СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Синашенко Оксана Володимирівна

УДК 538.975;971;955

ЕЛЕКТРО- І МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ Cr, Cu ТА Fe В УМОВАХ ВЗАЄМНОЇ ДИФУЗІЇ АТОМІВ

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми - 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Суми.

Науковий керівник – заслужений діяч науки і техніки України, доктор фізико-математичних наук, професор **Проценко Іван Юхимович,** завідувач кафедри прикладної фізики Сумського державного університету.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор **Куницький Юрій Анатолійович**, завідувач відділу фізики наноструктурних матеріалів Технічного центру НАН України (м. Київ);

доктор фізико-математичних наук, професор **Чепурних Геннадій Кузьмич**, провідний науковий співробітник відділу теоретичної фізики Інституту прикладної фізики НАН України (м. Суми).

Захист відбудеться « 23 » вересня 2011 р. о 13-00 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 у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова, 2.

Автореферат розіслано « 04 » серпня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради В.О. Журба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Особливістю багатошарових систем на основі двох чи більше шарів є наявність нових факторів впливу на кінетичні властивості плівок, обумовлених межею поділу (МП) шарів, або т. зв. інтерфейсів. До них належать дифузійні процеси, фазоутворення, інтерфейсний механізм розсіювання електронів, поява макронапружень термічного походження і т.п. Актуальним залишається питання впливу цих факторів на електрофізичні (питомий опір, температурний коефіцієнт опору (ТКО), коефіцієнт тензочутливості) і магніторезистивні властивості плівкових систем, а також побудова відповідних теоретичних моделей.

Широкому застосуванню багатошарових тонкоплівкових структур із спін-залежним розсіюванням електронів у сучасній електроніці та сенсорній техніці сприяло відкриття в них явищ анізотропного та гігантського магнітоопору (ГМО). Таким чином, важливими є встановлення кореляції структурно-фазового стану плівкових систем з їх магніторезистивними властивостями, а також вплив на них таких факторів, як товщина окремих шарів, термообробка, фазоутворення, стабілізація гранульованого стану.

Із вищенаведеного випливає актуальність теми цієї роботи та доцільність вивчення електрофізичних і магніторезистивних властивостей багатошарових плівкових систем, в яких проявляють себе зазначені особливості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету у рамках держбюджетної НДР № 0109U001387 „Фазовий склад, електро- і магніторезистивні властивості плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів" (2009-2011 рр.); спільних проектів науково-технічного співробітництва № 0108U007132 „Електрофізичні властивості (термічний коефіцієнт опору і тензочутливість) багатошарових плівкових систем Cr/Fe і Gd/Fe" (2008-2010 рр.) між Сумським державним університетом та Університетом Барода (м. Вадодара, Індія) та № 0109U004806 „Кристалічна структура, електрофізичні і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових систем на основі Fe і Pt та Fe і Pd" (2009-2010 рр.) між Сумським державним університетом та Інститутом фізики Університету ім. Й. Гутенберга (м. Майнц, Німеччина).

Здобувач брала участь у виконанні названих НДР як виконавець наукових досліджень, а також у підготовці проміжних і остаточних звітів.

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи полягала у встановленні кореляції між електрофізичними і магніторезистивними властивостями та особливостями структурно-фазового стану і дифузійними процесами у багатошарових плівкових системах на основі Fe і Cu або Cr.

Відповідно до мети роботи були розв'язані такі задачі:

– здійснено подальший розвиток феноменологічної теоретичної моделі для ТКО із урахуванням температурної залежності не лише середньої довжини вільного пробігу (СДВП), а й параметрів електроперенесення p, r і Q та здійснено її порівняння з експериментальними результатами;

– вивчено ефекти поверхневого та інтерфейсного розсіювання електронів в тришарових плівкових системах Cu/Fe/Cu і Cr/Fe/Cr;

– проведено експериментальні дослідження процесів фазоутворення і дифузії, а також структурного стану поверхні та інтерфейсів (шорсткості) у двокомпонентних багатошарових плівкових системах на основі Fe і Cr або Cu;

– проведено дослідження магніторезистивного ефекту в тонких плівках Fe і мультишарах на їх основі при трьох геометріях вимірювання, встановлено вплив на його величину умов термообробки;

– здійснено розрахунок величини чутливості опору до магнітного поля досліджуваних мультишарів $[Fe/Cr]_n/П$ і $[Fe/Cu]_n/П$;

– установлено кореляцію між особливостями структурно-фазового стану багатошарових плівкових структур та їх магнітоопором.

Об'єкт дослідження – кінетичні процеси у багатошарових плівкових системах при дії температури і магнітного поля в умовах протікання взаємної дифузії атомів.

Предмет дослідження – електрофізичні і магніторезистивні властивості багатошарових плівкових систем на основі Fe і Cu або Cr.

Методи дослідження: вакуумна пошарова конденсація металів, резистометрія плівкових зразків, електронна мікроскопія та електронографія, атомно-силова мікроскопія, рентгенографія, рентгенівська рефлектометрія, вторинна іонна мас-спектрометрія (ВІМС),оже-електронна спектроскопія (ОЕС).

Наукова новизна отриманих результатів. Проведені у роботі комплексні експериментальні та теоретичні дослідження фізичних властивостей багатошарових плівкових систем дозволили отримати такі нові наукові результати:

1. Удосконалена напівфеноменологічна модель для ТКО багатошарових плівкових систем, яка враховує температурну залежність коефіцієнтів дзеркальності, проходження меж зерен і поділу шарів, що

більш коректно порівняно з відомими моделями описує терморезистивні властивості багатошарових плівок.

2. Уперше проведені комплексні дослідження дифузійних процесів у плівкових системах на основі Fe і Cu та Fe і Cr, які суттєво впливають на електрофізичні властивості, методами ВІМС і ОЕС дозволили розрахувати коефіцієнти зерномежової конденсаційно-стимульованої, іонно-стимульованої та об'ємної термічної дифузії.

3. Методом рефлектометрії вивчені структура інтерфейсів Fe/Cr, Cr/Fe, Fe/Cu і Cu/Fe, їх еволюція при термообробці та вплив на ТКО і магнітоопір (МО).

4. На основі результатів з концентраційної та температурної залежностей магнітоопору мультишарів $[Fe/Cr]_n/П$ і $[Fe/Cu]_n/П$ ($n = 4 – 30$) при трьох геометріях вимірювання встановлені величини концентрацій, при яких МО переходить у ГМО (45 ат.% Fe у випадку системи Fe/Cr та 50 ат.% Fe у випадку системи Fe/Cu).

5. Проведений розрахунок чутливості опору мультишарів $[Fe/Cr]_n/П$ і $[Fe/Cu]_n/П$ до магнітного поля та вивчена її залежність від умов термообробки.

Практичне значення отриманих результатів. Удосконалена теоретична модель дає можливість прогнозувати електрофізичні властивості плівкових матеріалів, що може бути використано при розробці ефективних чутливих елементів термодатчиків і датчиків магнітного поля. Результати проведених досліджень розширюють та поглиблюють розуміння фізичних процесів у плівкових матеріалах в умовах дії температурних і магнітних полів, взаємної дифузії атомів і фазоутворення.

