

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Бурик Іван Петрович**

**УДК 621.316.8; 669.548.55**

**ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДВОКОМПОНЕНТНИХ  
ТА ГЕТЕРОГЕННИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА  
ОСНОВІ ПЕРЕХІДНИХ d-МЕТАЛІВ**

**01.04.07 – фізика твердого тіла**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті  
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Одноворець Лариса Валентинівна**,  
Сумський державний університет,  
доцент кафедри прикладної фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Багмут Олександр Григорович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри теоретичної  
та експериментальної фізики;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Погребняк Олександр Дмитрович**,  
Сумський державний університет,  
професор кафедри електроніки і комп'ютерної  
техніки.

Захист відбудеться «17» червня 2011 р. о 13<sup>00</sup> 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. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розіслано «    » травня 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.О. Журба

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток мікроелектроніки і сенсорної техніки невід’ємно пов’язаний зі створенням нових функціональних плівкових матеріалів на основі металів, сплавів та напівпровідників у вигляді багатошарових та гетерогенних систем, удосконаленням технологій їх отримання та прогнозуванням наперед заданих фізичних властивостей.

При створенні нових плівкових матеріалів необхідно враховувати особливості кристалічної структури (аморфний або кристалічний стан), зовнішні та внутрішні розмірні ефекти в електрофізичних властивостях плівок, оскільки вони мають товщину та розміри кристалічних зерен, співрозмірні із середньою довжиною вільного пробігу носіїв електричного струму та інше. Відомо, що процеси взаємної дифузії та фазоутворення і макронапруження термічного і структурного походження призводять до погіршення стабільності робочих характеристик матеріалів у часі (ресурс роботи) або під впливом температури (термостабільність). З огляду на це великий інтерес викликають багатокомпонентні (багатошарові плівки і плівкові сплави) матеріали на основі перехідних d-металів із високою температурою плавлення. Стабільними фізичними характеристиками також вирізняються плівки гетерогенного складу, які містять аморфні фази, оксиди, карбіді і т.п., і у багатьох випадках можуть замінити багатошарові системи.

На сучасному етапі накопичено значний теоретичний і експериментальний матеріал з досліджень електрофізичних та термодинамічних властивостей, кристалічно-фазового складу і процесів дифузії у багатошарових і багатокомпонентних плівкових матеріалах. При цьому невирішеним залишається ряд проблем, зокрема дослідження електрофізичних (термо- і тензорезистивних) властивостей двокомпонентних плівкових матеріалів на основі d-металів з високою температурою плавлення у вигляді двошарових систем і плівкових сплавів або систем гетерогенного складу, що стимулює проведення систематичних комплексних досліджень електрофізичних властивостей, кристалічної структури і особливостей фазоутворення в таких системах.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету у рамках держбюджетних тем №0106U001942 «Формування кристалічної структури і електрофізичних властивостей плівкових матеріалів на основі багатошарових металевих наносистем» (2006 - 2008 рр.) та №0109U001387 «Фазовий склад, електро- і магніторезистивні властивості плівкових матеріалів із спин-залежним

розсіюванням електронів» (2009 - 2011 рр.). Здобувач брав участь у проведенні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень.

**Мета і задачі досліджень.** Мета дисертаційної роботи полягає у систематичному дослідженні електрофізичних властивостей (питомий опір, коефіцієнт тензочутливості (КТ), чутливість питомого опору до деформації і температурний коефіцієнт опору (ТКО)) та процесів фазоутворення у двокомпонентних плівкових матеріалах на основі d-металів (Cr, Mo, W, Fe, Ni та Re) у вигляді дво- та тришарових плівкових систем, плівкових сплавів та плівок гетерогенного складу.

Відповідно до поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- розроблення методики дослідження електрофізичних властивостей двокомпонентних і гетерогенних плівкових систем;
- дослідження кристалічної структури, фазового складу і процесів взаємної дифузії атомів методами просвічуючої електронної мікроскопії, електронографії та вторинно-іонної мас-спектрометрії;
- установлення кореляції між структурно-фазовим складом і електрофізичними властивостями та фізичними процесами в двокомпонентних і гетерогенного складу плівкових зразках, у т.ч. при дослідженні тензоефекту в області пружної і пластичної деформації;
- проведення розрахунку на основі експериментальних результатів внеску у величину питомого опору, коефіцієнта тензочутливості та чутливості питомого опору до деформації об'ємного, поверхневого та зерномежового розсіювання електронів провідності;
- здійснення апробація феноменологічних моделей для КТ і ТКО з урахуванням деформаційних ефектів для двокомпонентних плівкових систем.

