. 1. Кристалічна структура та електронограми плівок Co/Cu/Fe ( $d_{Co,Fe} = 35$  нм,  $d_{Cu} = 10$  нм) (а – б), Co/Ag/Fe ( $d_{Co,Fe} = 35$  нм,  $d_{Ag} = 20$  нм) (д – з). Температура відпалювання: а, б, д, е – 300 К; в, г, ж, з – 700 К

Результати обробки електроннограм від невідпалених плівок системи Co/Cu/Co з додатковими шарами Ni свідчать про наявність фаз ГЦК-Ni, ГЦП-Co, ГЦК-Cu. Після відпалювання при температурі 700 К у цих системах, з вмістом Co > 55 %, фіксуються фази ГЦП-Co та ГЦК твердого розчину [ $\beta$ -Co,(Ni,Cu)] з параметром решітки  $a = (0,355 - 0,359)$  нм. Плівкові зразки Co/Cu/Co з додатковим шаром Cr мають фазовий склад ГЦК-Cu+ОЦК-Cr+ГЦП-Co. Після відпалювання при температурі 700 К у цих плівках з'являється ще фаза  $\beta$ -Co, а ширина дифракційних кілець істотно зменшується. Для цих зразків, як невідпалених, так і відпалених за температури 700 К, параметри решіток узгоджуються в межах похибки визначення з відповідними параметрами для цих металів у масивному стані.

У *другому підрозділі* наведені результати дослідження методом ВІМС дифузійних процесів у плівках Co/Cu/Fe/П, Co/Cu/Co/Cr/П та Co/Cu/Cr/Co/П. Для системи Co/Cu/Fe у невідпаленому стані спостерігається відносно незначна область взаємної дифузії. Термообробка зразків з товщиною  $d_{Co,Fe} = (30 - 40)$  нм та  $d_{Cu} = (10 - 20)$  нм при температурі відпалювання  $T_{відп} = 700$  К призводить до більшого перекриття дифузійних профілів, що обумовлене подальшою термодифузиею по межах зерен із відведенням атомів дифузанта в об'єм кристалітів. Однак у цілому система залишається тришаровою. Для плівок Co/Cu/Fe/П з  $d_{Cu} < 5$  нм, відпалених при  $T_{відп} = 700$  К, має місце повне дифузійне перемішування шарів.

Із даних пошарового аналізу систем Co/Cu/Co з додатковим шаром Cr слідує, що невідпалені зразки, незалежно від взаємного розташування шарів Co та Cr, характеризуються малою взаємною проникністю, що, очевидно, пов'язане із конденсаційно-стимулюваною дифузиею. Хоча, слід зазначити, досить значне проникнення атомів Cr, оскільки в цьому випадку атоми Cr фіксуються майже у всьому нижньому шарі Co. Відпалювання при  $T_{відп} = 700$  К призводить лише до незначного подальшого взаємопроникнення атомів Co та Cu, а от дифузія атомів Cr у процесі відпалювання відбувається значно інтенсивніше. Для плівок цих систем атоми Cr досягають не лише інтерфейсів Co/Cu, а й проникають безпосередньо у верхній шар Co.

У *третьому підрозділі* подані результати дослідження топології поверхонь плівок Fe та Cu/Fe на підкладці зі скла у невідпаленому та відпаленому за температури 550 К і 700 К станах. На основі атомно-силових та електронно-мікроскопічних досліджень був зроблений висновок про те, що плівки заліза мають чітко виражену глобулярну будову, у якій глобула являє собою конгломерат кристалітів. У відпалених при  $T_{відп} = 700$  К плівках Cu/Fe у шарі міді з'являються мікроотвори, що означає порушення структурної суцільності НМ шару і приводить у випадку тришарової плівки до прямої обмінної взаємодії між ФМ шарами, що виключає можливість виникнення ефекту ГМО.

У *четвертому підрозділі* наведені результати впливу температури підкладки ( $T_n$ ) на структурно-фазовий стан та дифузійні процеси тришарових плівок системи Co/Cu/Fe. Як для свіжосконденсованих зразків, так і відпалених при 700 К, які отримані при  $T_n = 400$  К, 550 К, електрофізично фіксується тільки фаза  $\beta$ -Co.

У цілому в зразках Co/Cu/Fe/П, які отримані при  $T_n = 400$  К та 550 К

( $d_f = (30 - 40)$  нм,  $d_n = (10 - 20)$  нм), як і в зразках, що отримані за кімнатної температури, зберігається індивідуальність окремих шарів, як у свіжосконденсованому стані, так і після відпалювання при  $T_{\text{відп}} = 700$  К.

У **четвертому розділі** «Електрофізичні властивості багатошарових полікристалічних плівок» подано експериментальні дані про вплив температур підкладки під час конденсації, вимірювання і термообробки та розмірних ефектів на питомий опір і ТКО плівкових систем. Для всіх зразків у процесі відпалювання протягом першого циклу спостерігається необоротне зменшення питомого опору, яке зумовлене заліковуванням дефектів кристалічної структури та збільшенням розмірів кристалітів унаслідок рекристалізаційних процесів. При зростанні товщини НМ прошарку тенденція до падіння питомого опору менш виражена, що пов'язано із автозаліковуванням дефектів.

Підвищення температури підкладки під час конденсації шарів приводить до зменшення кількості дефектів та збільшення розмірів кристалітів (збільшується середня довжина вільного пробігу електронів провідності), що обумовлює зменшення питомого опору системи. Для плівок, відпалених за  $T_{\text{відп}} = 700$  К протягом 30 хвилин з наступним охолодженням, спостерігається повна стабілізація електричних властивостей. Під час подальших циклів термостабілізації залежності питомого опору від температури відтворюються з високою точністю.