Фундаментальне значення отриманих результатів полягає у можливості подальшого розвитку уявлень про розмірні ефекти в електрофізичних властивостях, процесах дифузії і фазоутворення та магніторезистивних властивостях багатошарових плівкових структур.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень. Автор особисто отримувала зразки, проводила вимірювання, обробку та інтерпретацію отриманих результатів. Самостійно проводила електронографічні та електронно-мікроскопічні дослідження і вимірювання ТКО і МО. Спільно із канд. фіз.-мат. наук, доц. А.І. Салтиковою (Сумський державний педагогічний університет) були проведені дослідження методом вторинної іонної мас-спектрометрії. При консультації проф. М. Маршалек (Інститут ядерної фізики ПАН, м. Краків) були проведені дослідження методом оже-електронної спектрометрії та атомно-силової мікроскопії. Постановку задач

досліджень і узагальнення результатів здійснено спільно з науковим керівником проф. І.Ю. Проценком. Особисто автором підготовлено статті [3, 5, 6, 11] і тези доповідей [12-24]. Матеріали робіт [1, 2, 4, 7-10] обговорювалися разом із співавторами. Основні наукові результати доповідалися особисто автором на наукових семінарах і конференціях.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені і обговорені на таких конференціях: науково-технічних конференціях фізико-технічного факультету (2005, 2006, 2007, 2008 рр.) і факультету електроніки та інформаційних технологій Сумського держуніверситету (Суми, 2009, 2010, 2011 рр.); на Всеукраїнських конференціях „ЕВРИКА" (Львів, 2007, 2009 рр.); XI і XIII Міжнародних конференціях „Фізика і технологія тонких плівок і наноструктур" (Івано-Франківськ, 2007, 2011 рр.); Міжнародній конференції «Сучасні проблеми фізики твердого тіла» (Київ, 2007 р.); 8-й і 9-й Міжнародних конференціях «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, 2007, 2009 рр.); XLI, XLII і XLVI Zakopane School of Physics International Symposium (Закопане, Польща, 2008, 2009, 2011 рр.); II Міжнародній школі-семінарі молодих вчених «Рост кристаллов» (Харків, 2008 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2008 р.); Міжнародній конференції «Фізика, технічні науки: стан, досягнення і перспективи» (Полтава, 2008 р.); 2-й Всеукраїнській науковій конференції молодих вчених «Фізика низьких температур» (Харків, 2009 р.); Міжнародній науковій конференції «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур» (Харків, 2009, 2010 рр.); «International Conference on Trends and Advances in Computation and Engineering» (Бхопал, Індія, 2010 р.); «International Workshop Magnetic Phenomena in Micro- and Nano-Structures» (Донецьк, 2010 р.); II Міжнародній конференції «Сучасні проблеми фізики конденсованого стану» (Київ, 2010 р.); II Міжнародній науковій конференції «Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь, Россия, Украина» (Київ, 2010 р.).

Публікації. Основні матеріали дисертації відображені у 28 публікаціях, основними з них є 24 роботи, серед них 9 статей, опублікованих у фахових наукових журналах та 13 тез доповідей.

Структура і зміст роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 157 сторінки, із них 80 сторінок основного тексту, 39 рис. і 17 табл. на 42 окремих аркушах, список використаних джерел із 232 найменувань на 24 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні задачі досліджень, зазначені методи досліджень, відзначені новизна, практичне значення та відомості про апробацію отриманих результатів, наведені дані про структуру роботи, особистий внесок автора.

У першому розділі *«Електрофізичні і магніторезистивні властивості багатошарових плівкових систем (літературний огляд)»* наведено аналітичний огляд теоретичних моделей для ТКО дво- та багатошарових плівкових систем і магнітоопору. Зокрема, показано, що модель Р. Дімміха, незважаючи на свою фізичність, має незадовільну відповідність експериментальним даним, що пов'язано із великою кількістю параметрів, які важко розрахувати або визначити експериментально. Відмічено, що значну роль у електрофізичних властивостях багатошарових систем відіграють дифузійні процеси та фазоутворення на межі поділу шарів.

Аналіз експериментальних і теоретичних даних показав, що, крім товщин магнітних шарів та немагнітних прошарків, кількості фрагментів та умов термообробки, важливими чинниками впливу на величину МО або ГМО є процеси фазоутворення та взаємної дифузії компонент, а також структурні характеристики інтерфейсів. Але такі дослідження проведені не в повному обсязі і потребують узагальнення. Отже, основним напрямком досліджень було встановлення особливостей структурно-фазового стану і дифузійних процесів у багатошарових плівкових системах на основі Fe і Cu або Cr та їх впливу на електрофізичні та магніторезистивні властивості цих систем.

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

Плівкові системи отримували пошаровою конденсацією у вакуумі в двох режимах – з малою ($\omega \cong 0{,}01$ нм/с, $p = 10^{-7}$ Па) та середньою швидкостями конденсації ($\omega \cong 1\text{-}3$ нм/с, $p = 10^{-4}$ Па). Для контролю товщини плівок у процесі конденсації застосовувався метод кварцового резонатора, а для контролю загальної товщини багатошарових систем – інтерферометричний метод. Залежність питомого опору і ТКО від температури відпалювання вивчалася резистивним методом із застосуванням цифрового вольтметра АРРА-109 (точність вимірювання електричного опору ±0,06%). Вимірювання магнітоопору здійснювалося при трьох геометріях орієнтації ліній магнітного

поля відносно струму (поздовжній, поперечній і перпендикулярній). Величина МО визначалася за співвідношенням $\Delta R/R_s = (R(B)\text{-}R_s)/R_s$, де $R(B)$ і R_s – опір при заданому полі B і полі насичення.

Дослідження фазового складу та структури плівкових зразків з метою отримання інформації про кристалічну гратку (її тип та параметри) і середній розмір кристалітів проводилося при використанні електронографічного, електронно-мікроскопічного (прилад з високою роздільною здатністю ПЕМ-125К) та рентгенографічного (прилад X'Pert MRD Pro) методів. Дифузійні процеси вивчалися за допомогою методів ВІМС (МС-7201М) та ОЕС. Методами рентгенівської рефлектометрії (X'Pert MRD Pro) і атомно-силової мікроскопії проведені дослідження шорсткості інтерфейсів та поверхні зразків.

Третій розділ *«Електрофізичні властивості багатошарових плівкових систем на основі Fe і Cr або Fe і Cu»* складається із трьох підрозділів.

У *першому підрозділі* порівнюється з експериментальними даними вдосконалена напівфеноменологічна модель ТКО для дво- та багатошарових плівкових систем, яка враховує температурні ефекти у СДВП електронів λ_0, а також у параметрах електроперенесення p, r і Q. Вищеназвані ефекти враховуються відповідними термічними коефіцієнтами: $\beta_{0i} = \frac{d \ln \lambda_{0i}}{dT}$, $\beta_{pi} = \frac{d \ln p_i}{dT}$, $\beta_{ri} = \frac{d \ln r_i}{dT}$, $\beta_{Qij} = \frac{d \ln Q_{ij}}{dT}$.