**Об'єкт досліджень** – деформаційні, температурні та розмірні ефекти в електрофізичних властивостях та параметрах електроперенесення двокомпонентних і гетерогенних плівкових матеріалів на основі перехідних d-металів та фазові перетворення в них.

**Предмет досліджень** – фазовий склад та електрофізичні властивості двокомпонентних і гетерогенних плівкових систем на основі d-металів та їх хімічних сполук.

**Методи досліджень.** Формування двокомпонентних і гетерогенних плівкових систем методами пошарової або одночасної вакуумної конденсації металів і термообробки при відповідних технологічних параметрах; резистивний метод вимірювання опору при отриманні зразків, термовідпалюванні та пружній і пластичній деформації; електронно- та іонно-променеві методи просвічуючої мікроскопії, електронографії та вторинно-іонної мас-спектрометрії (ВІМС).

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Проведені в роботі комплексні дослідження дозволили встановити кореляцію між фазовим складом і дифузійними процесами та електрофізичними властивостями двокомпонентних і гетерогенних плівкових систем і отримати такі нові результати:

1. Уперше встановлені умови формування метастабільних інтерметалідних фаз ГЦК- $\text{Ni}_3\text{Mo}$ , ОЦК- $\text{Fe}_2\text{Mo}$  і ГЦК-фази  $\text{Re}(\text{N},\text{O})_x$  (стабільної в інтервалі температур 300 - 800 К) при термообробці двокомпонентних плівкових матеріалів у вигляді дво- і тришарових плівок, плівкових сплавів та гетерогенних плівкових систем на основі аморфного Мо ( $a\text{-Mo}$ ) і ОЦК-Fe або ГЦК-Ni та ГЦП-Re.

2. Уперше проведені дослідження тензорезистивних властивостей і фізичних процесів у сформованих плівкових системах в області пружної і пластичної деформації та встановлено, що межа переходу від пружної до пластичної деформації плівок має величину 0,15-0,30 %.

3. Установлено, що величина чутливості питомого опору до деформації ( $S^p$ ) при пластичній деформації має більше значення, ніж при пружній, що пов'язано зі збільшенням (на 25%) коефіцієнта зерномежового розсіювання електронів.

4. Експериментально показано, що у дво- та тришарових плівкових системах КТ має величину від 10 до 12 одиниць, у той час як у плівкових сплавах і гетерогенних плівках – від 6 до 8 одиниць.

**Практичне значення отриманих результатів.** Фундаментальне значення отриманих у роботі результатів полягає у подальшому розширенні уявлень про електрофізичні властивості та структурно-фазовий склад двокомпонентних та гетерогенних плівкових матеріалів на основі d-металів в умовах розмірних ефектів. Апробація теоретичних співвідношень для ТКО, КТ і чутливості питомого опору до деформації показала, що вони можуть бути застосовані для кількісного прогнозу термо- і тензорезистивних властивостей двошарових плівок. Одержані в роботі результати про тензоефект (деформаційні залежності, величина деформації переходу від пружної до пластичної і чутливість питомого опору до деформації) та терморезистивні властивості (температурні залежності питомого опору і ТКО) двокомпонентних і гетерогенного складу плівкових матеріалів можуть бути використані при розробці металоплівкових тензо- і терморезисторів, датчиків деформації і тиску з високостабільними робочими характеристиками в області пластичної деформації та підвищених температур.

**Особистий внесок здобувача** полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, виготовленні плівкових зразків та дослідженні їх електрофізичних властивостей, проведенні електронно-мікроскопічних і електронографічних досліджень, обробці результатів. Постановку задач досліджень і узагальнення експериментальних результатів проведено спільно з науковим керівником доц. Одноворець Л.В. В обговоренні результатів досліджень брали участь проф. Проценко І.Ю. та к.ф.-м.н. Гричановська Т.М. Частина експериментальних досліджень проведена спільно з доц. Шумаковою Н.І. та аспірантом Ткач О.П. Особисто автором підготовлено статті [2, 4], тези доповідей [13, 15], окремі розділи у [1, 6, 7], матеріали робіт обговорювалися в [3, 5, 8, 9-12, 16, 17]. Основні наукові результати доповідалися особисто автором на наукових конференціях і семінарах.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: X, XII Міжнародних конференціях „Фізика і технологія тонких плівок і наносистем” (Івано-Франківськ, 2005, 2009 рр.); 7-й, 8-й, 9-й Міжнародних конференціях «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, 2005, 2007, 2009 рр.); Міжнародній конференції «Сучасні проблеми фізики твердого тіла» (Київ, 2007 р.); Харківській нанотехнологічній Асамблеї (Харків, 2008 р.); 9-й Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, 2008 г.); науково-технічних конференціях фізико-технічного факультету (Суми, 2004-2007 рр.) та факультету електроніки та інформаційних технологій (Суми, 2010, 2011 рр.).