На основі теоретичних моделей (модель Р. Дімміха та макроскопічна модель) були розраховані значення ТКО для тришарових плівок Co/Cu/Fe/Π, у яких при  $d_f > 30$  нм та  $d_n > 5$  нм значною мірою зберігається індивідуальність шарів. Порівняння цих значень ТКО показали, що вони узгоджувалися з точністю до 20 % за моделлю Дімміха та з точністю до 30 % за макроскопічною моделлю. Такий ступінь відповідності має місце і в роботах інших авторів, у яких наведена апробація вищезазначених моделей. Однією з причин розбіжності є зміна умов розсіювання на межах зерен за рахунок дифузії атомів іншого сорту.

Проведені розрахунки ТКО для тришарових плівкових систем дозволили встановити, що при збільшенні товщини НМ прошарку для плівок із  $d_{\text{Co,Fe}} > 30$  нм величина ТКО зменшується. А для плівок з  $d_{\text{Co,Fe}} < 30$  нм, при збільшенні товщини прошарку, величина ТКО зростає, що пов'язано з величиною внеску того чи іншого шару. Для плівок Co/Cu/Fe/Π, у яких, згідно з електронографічними дослідженнями та ВІМС-аналізом, спостерігається твердий розчин [β-Co,(Fe,Cu)] після відпалювання за температури 700 К (вміст  $C_{\text{Co}} > 40$  %) при товщині ФМ шарів менше 30 нм була розрахована величина ТКО за співвідношенням для трикомпонентного сплаву. Порівняння експериментальних та розрахованих значень ТКО показало, що ці значення збігаються з точністю до 20 %, що дозволяє прогнозувати величину ТКО у таких системах.

За допомогою моделі на основі модифікованої теорії Маядаса і Шатцкеса було розраховано величину питомого опору для тришарових плівок Co/Cu/Fe/Π. Розмірна залежність питомої провідності тришарових плівок за цією теорією така:

$$\sigma = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^3 d_i \sigma_{\infty i} \Phi_i, \quad (1)$$

де  $\sigma_{\infty i}$  – провідність масивного зразка з таким типом дефектів і їх концентрацією, як і в плівці;  $d$  – загальна товщина тришарової плівки;  $d_i$  – товщина  $i$ -го шару плівкової системи;  $\Phi_i$  – розмірні функції, які визначають внесок розмірів окремого шару в провідність тришарової плівки.

У випадку, якщо товщина окремих шарів плівки значно більша за довжину вільного пробігу електронів ( $d_i \gg \lambda_i$ ), а самі шари мають крупнозернисту структуру, то розмірні функції  $\Phi_i$ , наближено можна представити наступним чином:

$$\Phi_j = 1 - \frac{3}{2}\alpha_j - \frac{3\lambda_j}{16d_j} \left\{ (2 - q - P) \left( 1 - \frac{32}{3\pi}\alpha_j \right) - Q \cdot \frac{\lambda_{02}}{\lambda_j} \left( 1 - \frac{16}{3\pi}(\alpha_j + \alpha_2) \right) \right\} \quad j = 1, 3, \quad (2)$$

$$\Phi_2 = 1 - \frac{3}{2}\alpha_2 - \frac{3\lambda_2}{16k_2} \left\{ (1 - P) \left( 1 - \frac{16}{3\pi}(\alpha_1 + \alpha_2) \right) - Q \cdot \frac{\lambda_{03}}{\lambda_2} \left( 1 - \frac{16}{3\pi}(\alpha_3 + \alpha_2) \right) \right\}, \quad (3)$$

де  $P$  і  $q$  – імовірності дзеркального розсіювання електронів на інтерфейсах та зовнішніх поверхнях зразка;  $Q$  – імовірність проходження електрона у сусідній шар плівки без розсіювання так, що  $P + Q \leq 1$ ;  $\alpha_i = \lambda_i L_i^{-1} R_i (1 - R_i)^{-1}$  – зерномежовий параметр;  $L_i$  – середній розмір зерна у площині  $i$ -го шару;  $R_i$  – імовірність дифузного розсіювання електронів на межах зерна.

З використанням співвідношень (1)–(3) було проведено порівняння експериментальних та розрахункових значень питомого опору тришарових плівок Co/Cu/Fe/П, результати якого подані в табл. 1.

Таблиця 1

**Порівняння експериментальних і розрахункових значень питомого опору для тришарових плівок Co/Cu/Fe/П**

Плівка ( $d$ , нм)	Питомий опір $\times 10^7$ , Ом·м		
	експер. дані	розрах. дані	$\frac{\rho_{\text{експ}} - \rho_{\text{розрах}}}{\rho_{\text{експ}}}$ , %
Co(30)/Cu(5)/Fe(30)/П	6,5	6,0	7,7
Co(30)/Cu(10)/Fe(30)/П	4,8	4,1	14,6
Co(30)/Cu(20)/Fe(30)/П	4,2	3,7	11,9
Co(30)/Cu(30)/Fe(30)/П	4,0	3,6	10,0
Co(30)/Cu(40)/Fe(30)/П	3,7	3,4	8,1

Розрахункові та експериментальні результати узгоджуються з точністю до 15 % при значеннях коефіцієнта розсіювання  $P = 0,2$  та коефіцієнта проходження  $Q = 0,4$  для Cu та  $P = 0,1$ ,  $Q = 0,6$  для Co, Fe. Відмінність результатів, зокрема, може бути пов'язана з неврахуванням у цій моделі впливу зерномежової дифузії.