Кінцева формула для ТКО тришарової плівкової системи має вигляд

$$\beta = A_1\left\{\beta_{01} - \left(1 - \frac{\beta_1}{\beta_{01}}\right)\cdot\left[\left(2\beta_{01} + \beta_{r1}\cdot\frac{\partial \ln m_1}{\partial \ln r_1} + \beta_{p1}\cdot\frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln p_1} + \beta_{Q_{12}}\cdot\frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln Q_{12}}\right) + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \left(2\beta_{02} + \beta_{r2}\cdot\frac{\partial \ln m_2}{\partial \ln r_2} + \beta_{p2}\cdot\frac{\partial \ln k_2}{\partial \ln p_2} + \beta_{Q_{21}}\cdot\frac{\partial \ln k_2}{\partial \ln Q_{21}}\right)\cdot\frac{\beta_{01}}{\beta_{02}}\right]\right\} + \ldots + \quad (1)$$
$$+ A_3\left\{\beta_{03} - \left(1 - \frac{\beta_3}{\beta_{03}}\right)\cdot\left[\left(2\beta_{03} + \beta_{r3}\cdot\frac{\partial \ln m_3}{\partial \ln r_3} + \beta_{p3}\cdot\frac{\partial \ln k_3}{\partial \ln p_3} + \beta_{Q_{32}}\cdot\frac{\partial \ln k_3}{\partial \ln Q_{32}}\right) + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \left(2\beta_{02} + \beta_{r2}\cdot\frac{\partial \ln m_2}{\partial \ln r_2} + \beta_{p2}\cdot\frac{\partial \ln k_2}{\partial \ln p_2} + \beta_{Q_{23}}\cdot\frac{\partial \ln k_2}{\partial \ln Q_{23}}\right)\cdot\frac{\beta_{03}}{\beta_{02}}\right]\right\},$$

де $A_i = d_i\sigma_{0i}F_i / \sum_{i=1}^{3} d_i\sigma_{0i}F_i$ – статистична вага i-го шару в загальну величину ТКО (σ_{0i} – питома провідність масивного зразка; F_i – функція Фукса, яка визначає вплив товщини шарів на їх провідність);

$k_i = \frac{d_i}{\lambda_{0i}}$ і $m_i = \frac{L_i}{\lambda_{0i}}$ – зведені товщина і середній розмір зерна.

Параметри, що входять до співвідношення (1), розраховуються для кожного шару окремо, виходячи із значень двох груп величин λ_0, p і r, отриманих для різних температур із застосуванням до розмірних залежностей $\beta(d)$ лінеаризованої та моделі ізотропного розсіювання Тельє, Тоссе і Пішар. Порівняння експериментальних і розрахункових величин ТКО для дво-, три- і чотиришарових плівкових систем показало відповідність запропонованої теорії до експериментальних результатів з точністю до 20%, що дозволяє стверджувати про коректність теоретичної моделі.

У *другому підрозділі* вивчено інтерфейсне розсіювання електронів у тришарових полікристалічних плівках на основі методики де Врайса, в основу якої покладена теоретична модель Р. Дімміха для граничного випадку, коли товщина проміжного шару прямує до нуля. Ця методика дозволяє оцінити сумарну величину коефіцієнтів дзеркальності зовнішніх поверхонь і проходження інтерфейсу, а також вплив на неї зерномежового розсіювання (ЗМР) при вимірюванні питомої провідності тришарових плівок. Нами вивчалися дві серії тришарових плівкових систем: Cu/Fe/Cu і Cr/Fe/Cr при різних товщинах проміжного шару Fe (рис.1 а, б). При цьому товщина плівки Cu і Cr витримувалася постійною і такою, що дорівнює 20 нм.

Для граничного випадку, коли товщина проміжного шару прямує до нуля, вираз згідно з де Врайсом для питомої провідності плівки Cu або Cr буде мати вигляд

$$\frac{\sigma}{\sigma_\infty} \cong 1 - \frac{3}{16k}(2 - p - \mathrm{Q}), \qquad (2)$$

де σ була отримана екстраполяцією на нуль залежності питомої провідності системи від товщини проміжного шару (рис. 1 в, г).

Величина p+Q для випадку фуксівського і маядасівського (із урахуванням ЗМР) наближень дорівнює 0,6 (Fe/Cr) і 0,8 (Fe/Cu) та 0,7 (Fe/Cr) і 1,2 (Fe/Cu) відповідно. Якщо розглянути типове значення коефіцієнта дзеркальності $p \cong 0{,}2$, то можна провести оцінку коефіцієнта проходження електроном інтерфейсу: $\mathrm{Q} \cong 0{,}5$ (Fe/Cr) і 1,0 (Fe/Cu) в маядасівському наближенні, що якісно узгоджується з типовим значенням коефіцієнта проходження зерен електроном.

Для спостереження і коректного обговорення результатів вивчення ГМО у системах Fe/Cu(Cr) важливим є формування багатошарових структур з тонкими шарами та дослідження в них фазового складу, дифузійних процесів і структурного стану інтерфейсів.

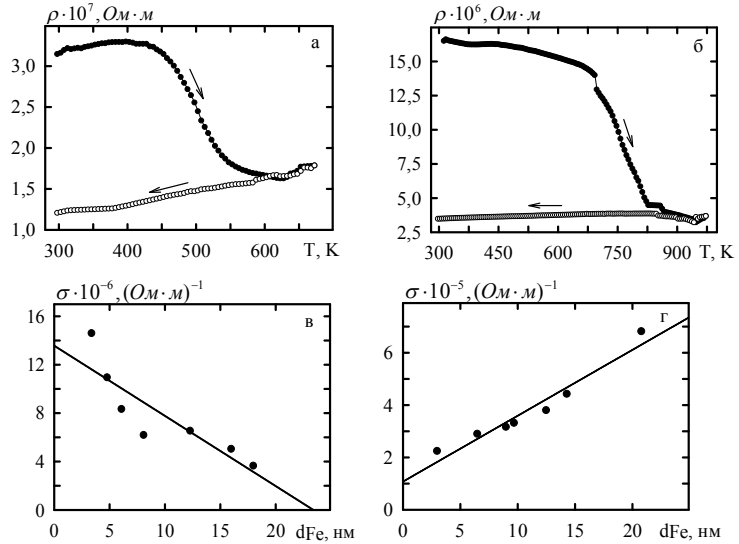

Рис.1. Температурні залежності питомого опору (а, б) та залежності питомої провідності від товщини проміжного шару Fe (в, г) для плівкових систем Cu(20)/Fe(d_{Fe})/Cu(20)/П (а,в) і Cr(20)/Fe(d_{Fe})/Cr(20)/П (б, г). Товщина d_{Fe}, нм: а – 6,1; б –6,5

Результати електронографічних та рентгенографічних досліджень незалежно від товщини шарів (2-10 нм) плівкової системи на основі Fe і Cu свідчать про наявність у ній двох фаз ГЦК Cu + ОЦК Fe з параметрами ґратки $\bar{a}$(Cu) = 0,361 ± 0,001 нм і $\bar{a}$(α-Fe) = 0,286 ± 0,001 нм, а при тонких шарах $d_{Fe} \cong d_{Cu} \cong 2$ нм спостерігаються слабкі лінії від оксиду Fe_3O_4 (рис. 2).

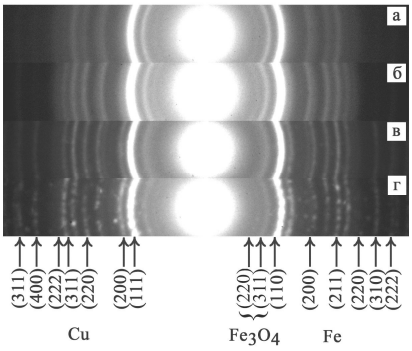

Рис. 2. Електронограми від плівкової системи $[Cu(2)/Fe(2)]_4$ у невідпаленому (а, б) та відпаленому до $T_в$ = 570 (в), 670 (г) і 770 К (д) станах

Дослідження фазового стану плівкових систем Fe/Cr свідчать про наявність ОЦК-фази з параметром ґратки $\bar{a} = 0{,}288 \pm 0{,}001$ нм та $\bar{a} = 0{,}289 \pm 0{,}001$ нм відповідно до та після термовідпалювання до $T_в = 650$ К, яка відповідає твердому розчину т.р.(α-Fe, Cr). При цьому плівкова система характеризується дрібнодисперсною кристалічною структурою, характер якої не змінюється після термообробки.