**Публікації.** Результати дисертації відображені у 17 публікаціях: 8 статей у провідних фахових журналах, 1 стаття в матеріалах конференції, 8 тез доповідей на конференціях.

**Структура і зміст роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 155 сторінок, із них 92 сторінки основного тексту, 24 рис. і 10 табл. на окремих аркушах, список використаних джерел із 166 найменувань на 18 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні задачі досліджень, відзначені новизна, практичне значення, відомості про апробацію отриманих результатів,

зазначені методи досліджень, особистий внесок здобувача, наведено структуру роботи.

**У першому розділі** «*Структура, електрофізичні та механічні властивості плівкових матеріалів на основі металів (літературний огляд)*» проаналізовано питання впливу умов конденсації плівок Cr, Mo, W, Fe, Ni та Re у технологічному вакуумі на формування їх структурно-фазового складу. Відмічено, що у результаті активної взаємодії атомів металів і залишкової атмосфери можливе утворення домішкових фаз у вигляді оксидів, нітридів та карбонітридів (наприклад, Cr<sub>3</sub>O, Mo<sub>3</sub>O, Mo<sub>2</sub>C, Mo(C,N)<sub>x</sub> і т.п.). Ці дані були використані при подальшому формуванні наперед заданого фазового складу у двокомпонентних та гетерогенних плівкових матеріалах.

Здійснено огляд публікацій, присвячених вивченню електрофізичних та механічних властивостей і структури у нанорозмірних та мікронної товщини плівкових матеріалах у вигляді плівкових систем або сплавів на основі d-металів та їх хімічних сполук. Відмічено, що гетерогенні плівкові матеріали мають відносно велике значення КТ та мале значення ТКО, що дає можливість використовувати їх як стабільні чутливі елементи тензодатчиків у певних інтервалах температур і деформацій.

Акцентується увага на актуальності досліджень розмірних залежностей у механічних властивостях нанорозмірних, субмікронної і мікронної товщини плівок, оскільки перехід пружна/пластична деформація в них фіксується при деформаціях, близьких до 0,2 % і (0,05-0,10)% відповідно.

Проведено аналіз теоретичних моделей розмірного ефекту в електрофізичних властивостях. Показано, що в базових співвідношеннях цих моделей міститься ряд невизначених параметрів, що впливає до деякої міри на узгоджуваність експериментальних і розрахункових величин КТ і ТКО. У контексті цього проблемного питання проаналізовані результати щодо кореляції між асимптотичними значеннями КТ та ТКО плівок і числом  $s + d$  електронів, що дозволяє більш детально описати електронні процеси в плівкових системах як можливих чутливих елементів термо- і тензодатчиків.

**У другому розділі** «*Методика і техніка експерименту*» сформульовано задачі досліджень, обґрунтовано вибір металів для формування плівкових систем, описані методи одержання і вивчення електрофізичних властивостей та структурно-фазового складу двокомпонентних і гетерогенних плівкових матеріалів. Пошарова та сумісна вакуумна конденсація плівок проводилася методами електронно-променевого (Mo, W та Re) або терморезистивного (Ni, Fe та Cr)

випаровування у вакуумній установці типу ВУП-5М (вакуум  $\sim 10^{-4}$  Па). Товщину визначали методом кварцового резонатора, точність якого при товщинах 30 - 100 нм складає близько 1 %.

Коефіцієнти поздовжньої тензочутливості ( $\gamma$ ) розраховувалися як тангенс кута нахилу експериментальної залежності  $\Delta R/R$  від поздовжньої деформації  $\varepsilon_l$  ( $\Delta R = R(\varepsilon_l) - R_0$ , де  $R_0$  – початкове значення опору) для п'ятого деформаційного циклу «навантаження - зняття навантаження», оскільки усі релаксаційні процеси, які пов'язані з поздовжньою деформацією, практично закінчуються після зазначеного циклу.