**П'ятий розділ** «Магніторезистивні властивості тришарових полікристалічних плівок» містить шість підрозділів та охоплює коло питань, пов'язаних з експериментальними дослідженнями гігантського магніторезистивного ефекту

(ГМРЕ) у полікристалічних плівкових зразках. У першому підрозділі наводяться результати дослідження МО невідпалених плівкових систем Co/Cu(Ag)/Fe та Co/Cu/Co з додатковими шарами Fe, Ni та Cr. Для двошарових зразків (рис. 2 а) та тришарових (або багатошарових) зразків з товщиною прошарків менше (3 – 5) нм (рис. 2 б), спостерігається типовий АМО, який властивий феромагнітним матеріалам.

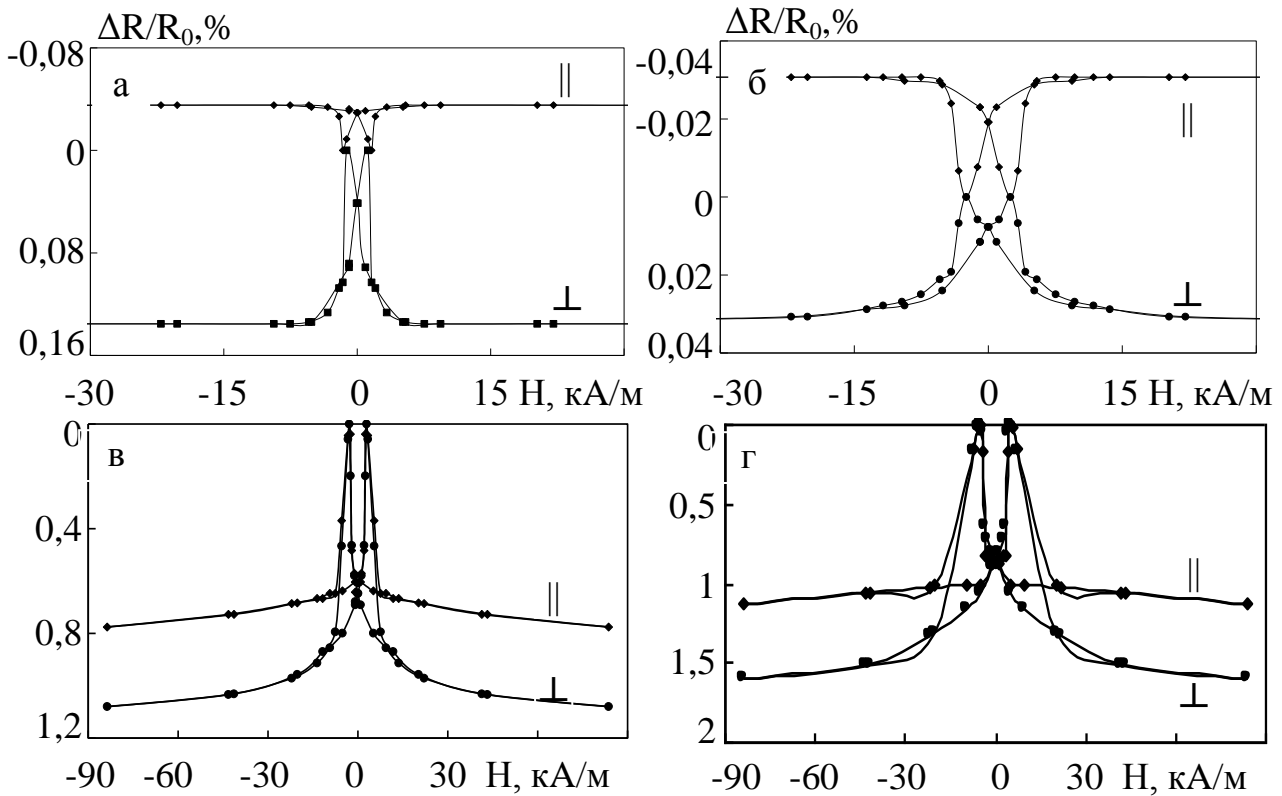


Рис. 2. Залежність повздовжнього (||) та поперечного (⊥) МО від напруженості магнітного поля для свіжосконденсованих двошарової плівки Co/Fe/Π (а) ( $d_{Co,Fe} = 40$  нм) та тришарових плівок Co/Cu/Fe/Π (б, в, г) (б:  $d_{Co,Fe} = 40$  нм,  $d_{Cu} = 2$  нм; в:  $d_{Co,Fe} = 40$  нм,  $d_{Cu} = 3$  нм; г:  $d_{Co,Fe} = 40$  нм,  $d_{Cu} = 3$  нм). Температура вимірювання: а, б, в – 300 К; г – 150 К

При збільшенні товщини НМ прошарку спостерігається ГМРЕ. Максимальне значення ГМО для плівок Co/Cu(Ag)/Fe/Π (1 – 1,2) % спостерігається при однакових товщинах ФМ шарів і товщинах прошарків  $d_{Cu} \sim 3$  нм (рис. 2 в),  $d_{Ag} \sim 6$  нм відповідно. Для систем Co/Cu/Co з додатковими шарами Fe, Ni та Cr ефект ГМО спостерігається при  $d_n = (5 - 15)$  нм (з шарами Fe), (3 – 15) нм (з шарами Ni та Cr) за умови відсутності твердих розчинів. При охолодженні зразків до 150 К вид петель польових залежностей МО практично не змінюється (рис. 2 г) (незалежно від товщини шарів). Спостерігається тільки збільшення величини ефекту ГМО і зміщення піків на залежності  $(\Delta R/R_0)(H)$  в область більш сильних магнітних полів.