За даними рентгенівської рефлектометрії (рис. 3, табл. 1), було показано, що у невідпаленому стані якість інтерфейсів у системі Fe/Cr ($\sigma_{Fe/Cr} = 0{,}2$ нм і $\sigma_{Cr/Fe} = 1{,}2$ нм) дещо краща порівняно із Fe/Cu ($\sigma_{Fe/Cu} = 1{,}2$ нм і $\sigma_{Cu/Fe} = 1{,}4$ нм). Після термообробки до 700 К шорсткість значно збільшується у випадку системи Fe/Cr ($\sigma_{Fe/Cr} = 1{,}4$ нм і $\sigma_{Cr/Fe} = 2$ нм) та незначно – у випадку системи Fe/Cu ($\sigma_{Fe/Cu} = 1{,}7$ нм і $\sigma_{Cu/Fe} = 1{,}6$ нм), що пояснюється рекристалізаційними

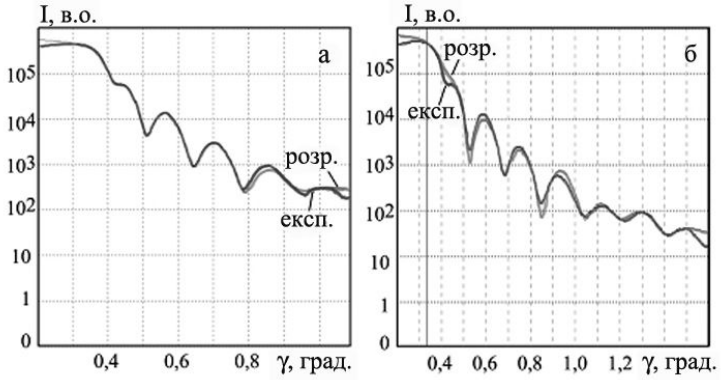

Рис. 3. Рентгенівські рефлектометричні залежності для плівкової системи [Cr(5)/Fe(5)]$_2$/П до (а) та після відпалювання до 700 К (б)

Таблиця 1

Результати розрахунків товщини і шорсткості окремих шарів для плівкової системи [Cr(5)/Fe(5)]$_2$/П

Невідпалена			Відпалена до 700 К		
шар	d, нм	σ, нм	шар	d, нм	σ, нм
підкладка	-	1,1	підкладка	-	1,1
Fe	4,8	0,21	Fe	5,4	1,42
Cr	5,9	1,14	Cr	5,6	2,10
Fe	4,9	0,16	Fe	5,9	1,37
Cr	6,9	1,37	Cr	6,1	1,87
$\bar{\sigma}_{Fe/Cr} = 0{,}2$ нм; $\bar{\sigma}_{Cr/Fe} = 1{,}2$ нм			$\bar{\sigma}_{Fe/Cr} = 1{,}4$ нм; $\bar{\sigma}_{Cr/Fe} = 2{,}0$ нм		

процесами. При цьому величина шорсткості інтерфейсу немагнетик/магнетик $\sigma_{нм/м}$ перевищує величину $\sigma_{м/нм}$, що корелює з величиною коефіцієнтів конденсаційно-стимульованої дифузії (дифузія атомів Fe у шар Cu або Cr значно переважає над дифузією у зворотному напрямку, що фіксується результатами ВІМС). Згладжування інтерфейсів у випадку системи Fe/Cr, що характеризується утворенням твердих розчинів по всьому об'єму, можна пояснити інтенсивною поверхневою та зерномежовою дифузією атомів верхнього шару вздовж інтерфейсів.

Дослідження дифузійних процесів у плівкових системах на основі Fe і Cr або Cu проводилися за допомогою двох експериментальних методик – ВІМС та ОЕС. Основна увага була приділена вивченню таких видів дифузії, як конденсаційно-стимульована (КСД), іонно-стимульована дифузія (ІСД) та термодифузія (ТД). Аналіз КСД і ТД методом ВІМС проводився на основі дифузійних профілів, які у випадку невідпалених зразків мають різний характер: спостерігається часткове їх перекриття у випадку системи Cu/Fe та повне перемішування атомів у системі Fe/Cr (рис. 4 а). Після термовідпалювання спостерігається подальше перекриття профілів у Cu/Fe та поява нечіткої межі поділу між шарами, яка збігається з площиною Матано (ПМ) у випадку системи Fe/Cr (рис. 4 б).

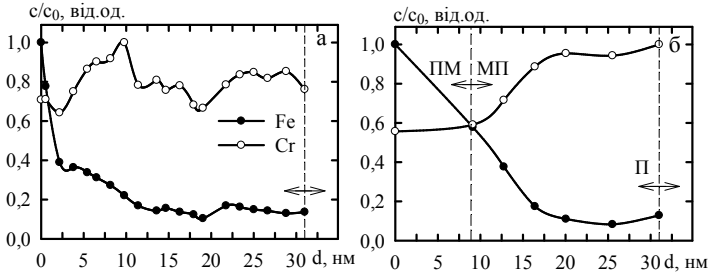

Рис. 4. Дифузійні профілі для плівкової системи Fe(10)/Cr(21)/П у невідпаленому (а) та відпаленому до 900 К (б) станах

Розрахунок ефективних коефіцієнтів дифузії показав, що величина коефіцієнта КСД на два порядки більша за величину ТД, що пояснюється насиченням меж зерен атомами іншого сорту вже на стадії конденсації верхнього шару. При цьому за результатами, отриманими методом ОЕС (рис. 5), значення коефіцієнтів КСД ($D_{Cu\to Fe} = 0{,}30\cdot10^{-19}$ м^2/с, $D_{Fe\to Cu} = 0{,}25\cdot10^{-19}$ м^2/с, $D_{Cr\to Fe} = 0{,}50\cdot10^{-19}$ м^2/с, $D_{Fe\to Cr} = 0{,}90\cdot10^{-19}$ м^2/с) на два-три порядки менші порівнянно з методом ВІМС ($D_{Cu\to Fe} = 87{,}7\cdot10^{-19}$ м^2/с, $D_{Fe\to Cu} = 248{,}9\cdot10^{-19}$ м^2/с,

$D_{Cr\to Fe} = 4{,}4\cdot10^{-19}$ м^2/с, $D_{Fe\to Cr} = 19{,}6\cdot10^{-19}$ м^2/с), що обумовлено іонно-стимульованою дифузією атомів у другому випадку.