Розрахунок температурного коефіцієнта опору ( $\beta$ ) здійснювався на основі температурних залежностей питомого опору на основі співвідношення  $\beta = \rho^{-1} \cdot \Delta \rho / \Delta T$  за температурною залежністю останнього термостабілізаційного циклу.

Електронно-мікроскопічні та електроннографічні дослідження проводили за допомогою електронного мікроскопа просвічуючого типу ПЕМ-125К. Дифузійні процеси в двошарових плівках були вивчені методом ВІМС (прилад МС-7201М). Як підкладки (П) використовувалися тефлон (вимірювання КТ), скло або ситал (вимірювання ТКО і дифузійних профілів) та аморфні плівки вуглецю (для електроннографічних та електронно-мікроскопічних досліджень).

**Третій розділ** «Електрофізичні властивості двокомпонентних плівкових матеріалів на основі перехідних d-металів» складається із шести підрозділів.

У першому підрозділі наведені результати досліджень фазового та елементного складу плівкових систем Ni/Mo, Ni/Cr та Fe/Mo. Як приклад, на рис.1 представлені мікроструктура двошарових плівок Ni(20)/a-Mo(20)/П до та після термічної обробки і відповідні електроннограми.

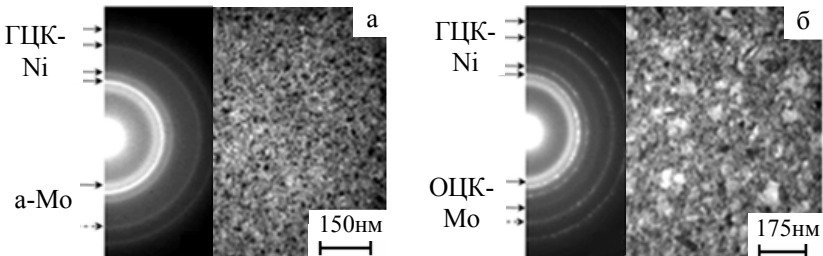


Рис. 1. Мікрокристалічна структура і відповідна їй електроннограма від плівкової системи Ni(20)/a-Mo(20) після конденсації (а) та відпаленої при 750 К (б). У дужках зазначена товщина шарів в нм



Обробка дифракційних картин свідчить про те, що при термообробці відбувається кристалізація  $\alpha$ -Mo і фазовий склад відповідає ГЦК-Ni і ОЦК-Mo з параметрами ґраток  $a = 0,352$  і  $0,315$  нм відповідно.

Аналогічні дослідження еволюції фазового складу при термообробці, що дуже важливо для правильної інтерпретації електрофізичних властивостей, у випадку системи Ni/Cr дають такі результати. У вихідному стані система представляє собою «біплатину» (фазовий склад - ГЦК-Ni + ОЦК-Cr із  $a = 0,354$  і  $0,289$  нм), а після відпалювання до 750 К у ній формується т.р.-(Ni,Cr) з параметром ґратки  $a = 0,356$  нм (рис. 2), який формується по всій товщині двошарової системи. У всіх випадках при температурах відпалювання вищих 700К спостерігаються слабкі лінії оксиду  $Cr_2O_3$ .

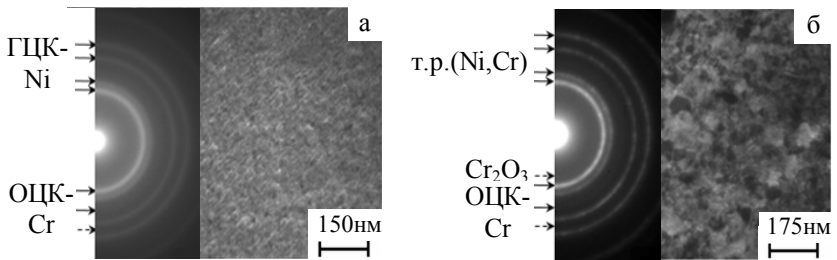


Рис. 2. Мікрокристалічна структура і відповідна їй електронограма від плівкової системи Ni(20)/Cr(20) після конденсації (а) та відпаленої при 750 К (б)

У системі Fe/ $\alpha$ -Mo після відпалювання до 800 К відбувається утворення плівок гетерогенного складу ОЦК-Mo +  $Fe_3O_4$  +  $Fe_2O_3$  (рис. 3).