У другому підрозділі наведені результати дослідження впливу відпалювання на величину ефекту ГМО та вид магніторезистивних петель. Як показують результати експериментальних досліджень, характер поведінки МО і його величина в загальному випадку визначаються товщиною НМ шару (рис. 3). Також слід зазначити, що при термомагнітному відпалюванні для всіх систем, за виключенням

Co/Cu(Ag)/Fe ( $d_{Cu} = (7 - 15)$  нм,  $d_{Ag} = (12 - 17)$  нм), відбувається перехід від ГМО до АМО. Для плівок Co/Ag/Fe/П з товщиною срібного прошарку (12–17) нм залежність МО від відпалювання має немонотонний характер (рис. 3 б). При термообробці цих зразків за температури 400 К має місце зменшення величини ефекту ГМО в 2 рази, що може бути пов'язане із збільшенням шорсткості інтерфейсу. Подальше збільшення температури відпалювання до 550 К збільшує величину ГМРЕ майже в 3 рази. Ріст величини ефекту ГМО у плівках з відносно товстими прошарками ( $d_n > 5$  нм), можливо, пов'язаний з покращенням меж розділення ФМ та НМ металів, що призводить до збільшення ступеня дзеркальності зовнішніх меж шарів, оскільки в такому випадку електрони, дзеркально відбившись від межі, залишаються ефективними внаслідок того, що не втрачають своєї «пам'яті» про спін. Після відпалювання за температури 700 К величина ефекту зменшується до (0,1 – 0,25) %, що обумовлене подальшим проходженням дифузії, у результаті чого зростає концентрація ФМ містків через прошарок та з'являється пряма обмінна взаємодія між ФМ шарами.

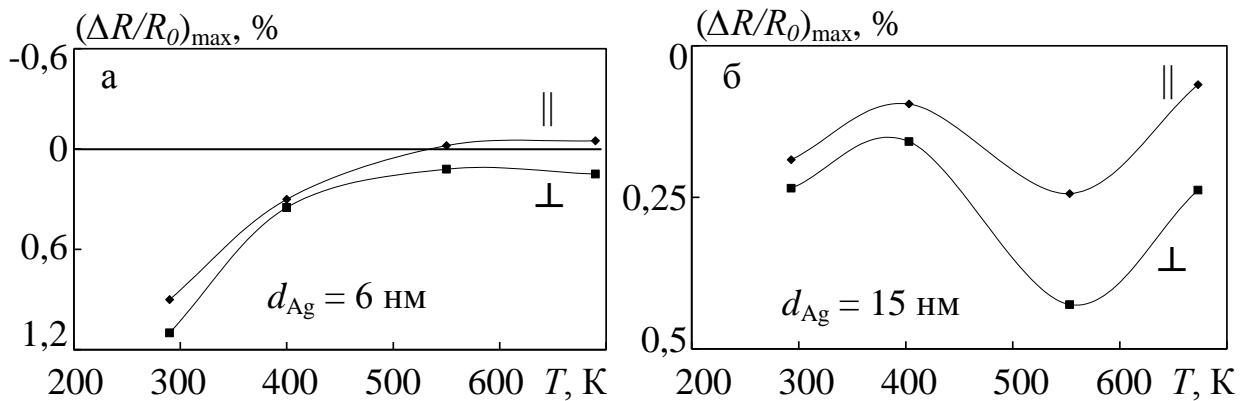


Рис. 3. Залежність  $(\Delta R/R_0)_{max}$  від  $T_{відп}$  для тришарових структур Co/Ag/Fe/П з різною ефективною товщиною прошарку ( $d_{Co} = d_{Fe} = 40$  нм)

У третьому підрозділі подані результати дослідження впливу температури підкладки ( $T_n$ ) на магніторезистивні властивості тришарових плівок Co/Cu/Fe/П. Показано, що для всіх свіжосконденсованих зразків, які отримані за температури підкладки 400 К, 550 К та 700 К проявляється АМО величиною (0,02 – 0,1) % (рис. 4).

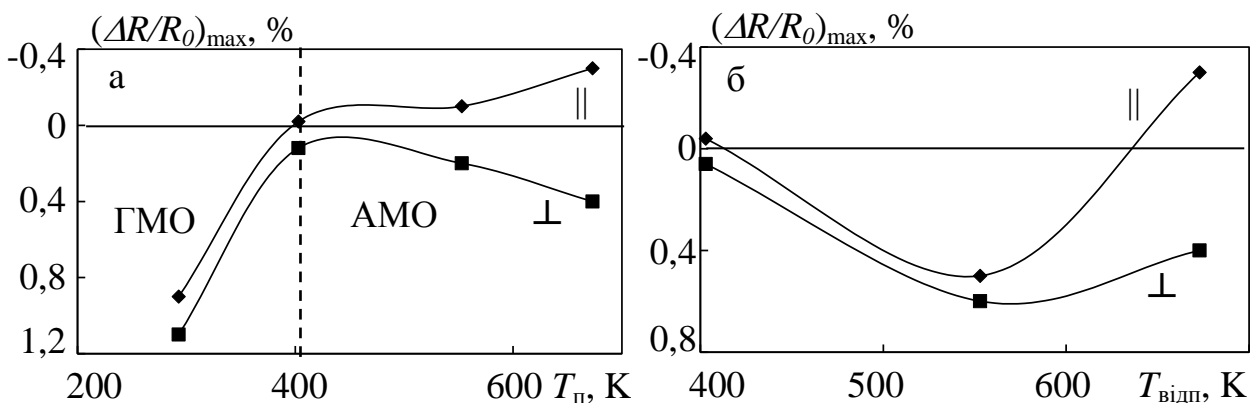


Рис. 4. Залежність МО від  $T_n$  (а) та  $T_{відп}$  (б) для плівки Co/Cu/Fe/П ( $d_{Fe,Co} = 40$  нм,  $d_{Cu} = 8$  нм). Температура вимірювання  $T_{вим} = 300$  К

А для зразків, які отримані за  $T_n = 400$  К (з вихідним АМО) (рис. 4 а), після їх відпалювання при  $T_{\text{відп}} = 550$  К спостерігається поява ГМО величиною (0,5 – 0,8) % за кімнатної температури (рис. 4 б), що пов'язане з впливом термообробки на суперпозицію анізотропного (обумовленого спін-орбітальною взаємодією) і СЗР електронів провідності.