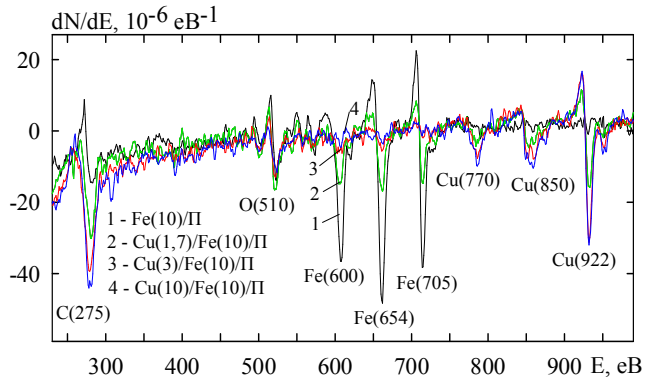

Рис. 5. Високоенергетичні оже-спектри від плівкової системи Cu(10)/Fe(10)/П

Електронно-мікроскопічні дослідження зразків $[Fe/Cr]_n$, отриманих у режимі із середньою швидкістю конденсації без витримки окремих шарів, свідчать про дрібнодисперсну структуру у випадку анізотропних зразків (з анізотропією МО) і лабіринтоподібну структуру (ЛПС) у випадку зразків з ознаками ГМО (рис. 6). ЛПС являє собою ланцюжок контактуючих гранул, що формуються у кластери. Термообробка зразків у широкому інтервалі температур (300 – 900 К) приводить до збільшення та структурованості лабіринтних доменів (рис. 6 б), розміри і відстань між якими починають перевищувати СДВП електронів провідності, що безпосередньо впливає на магніторезистивні властивості цих систем. Розшифрування дифракційних картин від

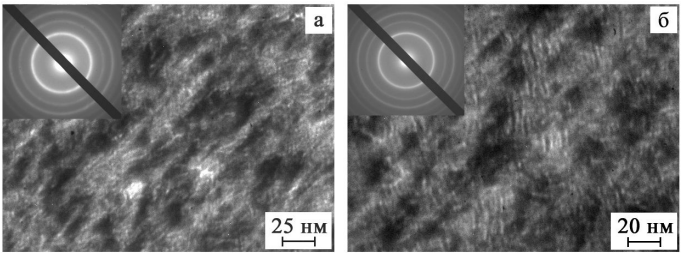

Рис. 6. Кристалічна структура та дифракційні картини (на вставках) від плівкової системи $[Fe(2,7)/Cr(2,7)]_{15}$/П у невідпаленому (а) та відпаленому $T_в$ = 700 К (б) станах

цих систем свідчить про утворення в них т.р. (α-Fe, Cr).

Дослідження структурно-фазового стану плівкових систем $[Fe/Cu]_n$, отриманих у режимі із середньою швидкістю конденсації без витримки окремих шарів, свідчать про утворення в них твердого розчину. Зважаючи на це, при товщинах шарів $d_{Fe} \le 1{,}5$ нм т.р. (α-Fe, Cu) формується на основі ГЦК–ґратки Cu, а в діапазоні товщин $1{,}5 < d_{Fe} \le 2$ нм – на основі ОЦК–ґратки Fe. У першому випадку магніторезистивний ефект не спостерігався, що пов'язано із малими ефективними товщинами шарів Fe.

У третьому підрозділі проведено аналіз електрофізичних властивостей (питомий опір і ТКО) дво- та багатошарових плівкових систем на основі Fe і Cu або Cr та здійснено порівняння отриманих експериментальних даних з результатами розрахунку за феноменологічними моделями для ТКО. Апробація теоретичних моделей підтвердила зроблений раніше висновок про фазовий стан у плівкових системах, а саме про відповідність системи Fe/Cu біпластині, в якій зберігається індивідуальність окремих шарів, та системи Fe/Cr або Fe/Cu з тонкими шарами, отриманими із середньою швидкістю конденсації, плівковому сплаву.

Четвертий розділ *«Магніторезистивні властивості багатошарових плівкових систем на основі Fe і Cr або Cu»* складається із двох підрозділів.

У першому підрозділі подано результати досліджень МО у плівках Fe та мультишарах на їх основі. Для тонких плівок Fe характерна анізотропність польових залежностей R від B, що характеризується від'ємним МО в повздовжній геометрії (коли опір зростає зі збільшенням прикладеного магнітного поля) і додатним – у поперечній геометрії. Залежності амплітуди МО від $T_в$ для різних товщин показані на рис. 7.

Відмічено, що коерцитивна сила, визначена із залежності МО(B), не збігається із фактичною H_c, але при цьому передає якісну ін формацію про поведінку тонкої плівки в процесі перемагнічування. За аналогією до H_c індукція, яку необхідно прикласти для повного розмагнічування зразка, названа індукцією розмагнічування B_c. Переважання величин B_c і B_s у поперечній геометрії свідчить про існування осі легкого намагнічування у плівках Fe уздовж лінії протікання струму.

Помічено, що при концентрації магнітної компоненти $c_{Fe} \ge 45$ ат.% для системи Fe/Cr характерна ізотропність польових залежностей $R(B)$, що є ознакою ГМО, яка зникає при відпалюванні вище 700 К (рис. 8). Привертають увагу великі значення B_s (> 0,2 Тл), характерні для мультишарів із ГМО.

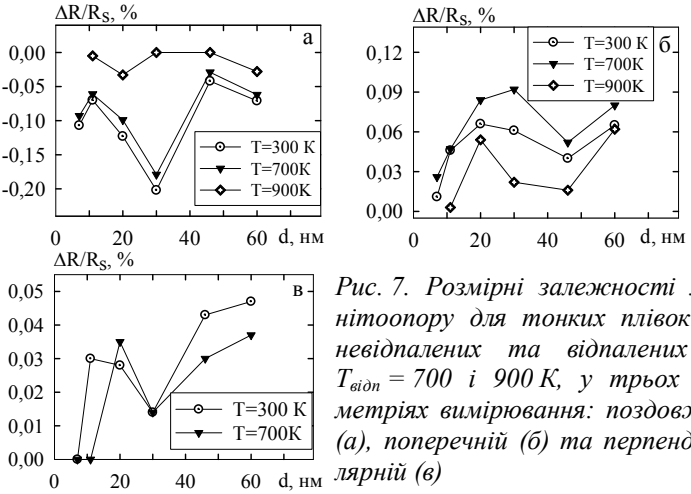

Рис. 7. Розмірні залежності магнітоопору для тонких плівок Fe, невідпалених та відпалених до $T_{відп}$ = 700 і 900 К, у трьох геометріях вимірювання: поздовжній (а), поперечній (б) та перпендикулярній (в)

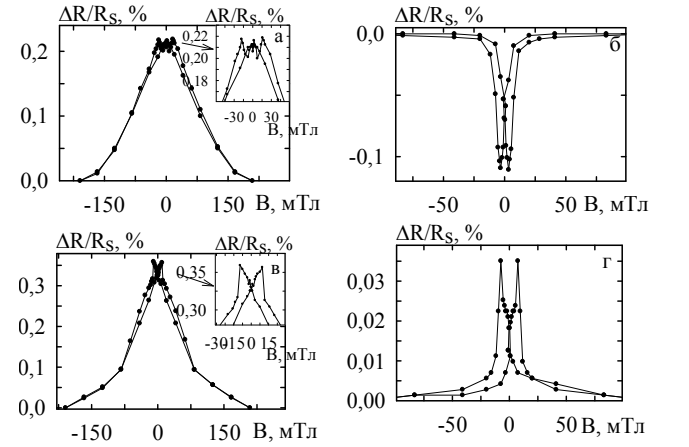

Рис. 8. Залежність МО від індукції магнітного поля для плівкової системи $[Fe(2,3)/Cr(2,8)]_{15}$/П, невідпаленої (а, в) та відпаленої до $T_{відп}$ = 900 К (б, г), у поздовжній (а, б) та поперечній (в, г) геометріях вимірювання