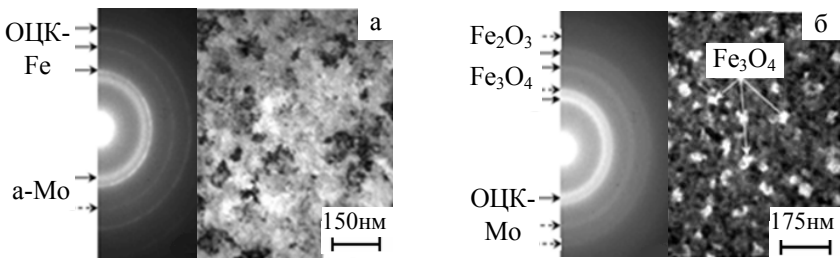


Рис. 3. Мікрокристалічна структура і відповідна їй електронограма від плівкової системи Fe(30)/ $\alpha$ -Mo(30) після конденсації (а) та відпаленої при 800 К (б)

Результати, отримані методом ВІМС, дозволяють зробити висновок про велику роль конденсаційно-стимульованої дифузії (КСД) порівняно з термодифузією (ТД) при формуванні фазового складу зразків, хоча в обох випадках на форму дифузійних профілів також впливає іонно-стимульована дифузія (ІСД) під дією первинного пучка іонів. Оскільки ці два механізми розділити важко, то здійснити порівняння ефективних коефіцієнтів взаємної дифузії ( $D$ ) можна лише для сумарного ефекту КСД+ІСД ( $D \cong 10^{-19} - 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с}$ ) або ТД + ІСД ( $D \cong 10^{-19} - 10^{-20} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

У другому підрозділі представлені результати дослідження тензо- і терморезистивних властивостей плівкових матеріалів на основі Cr, Mo, W, Fe, Ni та Re в інтервалі  $\Delta \varepsilon_l = (0 - 1)\%$ , що відповідає поздовжній пружній, квазіпружній та пластичній деформації.

Перехід пружна/пластична деформація супроводжується зміною кута нахилу залежностей при першому деформаційному циклі, а наступні цикли відповідають пластично - здеформованим зразкам, що проілюстровано на рис. 4 на прикладі плівкових систем Mo(20)/Ni(20)/П та Ni(20)/Mo(20)/Ni(20)/П. Відмітимо, що аналогічні переходи від пружної до пластичної деформації спостерігаються і в одношарових плівках (при  $d \cong 50 - 60 \text{ нм}$ ) Cr, Mo, Fe і Ni при  $\varepsilon_{l\text{пер}} \cong 0,15; 0,22; 0,30$  та  $0,16\%$ , відповідно. У той же час в одношарових плівках W і Re, дво- і тришарових плівках на основі Cr і Ni; Mo і Fe деформація переходу лежить за межами  $\varepsilon_l \cong 1\%$ .

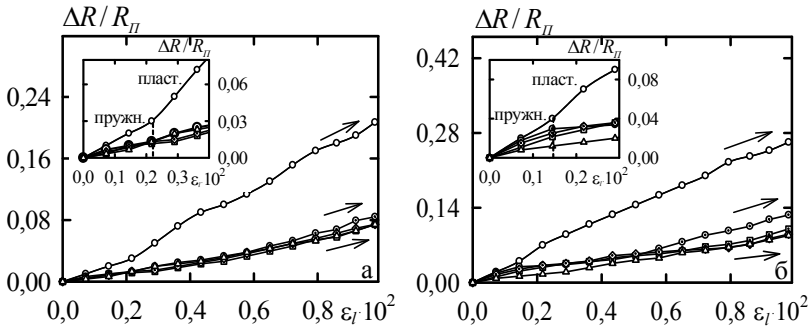


Рис. 4. Деформаційні залежності для плівкових систем Mo(20)/Ni(20)/П (а) та Ni(20)/Mo(20)/Ni(20)/П (б). Номер циклу:  $\circ$  - I,  $\otimes$  - II,  $\square$  - III,  $\diamond$  - IV,  $\triangle$  - V. На вставках наведені деформаційні залежності на початковій стадії

Дослідження терморезистивних властивостей плівок показали, що дисперсність структури, домішкові фази і твердофазні реакції впливають на характер температурної залежності  $\rho(T)$  і  $\beta(T)$ . Крім того при

температурах Дебая ( $\Theta_{0D}$ ) і Кюрі ( $\Theta_{0C}$ ) мають місце особливості на вказаних залежностях, що ілюструється на прикладі систем Ni/Мо і Fe/Мо на рис.5 (третій термостабілізаційний цикл, охолодження).