У *четвертому підрозділі* наведено результати апробації співвідношення теоретичної моделі для розрахунку величини анізотропії ГМРЕ. Для полікристалічних тришарових зразків максимальна величина анізотропії ефекту становить:

$$\delta(1) = \frac{(\alpha_\lambda - 1)^2}{4\alpha_\lambda} \left( 1 + (\beta^- - \beta^+) \frac{\alpha_\lambda + 1}{\alpha_\lambda - 1} \cos 2\theta \right), \quad (4)$$

де  $\alpha_\lambda$  – коефіцієнт спінової асиметрії,  $\beta^\pm$  – параметр анізотропії,  $\theta$  – кут між вектором густини струму  $\vec{j}$  і вектором локальної намагніченості в магнітному шарі  $\vec{M}$ .

Показано, що теоретично розраховані й експериментально виміряні для системи Co/Cu/Co значення анізотропії ГМО збігаються з точністю до 20 %.

У *п'ятому підрозділі* наведені результати дослідження чутливості МО тришарових та багатошарових плівкових систем до магнітного поля. Показано, що найбільше значення чутливості МО (зокрема й ГМО) до магнітного поля спостерігається для системи Co/Cu/Co/Cr з товщиною НМ прошарку  $d_{\text{Cu}} = (6 - 10)$  нм після відпалювання за температури  $T_{\text{відп}} = 550$  К і становить (40 – 90) %/Тл.

У *шостому підрозділі* наведені результати дослідження впливу товщини НМ прошарку на амплітуду ефекту ГМО. Для систем Co/Cu(Ag)/Fe ця залежність має немонотонний характер. У випадку плівок Co/Cu/Co/Cr/П вона є осцилюючою з двома явно вираженими максимумами. Причиною осциляції можуть бути зміна типу зв'язку між магнітними шарами, густина «містків» між ними, а також послаблення обмінного зв'язку за рахунок збільшення товщини НМ прошарку.

У **висновках** подано стислу характеристику основних результатів роботи.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведено комплексне дослідження структурно-фазового стану, електро- і магніторезистивних властивостей тришарових плівок систем Co/Cu(Ag)/Fe та Co/Cu/Co з тонкими додатковими шарами Fe (Fe/Co/Cu/Co/Fe), Ni (Ni/Co/Cu/Co/Ni, Co/Ni/Cu/Ni/Co, Co/Ni/Co/Cu/Co/Ni/Co) і Cr (Co/Cu/Co/Cr, Co/Cu/Cr/Co) в інтервалі товщин магнітних  $d_f = (10 - 50)$  нм, немагнітних  $d_n = (1 - 50)$  нм та додаткових  $d_{\text{imp}} = (3 - 25)$  нм шарів при температурах вимірювання 150 К, 300 К. У результаті виконання роботи сформульовано такі узагальнюючі висновки:

1. Методами просвічуючої електронної мікроскопії, електронографії та вторинно-іонної мас-спектрометрії проведено дослідження структурно-фазового стану плівок систем Co/Cu(Ag)/Fe і Co/Cu/Co з додатковими шарами Ni та Cr:

– показано, що всі свіжосконденсовані зразки є полікристалічними з дрібнозернистою структурою (середній розмір зерна менше 10 нм) із фазовим складом ГЦП-Co+(ГЦК-Cu або ГЦК-Ag)+ОЦК-Fe (система Co/Cu(Ag)/Fe); ГЦП-Co+ГЦК-Cu+(ГЦК-Ni або ОЦК-Cr) (система Co/Cu/Co з додатковими шарами Ni та Cr); параметри решіток з точністю до 4 % узгоджуються з відповідними параметрами для масивних металів;

– відпалювання при  $T_{\text{відп}} = 700$  К призводить до збільшення розміру зерен у (2 – 20) разів залежно від товщини та виду шарів; для систем Co/Cu(Ag)/Fe, яка відпалена при  $T_{\text{відп}} = 700$  К, фіксується поява ГЦК-Co; для цієї системи при товщині  $d_{\text{Cu}} < 5$  нм спостерігається утворення твердого розчину  $[\beta\text{-Co, (Fe, Cu)}]$  з параметром решітки  $a = (0,357 - 0,358)$  нм при вмісту  $C_{\text{Co}} > 40$  %; для системи Co/Cu/Co з шаром Cr після відпалювання при  $T_{\text{відп}} = 700$  К для Co фіксуються ГЦП і ГЦК фази, а для системи Co/Cu/Co з шаром Ni, при вмісту  $C_{\text{Co}} > 55$  %, спостерігається утворення твердого розчину  $[\beta\text{-Co, (Ni, Cu)}]$  з параметром решітки  $a = (0,355 - 0,359)$  нм;

2. Для системи Co/Cu/Fe, у якій зберігається індивідуальність шарів, розмірні залежності питомого опору і ТКО від товщини шару міді носять немонотонний характер, обумовлений дифузним розсіюванням електронів інтерфейсами плівкою структури. Порівняння експериментальних значень питомого опору і ТКО з теоретично розрахованими на основі модифікованої теорії Маядаса і Шатцкеса показало їх узгодження з точністю до 15 %.

3. Встановлена закономірність розмірного ефекту ТКО у тришарових плівках Co/Cu/Fe/П: зі зростанням товщини НМ прошарку значення ТКО зростає (якщо  $d_{\text{Co,Fe}} = \text{const} < 30$  нм) або зменшується (якщо  $d_{\text{Co,Fe}} = \text{const} > 30$  нм).