У багатошарових системах на основі фрагментів Fe/Cu у більшості випадків спостерігається ізотропність польових залежностей, що зникає при $c_{Fe} < 50$ ат.%. При цьому значення МО значно збільшуються (від 0,01-0,05 % до 0,1-0,2 %), що може слугувати підтвердженням існування ГМО у цій системі (рис. 9, табл. 2). Термообробка

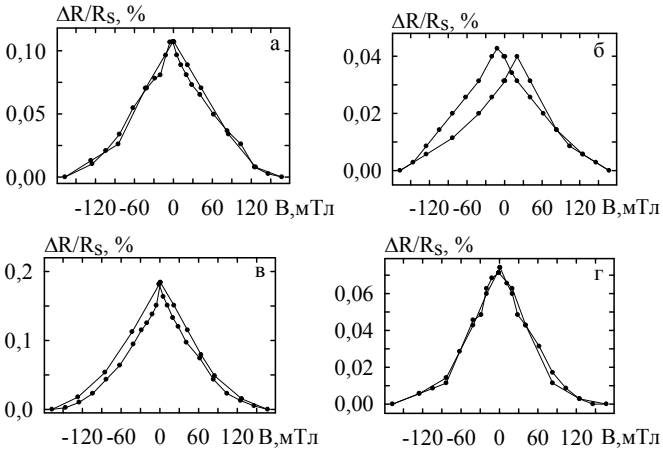

Рис. 9. Залежність МО від індукції магнітного поля для плівкової системи $[Fe(1,6)/Cu(1,73)]_{30}$/П, невідпаленої (а, в) та відпаленої до $T_{відп}$ = 850 К (б, г), у поздовжній (а, б) та поперечній (в, г) геометріях вимірювання

Таблиця 2

Значення МО у трьох геометріях вимірювання для невідпалених і відпалених до $T_{відп}$ = 850 К мультишарів $[Fe/Cu]_n$

Зразок	Загальна товщина, нм	c_{Fe}, ат.%	$\Delta R/R_s$, %					
			повздовжня геометрія		поперечна геометрія		перпендикулярна геометрія	
			300 К	850 К	300 К	850 К	300 К	850 К
$[Fe(1,6)/Cu(1,7)]_{30}$/П	100	48	0,107	0,043	0,184	0,074	0,114	0,059
$[Fe(1,4)/Cu(1,7)]_{15}$/П	46	46	-0,140	-0,063	0,055	0,032	0,069	0,037
$[Fe(2,2)/Cu(1,7)]_{15}$/П	58	57	-0,139	0	0,037	0,030	0,013	0,017
$[Fe(2,9)/Cu(1,7)]_{15}$/П	69	62	-0,124	-0,116	0,010	0,014	0,020	0,034
$[Fe(1,9)/Cu(1)]_{30}$/П	89	65	-0,025	–	0,014	–	0,075	–
$[Fe(2)/Cu(0,6)]_{15}$/П	39	77	-0,048	-0,015	0,015	0,033	-0,032	0,023
$[Fe(2,5)/Cu(0,6)]_{15}$/П	47	81	-0,063	-0,026	0,118	0,044	0,078	0,045
$[Fe(3,7)/Cu(0,4)]_{15}$/П	61	90	-0,023	0,010	0,043	0,023	0,045	0,026

зразків у випадку обох систем привела до зменшення МО на порядок, що пояснюється збільшенням гранул у першому випадку або розмиттям інтерфейсів – у другому.

У другому підрозділі відмічено, що, крім величини МО, значну роль у приладобудуванні відіграє величина поля насичення B_S. Введення терміна чутливості опору до магнітного поля дає можливість врахувати обидві ці величини:

$$S_B = \left| \frac{(\Delta R / R(B_S))_{\max}}{\Delta B} \right|, \qquad (3)$$

де $(\Delta R / R(B_S))_{\max}$ – максимальне значення МО; ΔB – зміна магнітної індукції від насичення (або максимальної величини) B_s до розмагнічування B_c, величина якої фактично дорівнює $\Delta B = B_s + B_c$.

Здійснено розрахунок чутливості опору до магнітного поля плівок Fe та мультишарів $[Fe/Cr]_n/П$ і $[Fe/Cu]_n/П$; відповідно до отриманих даних у невідпалених зразках величина $S_B = (1–3)\ \%\cdot Тл^{-1}$ і після відпалювання до 900 К зменшується до $(0{,}1–1)\ \%\cdot Тл^{-1}$.

Проведено узагальнення результатів досліджень магніторезистивного ефекту та кореляцію його зі структурно-фазовим станом плівок. Зроблено висновок, що у плівковій системі на основі Fe і Cu, де спостерігається збереження індивідуальності окремих шарів, явище ГМО відбувається за рахунок спін-залежного розсіювання електронів на інтерфейсах. У системі ж на основі Fe і Cr явище реалізується за рахунок розсіювання на дрібних гранулах лабіринтоподібної структури.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана задача дослідження електрофізичних і магніторезистивних властивостей дво- і багатошарових плівкових систем на основі Fe і Cr або Cu та встановлена їх кореляція з такими фізичними процесами, як фазоутворення, взаємна дифузії атомів, дія температури і магнітного поля.

Основні результати роботи можна сформулювати таким чином:

1. Проведені комплексні дослідження взаємозв'язку електрофізичних і магніторезистивних властивостей одношарових плівок Fe, Cr і Cu, мультишарів на їх основі $[Fe/Cr]_n/П$ і $[Fe/Cu]_n/П$ $(n = 4 \div 30)$ та процесів розсіювання електронів, взаємної дифузії атомів і формування структурно-фазового стану:

– розраховані величина λ_0, а також параметри електроперенесення p і r, що характеризують поверхневе та зерномежове розсіювання елект-

ронів; вони відповідно дорівнюють 33 нм, 0,22 і 0,98 (Cu) та 35 нм, 0,04 і 0,95 (Cr);

– вперше оцінена сумарна величина коефіцієнтів поверхневого та інтерфейсного розсіювання електронів у тришарових плівкових системах: $p+Q \cong 1{,}2$ (Cu/Fe/Cu) і 0,7 (Cr/Fe/Cr) при маядасівському наближенні та методом рентгенівської рефлектометрії вивчена структура інтерфейсів Fe/Cr, Cr/Fe, Fe/Cu і Cu/Fe;

– розраховані коефіцієнти зерномежової конденсаційно-стимульованої, іонно-стимульованої та об'ємної термічної дифузії на основі комплексних досліджень дифузійних процесів методами ВІМС і ОЕС;

– установлено, що в мультишарах на основі Fe/Cr вже на стадії конденсації відбувається утворення т.р.(α-Fe, Cr), який термічно стабільний; плівкові системи на основі фрагментів Fe/Cu, отримані при малих швидкостях конденсації ($\omega \cong 0{,}01$ нм/с), до та після термовідпалювання до 770 К мають фазовий склад ГЦК-Cu+ОЦК-Fe, а при середніх швидкостях конденсації ($\omega \cong$ 1-3 нм/с) – т.р. (α-Fe, Cu) на основі ГЦК–ґратки (при товщинах шарів $d_{Fe} \leq 1{,}5$ нм) або ОЦК–ґратки α-Fe (в інтервалі товщин $1{,}5 < d_{Fe} \leq 2$ нм).

2. Здійснено подальший розвиток феноменологічної моделі для ТКО із урахуванням температурної залежності не лише середньої довжини вільного пробігу, а й параметрів електроперенесення p, r і Q:

– розраховано термічні коефіцієнти β_p і β_r;

– проведено порівняння розрахункових та експериментальних даних для ТКО систем на основі Cu і Cr, невідповідність між якими складає не більше 20 %.