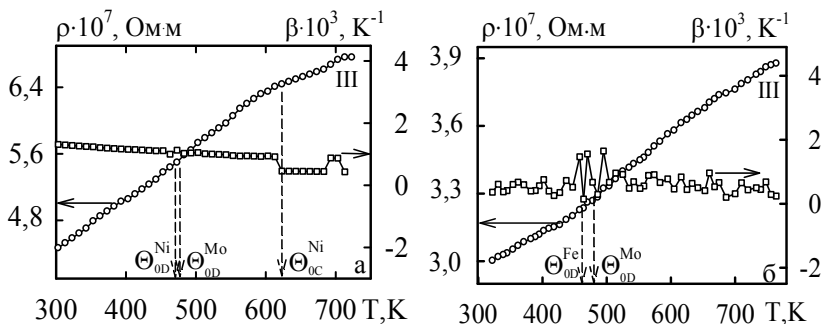


Рис.5. Залежності питомого опору і ТКО від температури для двошарових плівок Ni(50)/Mo(20)/П (а) та Mo(20)/Fe(30)/П (б)

У третьому підрозділі наведені експериментальні результати стосовно розмірних залежностей КТ і ТКО для одношарових плівок Cr, Mo, W, Fe, Ni і Re та двошарових на їх основі.

В рамках лінеаризованого співвідношення Тельє, Тоссе і Пішар для КТ проаналізовано питання про роль об'ємного, поверхневого та зерномежевого розсіювання електронів в тензорезистивних властивостях. Для цього було отримано розмірні залежності КТ при пружній та пластичній деформаціях. У таблиці 1 наведені результати розрахунків, на основі експериментальної залежності  $\gamma_1$  від товщини, величини СДВП електронів провідності в об'ємі плівки ( $\lambda_0$ ) та лімітованої межами зерен ( $\lambda_g$ ). Із цих даних витікає, що величина  $\lambda_0$  і  $\lambda_g$ , на відміну від коефіцієнта розсіювання електронів на межі зерна  $R$ , не суттєво залежать від механізму деформації. Оскільки дисперсність плівок Мо і W не повністю задовольняють вимогам лінеаризованої моделі, то дані стосовно цих плівок, які наведені в таблиці 1, необхідно розглядати як оціночні. Використовуючи експериментальні залежності ТКО від товщини плівки при  $\varepsilon_{11} = 0\%$  і  $\varepsilon_{12} = 1\%$ , також здійснено розрахунок інших параметрів електроперенесення і тензорезистивних характеристик, а саме, коефіцієнтів дзеркальності ( $p$ ), деформаційний коефіцієнт СДВП і коефіцієнта дзеркальності ( $\eta_{\lambda_0}$  і  $\eta_p$ ). Ці результати були використані при апробації теоретичної моделі для КТ двошарових плівок, яка враховує деформаційну залежність параметрів електроперенесення.

Таблиця 1

## Тензочутливість і параметри електроперенесення одношарових плівок

Плівка (товщина, нм)	Пружна деформація ( $0 - \varepsilon_{\text{инер}}$ )%					Пластична деформація ( $\varepsilon_{\text{инер}} - 1$ )%				
	$\gamma_l$	$\lambda_0$ (I-p), нм	$\lambda_{gs}$ , нм	$\Delta\lambda_{gs}$ , нм	R	$\gamma_l$	$\lambda_0$ (I-p), нм	$\lambda_{gs}$ , нм	$\Delta\lambda_{gs}$ , нм	R
Mo(20)	7,6					13,7				
Mo(60)	5,7	40	13,8	-0,1	0,24	7,4	38	13,1	-0,2	0,30
Mo(100)	5,6					6,3				
W(20)	9,6					20,4				
W(60)	7,2	37	13,5	-0,1	0,24	10,9	36	12,9	-0,2	0,31
W(100)	5,9					9,1				
Re(20)	5,7					9,2				
Re(50)	4,2	43	15,4	-0,1	0,22	4,8	41	14,3	-0,1	0,30
Re(80)	4,0					4,5				
Ni(20)	4,5					5,8				
Ni(60)	3,0	39	23,1	-0,1	0,22	3,3	37	21,9	-0,1	0,27
Ni(100)	2,7					2,8				
Fe(20)	3,6					4,6				
Fe(50)	2,9	36	21,4	-0,1	0,22	3,2	34	19,7	-0,1	0,27
Fe(80)	2,8					3,0				
Cr(20)	3,1					3,5				
Cr(40)	2,7	58	22,9	-0,1	0,23	3,0	55	21,5	-0,1	0,29
Cr(60)	2,6					2,8				