4. Експериментально показано, що при  $d_{\text{Cu}} = (3 - 15)$  нм та  $d_{\text{Ag}} = (6 - 25)$  нм у досліджуваних системах Co/Cu(Ag)/Fe реалізується ГМРЕ. Максимальне значення ГМО (1,2; 1,1%) для свіжосконденсованих плівок спостерігається при однакових товщинах ФМ шарів і товщині НМ прошарку  $d_{\text{Cu}} \sim 3$  нм та  $d_{\text{Ag}} \sim 6$  нм. При зменшенні температури вимірювання до 150 К відбувається збільшення величини ефекту в (1,3 – 1,5) рази. Для системи Co/Cu/Co з додатковими шарами Fe, Ni та Cr величина МО і вид магніторезистивних петель визначається товщиною, видом та розміщенням домішкового шару в плівці Co/Cu/Co. Встановлено, що розміщення додаткових шарів Ni та Cr на інтерфейсі Co/Cu приводить до появи АМО.

5. Вивчення впливу термообробки на магніторезистивний ефект плівкових зразків дозволило встановити такі закономірності:

– відпалювання для всіх досліджуваних зразків, у яких фіксується ГМРЕ, за виключенням Co/Cu(Ag)/Fe з товщиною НМ прошарків  $d_{\text{Cu}} = (7 - 15)$  нм  $d_{\text{Ag}} = (12 - 17)$  нм, призводить до переходу від ГМО до АМО;

– для системи Co/Cu/Co з шаром Ni як покривного шару низькотемпературне відпалювання за 400 К призводить до значного росту величини ГМО (майже в 3 рази), що зумовлено проходженням дифузії на межі поділу шарів Co та Ni;

– найбільше значення чутливості МО спостерігається після відпалювання зразків Co/Cu/Co з шаром Cr при температурі  $T_{\text{відп}} = 550$  К і становить (40 – 90) %/Тл.

6. Для зразків Co/Cu/Fe/П, які отримані за температури підкладки при конденсації 400 К (з АМО у вихідному стані), відпалювання при 550 К призводить до появи ГМО величиною (0,5 – 0,8) %.



## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати

1. Лобода В. Б. Вплив додаткових шарів Ni на структуру та магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Co та Cu / В. Б. Лобода, Ю. О. Шкурдода, **В. М. Коломієць**, Л. В. Дехтярук // Ж. нано- електрон. фіз. – 2011. – Т.3, № 2 – С.27–35 .

2. Лобода В. Б. Структура и магниторезистивные свойства поликристаллических пленок Co/Cu/Co / В. Б. Лобода, Ю. А. Шкурдода, В. А. Кравченко, С. Н. Хурсенко, **В. Н. Коломиец** // Металлофиз. новейшие технол. – 2011. – Т.33, №2. – С.161–169.

3. Лобода В. Б. Структура, дифузійні процеси та магніторезистивні властивості тришарових плівок Co/Ag/Co / В. Б. Лобода, Ю. О. Шкурдода, **В. М. Коломієць**, Є. Г. Копанець, Л. В. Дехтярук, А.І. Салтикова // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12, №4. – С. 917–922.

4. Лобода В. Б. Магніторезистивний ефект та магнітні параметри нанокристалічних плівок на основі Co, Fe, Ag та Cu / В. Б. Лобода, **В. М. Коломієць**, Ю. О. Шкурдода, В. О. Кравченко, Є. Г. Копанець // Ж. нано- електрон. фіз. – 2012. – Т.4, № 2 – С. 02014(6).

5. Лобода В. Б. Структура та магніторезистивні властивості нанокристалічних плівкових систем на основі Co, Fe, Ag та Cu / В. Б. Лобода, **В. М. Коломієць**, Ю. О. Шкурдода, В. О. Кравченко, Л. В. Дехтярук // Металлофиз. новейшие технол.– 2012. – Т. 34, №8. С. 1043–1055.

6. Коломієць В. М. Структурно-фазовий стан та дифузійні процеси в плівкових системах на основі Co, Cu та Cr / **В. М. Коломієць**, В. Б. Лобода, Ю. О. Шкурдода, Л. В. Дехтярук // ФИП. – 2012. – Т. 10, №4. С. 397–402.

7. Коломієць В. М. Магніторезистивні властивості плівок Co/Cu/Co з додатковим ультратонким шаром Cr / **В. М. Коломієць**, В. Б. Лобода, Ю. О. Шкурдода, В. О. Кравченко, С. М. Хурсенко // Фізика і хімія твердого тіла. – 2013 – Т. 14, №1. – С. 197–201.

8. Фізичні властивості нанокристалічних плівок Ni, Co, Fe, Cu, Ag, їх сплавів та багатошарових плівкових систем на їх основі: монографія / [В. Б. Лобода, С. М. Хурсенко, Ю. О. Шкурдода, В. О. Кравченко, **В. М. Коломієць**, А. І. Салтикова]. – Суми: Університетська книга, 2013. – 309 с.

### 2. Наукові праці апробаційного характеру

9. Loboda V. B. The temperatures' influence of substrate and annealing on a surface relief and diffusion in multilayer film systems / V. B. Loboda, Yu. O. Shkurdoda, A. I. Saltykova, **V. M. Kolomiets** // Proceedings of the international conference Nanomaterials: Applications and Properties, 16-21 September 2013. – Alushta, 2013. – V. 2 No 1, 01001(22pp).

10. Коломієць В. М. Вплив додаткових шарів Ni на ефект ГМО в плівках

Co/Cu/Co / В. Б. Лобода, Ю. О. Шкурдода, **В. М. Коломієць**, Т. В. Хохлова // Матеріали та програма науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету Електроніки та інформаційних технологій, 19 – 23 квітня 2010 р.: тези доп. – Суми, 2010. – С. 121.