3. Отримані нові дані про концентраційні та температурні залежності магнітоопору мультишарів $[Fe/Cr]_n$/П і $[Fe/Cu]_n$/П (n = 4–30) при трьох геометріях вимірювання, відповідно до яких установлено:

– для системи Fe/Cr при $c_{Fe} \geq 45$ ат.% характерна ізотропність польових залежностей $R(B)$, що є ознакою ГМО, яка зникає при відпалюванні вище 700 К;

– у системі Fe/Cu проявляється анізотропія залежностей $R(B)$ при концентрації $c_{Fe} > 50$ ат.%, яка зникає при зменшенні c_{Fe};

– для магніторезистивного ефекту в плівковій системі Fe/Cu характерні мала величина (0,05 %) для невідпалених зразків та її збільшення до 0,2 % після термообробки;

– термовідпалювання зразків, збільшення товщини немагнітного прошарку та зменшення товщини магнітного шару приводять до загального зменшення значення МО в плівкові системі Fe/Cr, що пояснюється зникненням антиферомагнітної обмінної взаємодії між гранулами Fe;

– термовідпалювання зразків сприяє збільшенню величини коерцитивності B_c у системі Fe/Cu (у 2-5 разів) та її зменшенню в системі Fe/Cr (у 2 рази), а також значному зменшенню індукції насичення B_s, що пояснюється рекристалізаційними процесами, а відповідно і збільшенням розміру доменів.

4. Здійснено розрахунок чутливості опору до магнітного поля плівок Fe та мультишарів $[Fe/Cr]_n/П$ і $[Fe/Cu]_n/П$; у невідпалених зразках величина $S_B = (1–3)\ \%\cdot Тл^{-1}$ і після відпалювання до 900 К зменшується до $(0{,}1–1)\ \%\cdot Тл^{-1}$.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Protsenko S.I. Diffusion processes in nanoscale two-layer film systems based on Fe and Cu or Fe and Cr [текст] / [S.I. Protsenko, **O.V. Synashenko**, Y. Zabila, M. Marszalek] // J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2011. – V. 5, № 4. – P. 787–790.
2. **Сынашенко О.В.** Магниторезистивные свойства пленок Fe и мультислоев на их основе [текст] / [О.В. Сынашенко, Д.Н. Кондрахова, И.Е. Проценко] // Журн. нано- та електрон. фіз. – 2010. – Т. 2, № 4. – С. 96–114.
3. **Synashenko O.V.** Magnitoresistive properties of multilayer film systems based on Fe/Cu and Fe/Cr [текст] / [O.V. Synashenko, C.J. Panchal, I.Yu. Protsenko] // J.Nano- Electron. Phys. – 2009. – V. 1, № 3. – С. 16–23.
4. **Сынашенко О.В.** Магниторезистивные свойства многослойных наноразмерных пленочных систем [текст] / [О.В. Сынашенко, Е.П. Ткач, И.П. Бурык, Л.В. Однодворець, С.И. Проценко, Н.И. Шумакова] // ВАНТ. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2009. –№ 6. – С. 169–174.
5. **Сынашенко О.В.** Диффузионные процессы и интерфейсное рассеяние электронов в пленочных системах на основе Cu/Fe и Fe/Cr [текст] /[О.В. Сынашенко, А.И. Салтыкова, И.Е. Проценко] // Журн. нано- та електрон. фіз. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 89–100.
6. Kac M. Swift iodine ion modification of the structural and magnetotransport properties of Fe/Cr systems [текст] / [M. Kac, J. Zukrowski, M. Toulemonde, R. Kruk, V. Tokman, A. Polit, Y. Zabila, A. Dobrovolska, **O. Synashenko**, M. Marszalek] // Nucl. Instr. and Meth. B.– 2009. – V. 267. – P. 925–930.
7. Odnodvorets L. Electrophysical properties of Ni/V and Cr/Fe multilayer films [текст] / [L. Odnodvorets, S. Protsenko, **O. Synashenko**,

D. Velykodnyi, I. Protsenko] // Cryst. Res. Technol.– 2008. – V. 44. – P. 74–81.
8. Проценко С.І. Структурно-фазовий стан, стабільність інтерфейсів та електрофізичні властивості двошарових плівкових систем [текст] / [С.І. Проценко, І.В. Чешко, Д.В. Великодний, І.М. Пазуха, Л.В. Однодворець, І.Ю. Проценко, **О.В. Синашенко**] // Успехи физ. мет. – 2007. – Т. 8, № 4. – С. 247–278.
9. Проценко С.І. Внесок температурних ефектів у термічний коефіцієнт опору багатошарових плівкових систем [текст] / [С.І. Проценко, **О.В. Синашенко**, А.М. Чорноус] // Металлофиз. новейшие технол. – 2005. – Т. 27, № 12. – С. 1621–1633.
10. Электрофизические и магниторезистивные свойства наноразмерных пленочных систем на основе Fe и Pd или Fe и Cu [текст]: материалы IV Международной научной конференции «Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур» / [Е.П. Ткач, **О.В. Сынашенко**, Л.В. Однодворец, А.В. Пилипенко, И.Е. Проценко]. – Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2010. – С. 38–42.
11. Магніторезистивні та магнітооптичні властивості нанокристалічних плівкових матеріалів на основі Co, Cu, Ag, Au та Fe [текст]: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Фізика, технічні науки: стан, досягнення і перспективи» / [**О. Синашенко**, І. Чешко, С. Проценко, Н. Шумакова]. – Полтава: ПДПУ ім. В.Г. Короленка, 2008. – С. 11–15.
12. Magnetoresistive properties of Fe/Cu multiayers [текст]: XLVI Zakopane school of physics international symposium / [**O. Synashenko**, D.M. Kondrahova, I.Yu. Protsenko, M. Marszalek]. – 2011. – P.143.
13. Магниторезистивные свойства многослойных пленочных материалов с различной степенью взаимной растворимости [текст]: тезисы II Международной научной конференции «Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь, Россия, Украина» / [Л.В. Однодворец, **О.В. Сынашенко**, И.Е. Проценко]. – Киев: Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАНУ, 2010. – С. 611.
14. Магніторезистивні властивості плівкових матеріалів на основі Fe і Pd та Fe і Cu [текст]: матеріали II-ї Міжнародної конференції «Сучасні проблеми фізики конденсованого стану» / [Л.В. Однодворець, **О.В. Синашенко**, О.П. Ткач, І.Ю. Проценко]. – Київ: КНУ ім. Т. Шевченка, 2010. – С. 17.
15. Crystal structure and magnetoresistance of multilayer films based on Fe and Pd or Cr [текст]: International Workshop Magnetic Phenomena in Micro- and Nano-Structures / [I.V. Cheshko, S. Nepijko,

L.V. Odnodvorets, **O.V. Synashenko**, O.P. Tkach, I.Yu. Protsenko]. – Донецк: ДНУ, 2010. – С. 158–159.