Питання про внески окремих механізмів розсіювання електронів провідності у величину КТ та чутливості питомого опору до деформації плівок аналізуються у *четвертому підрозділі*. Оскільки питомий опір плівки обумовлений об'ємним розсіюванням електронів провідності на фонах і дефектах ( $\rho_0$ ), на зовнішніх поверхнях плівки ( $\rho_d$ ) та на межах зерен ( $\rho_{gb}$ ), то чутливість питомого опору до деформації  $S^\rho = d\rho / d\varepsilon_l$  можна представити так:

$$S^\rho \cong S_0^\rho + S_{gb}^\rho + S_d^\rho = S_g^\rho + S_d^\rho. \quad (1)$$

У свою чергу, співвідношення для  $S_d^\rho$  та  $S_{gb}^\rho$  мають такий вигляд:

$$S_d^\rho = \frac{\partial \rho_d}{\partial \varepsilon_l} = \gamma_l^\rho \rho - \gamma_{lg}^\rho \rho_g \quad \text{та} \quad S_{gb}^\rho = \frac{\partial \rho_{gb}}{\partial \varepsilon_l} = \gamma_{lg}^\rho \rho_g - \gamma_{l0}^\rho \rho_0.$$

Аналіз розрахункових даних про значення адитивних складових співвідношення (1) для плівок, zdeформованих в області пружної деформації, показав, що внесок у величини  $\gamma_i^p$  та  $S^p$  поверхневого розсіювання електронів має визначальну роль лише при відносно малих товщинах. Це знаходиться у рамках уявлень про розмірні ефекти. При переході від пружної до пластичної деформації спостерігається збільшення величини чутливості питомого опору до деформації близько до 2-3 разів.

У *n*'ятому підрозділі наведені експериментальні та розрахункові результати досліджень тензорезистивних властивостей двошарових систем Ni/Мо і Мо/Ni, Ni/Cr і Cr/N та Fe/Мо і Мо/Fe. Здійснено числовий розрахунок параметрів електроперенесення, зокрема величин  $(p/k)(\Delta k/\Delta p)$  ( $k = d/\lambda_0$  – зведена товщина),  $(r/m)(\Delta m/\Delta r)$  ( $m = L/\lambda_0$  – зведений середній розмір кристалітів), і встановлені умови, за яких вони більші чи менші від нуля:

$$\frac{\Delta k}{\Delta p} > 0 \text{ за умови } \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} < \frac{\Delta d}{d} \text{ або } \frac{\Delta k}{\Delta p} < 0 \text{ при } \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} > \frac{\Delta d}{d};$$

$$\frac{\Delta m}{\Delta r} > 0 \text{ за умови } \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} < \frac{\Delta L}{L} \text{ або } \frac{\Delta m}{\Delta r} < 0 \text{ при } \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} > \frac{\Delta L}{L}.$$

Установлені нерівності дозволяють якісно аналізувати зміну величини  $\lambda_0$  (або  $\lambda_g$ ) при зміні умов розсіювання на поверхні плівки (характеризується величиною  $\Delta p$ ) та на межі зерен (характеризується величиною  $\Delta r$ ) в умовах поздовжньої деформації плівки, хоча при більш детальному аналізі можна переконатися, що фізичний зміст мають тільки нерівності  $\Delta k/\Delta p < 0$  і  $\Delta m/\Delta r < 0$ . На основі цих співвідношень також можна розглянути частинні випадки при пластичній деформації, коли  $\Delta L \cong 0$ .

Результати апробації феноменологічних моделей для ТКО, КТ та чутливості питомого опору до деформації наведені у шостому підрозділі. Проведено розрахунок величини ТКО двошарових систем на основі співвідношень для «біпластини» – двошарової плівки, в якій зберігається індивідуальність окремих шарів та гомогенної системи у вигляді плівкового сплаву (Таблиця 2). Отримано задовільну відповідність експериментальних і розрахункових даних для ТКО у рамках моделі «біпластини» (точність  $\pm 15\%$ ) і моделі для плівкових сплавів (точність  $\pm 25\%$ ). Ще краща відповідність отримана для КТ у рамках моделі, яка враховує деформаційну залежність параметрів  $p$  і  $r$  та похідних  $\Delta k/\Delta p$  і  $\Delta m/\Delta r$ .