11. Коломієць В. М. Вплив термомагнітного відпалювання на ГМО мультишарових плівкових систем / В. Б. Лобода, Ю. О. Шкурдода, **В. М. Коломієць**, В. О. Кравченко, Т. В. Хохлова // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної і експериментальної фізики „Еврика – 2010”, 19 – 21 травня 2010 р.: тези доп. – Львів, 2010. – С. G 6.

12. Коломієць В. М. Анізотропія ефекта гігантського магнетосопротивлення в магнітних сандвичах / **В. М. Коломієць**, Ю. А. Шкурдода, Л. В. Дехтярук, В. Б. Лобода // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання – 2010», 5 – 7 жовтня 2010 р.: тези доп. – Київ, 2010. – С. 133.

13. Kolomiets V. M. The effect of giant magnetoresistance in three-layer nanocrystalline films Fe/Ag/Co / V. B. Loboda, **V. M. Kolomiets**, Yu. O. Shkurdoda, A. I. Saltykova, L. V. Dekhtyaruk // Матеріали XIII Міжнародної конференції «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем», 16 – 21 травня 2011 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 158.

14. Коломієць В. М. Дифузійні процеси в тришарових плівкових зразках / В. Б. Лобода, **В. М. Коломієць**, Ю. О. Шкурдода, А. І. Салтикова // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання – 2011», 12 – 14 квітня 2011 р.: тези доп. – Київ, 2011. – С. 160.

15. Коломієць В. М. Анізотропія ефекта гігантського магнітоопору у тришарових плівках/ В. Б. Лобода, **В. М. Коломієць**, Ю. О. Шкурдода, Л. В. Дехтярук, А. В. Карпенко, Н. Ф. Холявка // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної і експериментальної фізики «Еврика – 2011», 18 – 20 травня 2011 р.: тези доп. – Львів, 2011. – С. А 16.

16. Коломієць В. М. Фазовий склад нанокристалічних тришарових плівок Co/Cu/Fe / В. Б. Лобода, **В. М. Коломієць**, Ю. О. Шкурдода, А. І. Салтикова, В. О. Кравченко // Матеріали II Наукового семінару «Сучасні проблеми наноелектроніки, 26 травня 2011 р.: тези доп. – Суми, 2011. – С. 21.

17. Коломієць В. М. Дифузійні процеси у тришарових плівкових зразках Co/Cu/Fe/П / В. Б. Лобода, **В. М. Коломієць**, Ю. О. Шкурдода, А. І. Салтикова // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної і експериментальної фізики «Еврика – 2012», 19 – 12 квітня 2012 р.: тези доп. – Львів, 2012. – С. D 47.

18. Коломієць В. М. Розмірна залежність питомого опору та ТКО плівкових систем Co/Ag(Cu)/Fe/П / **В. М. Коломієць**, В. Б. Лобода, Ю. О. Шкурдода // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання – 2012», 3 – 5 квітня 2012 р.: тези доп. – Київ, 2012. – С. 157.

19. Коломієць В. М. Вплив температури підкладки та подальшого відпалювання на ГМО тришарових плівок Co/Cu/Fe/П / В. Б. Лобода, Ю. О. Шкурдода, **В. М. Коломієць**, С. М. Хурсенко // Матеріали та програма науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка», 22 – 27 квітня

2013 р.: тези доп. – Суми, 2013. – С. 116.

20. Kolomiets V. M. AFM – exploration of film relief of surface Fe and Cu/Fe / V. B. Loboda, **V. M. Kolomiets**, Yu. O. Shkurdoda, S. G. Kulyk // Матеріали XIV Міжнародної конференції «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем», 20 – 25 травня 2013 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2013. – С. 399.

21. Коломієць В. М. Вплив температури підкладки та термообробки на магніторезистивні властивості несиметричних систем Co/Cu/Fe/П / В. Б. Лобода, **В. М. Коломієць**, Ю. О. Шкурдода, С. Г. Кулик // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної і експериментальної фізики «Єврика – 2013», 15 – 17 травня 2013 р.: тези доп. – Львів, 2013. – С. А 14.

22. Коломієць В. М. Магнітні та магніторезистивні властивості несиметричних плівкових систем Co/Cu/Fe/П / В. Б. Лобода, **В. М. Коломієць**, Ю. О. Шкурдода // Збірник тез конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання – 2013» з міжнародною участю, 2 – 4 квітня 2013 р.: тези доп. – Київ, 2013. – С. 220.

## АНОТАЦІЯ

**Коломієць В.М. Структура, електро- та магніторезистивні властивості багатошарових плівкових структур на основі феромагнітних металів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет. – Суми, 2014.

Дисертаційна робота присвячена встановленню закономірностей формування кристалічної структури, фазового складу, електрофізичних та магніторезистивних властивостей і їх взаємозв'язку для тришарових та багатошарових плівок на основі Co, Fe, Ni, Cr, Cu та Ag в інтервалі товщин  $d = (1 - 50)$  нм при температурах вимірювання  $T_{вим} = 150$  К та 300 К.

Встановлено фазовий склад та структуру плівкових систем Co/Cu(Ag)/Fe і Co/Cu/Co з додатковими шарами Ni та Cr, а також виявлено вплив температури підкладки на структурно-фазовий стан системи Co/Cu/Fe. Вивчено дифузійні процеси у зразках Co/Cu/Fe/П і Co/Cu/Co/П з додатковими шарами Cr. Для зразків Co/Cu/Fe/П проведено порівняння експериментальних даних з розрахованими за моделлю Р. Дімміха, макроскопічною моделлю та моделлю на основі модифікованої теорії Маядаса і Шатцкеса для ТКО тришарових плівок. Встановлено закономірності в польових залежностях АМО та ГМО для зразків з різною товщиною магнітних, немагнітних та додаткових шарів. Досліджено розмірні залежності питомого опору та МО, а також розрахована чутливість МО плівкових систем до магнітного поля.