16. Диффузионные процессы в двухслойных пленочных системах на основе Fe и Cr или Fe и Cu [текст]: матеріали 9-ї Міжнародної конференції «Фізичні явища в твердих тілах» / [**О.В. Сынашенко**, А.И. Салтыкова, Х. Ширзадфар, И.Е. Проценко]. – Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2009. – С. 88–89.
17. Магниторезистивные свойства пленочных материалов со спин-зависимым рассеиванием электронов [текст]: тези доповідей 2-ї Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених «Фізика низьких температур» / [И.В. Чешко, **О.В. Сынашенко**, С.И. Проценко, Н.И. Шумакова]. – Харків: ФТІНТ ім. Б.І. Вєркіна, 2009. – С. 110.
18. Magnetoresistive properties of nanocrystalline films based on Cu and Fe [текст]: XLIV Zakopane School of Physics international symposium / [M. Marszalek, **O. Synashenko**, Ye. Zabila, I.Yu. Protsenko]. – 2009.
19. Магніторезистивні властивості багатошарових плівкових систем на основі Fe і Cr [текст]: матеріали Науково-технічної конференції викладачів, співробітників і студентів факультету електроніки та інформаційних технологій / [О.М. Білинська, **О.В. Синашенко**, Н.І. Шумакова]. – Суми: СумДУ, 2009. – С. 70.
20. Дифузійні процеси в нанорозмірних плівкових системах на основі Fe і Cu та Fe і Cr [текст]: тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» / [**О.В. Синашенко**, С.І. Проценко]. – Запоріжжя, 2008. – С. 154–156.
21. Магніторезистивні властивості нанокристалічних плівкових систем Cu/Fe і Fe/Cr [текст]: тезисы докладов II-й Международной школы-семинара молодых ученых «Рост кристаллов» / [**О.В. Синашенко**, Є.О. Забіла, Л.В. Однодворець, І.Ю. Проценко, М. Маршалек]. – Харьков: Институт монокристаллов НАН Украины, 2008. – С. 38.
22. AES studies of diffusion processes in Cu/Fe multilayers [текст]: XLII Zakopane school of physics international symposium / [**O. Synashenko**, Y. Zabila, M. Marszalek, K. Marszalek, I. Pazukha, I. Protsenko]. – 2008. – P.43.
23. Оцінка величини коефіцієнта проходження електронами інтерфейсу в тришаровій плівковій системі Cu/Fe/Cu [текст]: тези доповідей Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2007» / [**О. Синашенко**, І. Проценко]. – Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 2007. – С. D58.

24. Методика визначення впливу зовнішніх і внутрішніх меж поділу на параметри електроперенесення та електрофізичні властивості плівкових матеріалів [текст]: матеріали XI Міжнародної конференції «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем» / [А. Бритова, І. Пазуха, І. Проценко, **О. Синашенко**]. – Івано-Франківськ: ПНУ ім. В. Стефаника, 2007. – С. 80–81.

АНОТАЦІЯ

Синашенко О.В. Електро- і магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Cr, Cu та Fe в умовах взаємної дифузії атомів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2011.

Дисертація присвячена вивченню електрофізичних та магніторезистивних властивостей плівкових систем на основі Cr, Cu та Fe в умовах необмеженої (система Fe/Cr) і обмеженої (Fe/Cu) розчинності. Установлено, що експериментальні значення термічного коефіцієнта опору (ТКО) систем Cr/Cu і Fe/Cu, які за своїм структурно-фазовим станом відповідають біпластині, краще узгоджуються із теоретичною моделлю, яка враховує температурні ефекти не лише для середньої довжини вільного пробігу електронів, а також і для коефіцієнтів дзеркальності та проходження межі зерна та інтерфейсів. У випадку системи Fe/Cr експериментальні дані для ТКО краще відповідають моделі плівкового сплаву. Досліджені концентраційні і розмірні залежності магнітоопору та гігантського магнітоопору в мультишарах Fe/Cr і Fe/Cu із кількістю фрагментів до 30 та фазові перетворення в них у процесі відпалювання до 900 К. Показано, що при $c_{Fe} < 45$ ат.% (система Fe/Cr) і < 50 ат.% (система Fe/Cu) для залежностей $R(B)$ характерна ізотропність у трьох геометріях вимірювання, що є ознакою ГМО.

Ключові слова: багатошарові плівки, термічний коефіцієнт опору, магнітоопір, інтерфейсне розсіювання.

АННОТАЦИЯ

Сынашенко О.В. Электро- и магниторезистивные свойства пленочных систем на основе Cr, Cu и Fe в условиях взаимной диффузии атомов.– Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2011.

Диссертация посвящена изучению электрофизических и магниторезистивных свойств пленочных систем на основе Cr, Cu и Fe в условиях неограниченной (система Fe/Cr) и ограниченной (Fe/Cu) диффузии атомов. Установлено, что экспериментальные значения термического коэффициента сопротивления (ТКС) систем Cr/Cu и Fe/Cu, которые по своему структурно-фазовому состоянию соответствуют бипластине, лучше согласуются с теоретической моделью, которая учитывает температурные эффекты не только для средней длины свободного пробега электронов, но и для коэффициентов зеркальности и прохождения границ зерен и интерфейсов. В случае системы Fe/Cr экспериментальные данные для ТКС лучше соответствуют модели пленочного сплава. Методом оже-электронной спектроскопи и вторичной ионной масс-спектрометрии изучены процессы конденсационно-стимулированной, ионно-стимулированной и термодиффузии. Изучены процессы поверхностного, зернограничного и интерфейсного рассеяния электронов.

Проведены систематические исследования взаимосвязи между структурно-фазовым состоянием мультислоев и магнитосопротивлением (МС) или гигантским магнитосопротивлением (ГМС) при трех геометриях измерения. Установлены концентрационные и размерные зависимости МС и ГМС в мультислоях Fe/Cr и Fe/Cu с количеством фрагментов до 30 и фазовые превращения в них в процессе отжига до 900 К. Показано, что при $c_{Fe} < 45$ ат.% (система Fe/Cr) и < 50 ат.% (система Fe/Cu) проявляется изотропность зависимостей $R(B)$ в трех геометриях измерения, что является признаком ГМС. Проведен расчет чувствительности сопротивления к магнитному полю пленок Fe и мультислоев $[Fe/Cr]_n/П$ и $[Fe/Cu]_n/П$.

Ключевые слова: многослойные пленки, температурный коэффициент сопротивления, магнитосопротивление, интерфейсное рассеивание.

SUMMARY

Synashenko O.V. Electro- and magnetoresistive properties of film systems based on Cr, Cu and Fe in conditions of mutual atomic diffusion. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D.) in physics and mathematics on specialty 01.04.07 – Solid-State Physics. – Sumy State University, Sumy, 2011.

The thesis is devoted to investigations of electrophysical and magnetoresistive properties of film systems based on Cr, Cu and Fe in conditions of unlimited (system Fe/Cr) and limited (system Fe/Cu) atomic

diffusion. It was determined that experimental values of temperature coefficient of resistance (TCR) for Cr/Cu and Fe/Cu systems, which correspond to biplate by structure-phase state, better agree with theoretical model. This model takes into account the temperature effects not only for electron mean free path but also for coefficients of specular reflection, grain boundary and interfaces transmission. In case of Fe/Cr system experimental data for TCR better agree with model of film alloy. There were investigated concentration and size dependences of magnetoresistance and giant magnetoresistance, also phase modification during annealing to 900 K in Fe/Cu and Fe/Cr multilayers with fragments to 30. It was shown that for $c_{Fe} < 45$ at.% (Fe/Cr system) and < 50 at.% (Fe/Cu system) $R(B)$ relations are isotropic in three geometries, which indicate about GMR.

Key words: multilayer film systems, temperature coefficient of resistance, magnetoresistance, interface scattering.

Підписано до друку 15.07.2011.
Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 976

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