**Ключові слова:** полікристалічні плівкові системи, фазовий стан, питомий опір, температурний коефіцієнт опору, гігантський магнітоопір, коерцитивна сила.

## АННОТАЦИЯ

**Коломиец В.Н. Структура, электро- и магниторезистивные свойства многослойных пленочных структур на основе ферромагнитных металлов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет. – Сумы, 2014.

Диссертация посвящена установлению закономерностей формирования кристаллической структуры, фазового состава, электрофизических и магниторезистивных свойств и их взаимосвязи для трёхслойных и многослойных пленок на основе Co, Fe, Ni, Cr, Cu и Ag в интервале толщин  $d = (1 - 50)$  нм при температурах  $T_{изм} = 150$  К и 300 К.

Неотожженные пленочные системы являются поликристаллическими с малым размером зерна (менее 10 нм) и фазовым составом ГПУ-Co+(ГЦК-Cu или ГЦК-Ag)+ОЦК-Fe (система Co/Cu(Ag)/Fe), ГПУ-Co+ГЦК-Cu+(ГЦК-Ni или ОЦК-Cr) (система Co/Cu/Co с дополнительными слоями Ni и Cr). Отжиг при температуре 700 К приводит к увеличению размера зерна в (2 – 20) раз в зависимости от металла и толщины слоев. Для систем Co/Cu/Fe ( $d_{Cu} < 5$  нм) и Co/Cu/Co с дополнительными слоями Ni после отжига при 700 К наблюдается образование твердых растворов  $[\beta-Co,(Fe,Cu)]$  и  $[\beta-Co,(Ni,Cu)]$  соответственно. Для отоженной системы Co/Cu/Co с слоем Cr электронографически фиксируется двухфазный состав Co ( $\alpha$ -Co,  $\beta$ -Co). При увеличении температуры подложки выше 400 К для Co в системе Co/Cu/Fe фиксируется только ГЦК-Co.

Сравнение экспериментальных данных с расчётными по модели Р. Диммиха, макроскопическим подходом и модифицированной теорией Маядаса и Шатцкеса показало, что они совпадают с точностью до 20 %, 30 % и 15 % соответственно.

В неотожженных пленочных системах Co/Cu(Ag)/Fe и Co/Cu/Co со слоями Fe, Ni и Cr при толщинах немагнитного слоя  $d_n = (3 - 25)$  нм (в зависимости от вида пленочной структуры) наблюдается явление гигантского магнитосопротивления. Величина эффекта ГМС для отоженных при температуре 700 К пленок, а также поведение магнитосопротивления в процессе поэтапного отжига при температурах 400 К, 550 К, 700 К определяется толщиной и видом слоев, особенно немагнитного слоя. Установлено, что для всех исследуемых систем (с исходным ГМС) при отжиге до 700 К происходит переход к АМС, кроме пленок системы Co/Cu(Ag)/Fe ( $d_{Cu} = (7 - 15)$  нм,  $d_{Ag} = (12 - 17)$  нм). Максимальное значение эффекта ГМС (1,2 %) получено для неотожженных систем Co/Cu/Fe. При понижении температуры измерения до 150 К амплитуда эффекта ГМС увеличивается в (1,3 – 1,5) раза. Для систем Co/Cu(Ag)/Fe и Co/Cu/Co с дополнительными слоями Fe, Ni, Cr зависимость магнитосопротивления от толщины немагнитного слоя имеет немонотонный характер. Для систем Co/Cu/Co с дополнительным слоем Cr эта зависимость является осциллирующей с двумя явно выраженными максимумами.

**Ключевые слова:** поликристаллические пленочные системы, фазовое состояние, удельное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, гигантское магнитосопротивление, коэрцитивная сила.

**ABSTRACT****Kolomiets V.M. Structure, electro- and magnetoresistive properties of multilayer films' structures based on ferromagnetic metals.**

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, 2014.

The thesis is devoted to determine consistent patterns of forming of crystal structure, phase constitution, electro and magnetoresistive properties and their interconnection for the three-layer and multilayer films based on Co, Fe, Ni, Cr, Cu and Ag in the interval of thicknesses  $d = (1 - 50)$  nm at temperatures  $T = 150$  K and 300 K.

The phase constitution and structure of non-annealed and annealed film systems of Co/Cu(Ag)/Fe and Co/Cu/Co at  $T_{\text{ann}} = 700$  K with additional layers of Ni and Cr were determined, and we also detected the effects of substrate temperature on the structural and phase condition of Co/Cu/Fe system. The diffusion processes in samples of Co/Cu/Fe/S and Co/Cu/Co/S with additional layers of Cr were studied. The approbation of theoretical models of R. Dimmich, macroscopic model and model based on the modified theory of Mayadas and Shatzkes for thermal resistance coefficient of three-layer films was implemented for Co/Cu/Fe/S films. We determined the consistent patterns in the field dependences of anisotropic and giant magneto-resistance for samples with different thickness of magnetic, non-magnetic and extra layers. We investigated the size dependences of the resistivity and magneto-resistance for the investigated film samples and counted out their sensitivity of magneto-resistance to magnetic field.

**Keywords:** polycrystalline film systems, phase condition, resistivity, temperature coefficient of resistance, giant magneto-resistance, coercive force.

Підписано до друку 28.08.2014. Формат 60x90/16. Гарн. New Times.  
Друк ризогр. Папір офсет. Умовн. друк. арк. 0,9.  
Тираж 100 прим.

Надруковано у редакційно-видавничому відділі  
СумДПУ імені А. С. Макаренка з оригіналів автора

40002, м. Суми, вул. Роменська, 87  
e-mail: [rector@sspu.sumy.ua](mailto:rector@sspu.sumy.ua)  
тел.: (0542) 22-14-95