Таблиця 2

Порівняння експериментальних ( $\beta$ ) та розрахункових ( $\beta_{роз}$ ) даних для термічного коефіцієнта опору

Плівкова система ( $Me_1/Me_2/\Pi$ )	Концентрація, ат. %		$\beta \cdot 10^3, K^{-1}$	$\beta_{роз} \cdot 10^3, K^{-1}$		$(\beta - \beta_{роз}) / \beta, \%$	
	$c(Me_1)$	$c(Me_2)$		біплас-тина	плівк. сплав	біплас-тина	плівк. сплав
Ni(50)/Mo(20)/П	80	20	1,38	1,45	1,20	- 5	+ 11
Mo(15)/Ni(25)/П	72	28	0,76	0,71	0,67	+ 7	+ 12
Ni(25)/Mo(20)/П	61	39	0,51	0,58	0,61	- 14	- 20
Mo(20)/Ni(15)/П	56	44	0,47	0,52	0,58	- 11	- 23
Ni(150)/Cr(40)/П	80	20	2,32	2,47	2,08	- 6	+ 10
Cr(15)/Ni(40)/П	26	74	1,65	1,81	1,31	- 10	+ 21
Ni(40)/Cr(20)/П	68	32	1,45	1,38	1,12	+ 5	+ 22
Cr(30)/Ni(30)/П	48	52	0,94	1,00	0,77	- 6	+ 18
Fe(50)/Mo(20)/П	79	21	1,21	1,29	1,35	- 7	- 12
Mo(20)/Fe(40)/П	75	25	1,11	1,16	1,24	- 5	- 12
Mo(25)/Fe(35)/П	32	68	0,83	0,94	1,04	- 13	- 25
Mo(20)/Fe(15)/П	53	47	0,57	0,54	0,63	+ 5	- 11

**Четвертий розділ «Особливості електрофізичних властивостей двокомпонентних та гетерогенних плівкових матеріалів»** складається із чотирьох підрозділів.

У першому підрозділі наведені результати досліджень формування фазового складу та електрофізичних властивостей гетерогенних плівкових матеріалів на основі хімічних сполук тугоплавких металів Mo, W і Re.

На рис. 6 наведені мікроструктура і відповідні дифракційні картини, отримані для плівок гетерогенного складу ГЦК-Re(N,O)<sub>x</sub> + ГЦП-Re з параметром кристалічної ґратки метастабільної ГЦК-фази оксинітриду Re, який практично не змінюється, оскільки у невідпалених зразках він має величину  $a \cong 0,405 \pm 0,002$  нм, а у відпалених –  $a \cong 0,404 \pm 0,002$  нм.

У випадку плівок гетерогенного складу ГЦК-Mo(C,N)<sub>x</sub> + ОЦК-Mo термовідпалювання призводить до формування на основі ГЦК-Mo(C,N)<sub>x</sub> стабільної фази Mo<sub>2</sub>(C,N) з гексагональною решіткою. У випадку плівок W спостерігаються аналогічні хімічні перетворення і за певних умов можна також сформуванати гетерогенний склад  $a$ -W + W<sub>3</sub>O.

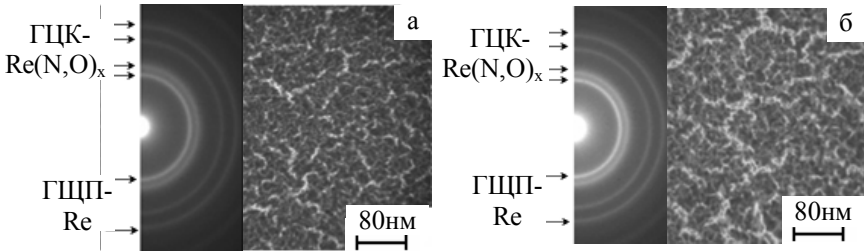


Рис.6. Кристалічна структура і відповідна їй електронограма від плівкової системи ГЦК-Re(N,O)<sub>x</sub> + ГЦП-Re після конденсації (а) та відпалювання при 800 K (б)

Дослідження тензо- та терморезистивних властивостей вищезазначених систем свідчить про те, що вони мають покращені порівняно з одношаровими плівками Mo, W і Re тензорезистивні характеристики, оскільки величина КТ може досягати величини до 8,0 одиниць, що проілюстровано на прикладі плівки із фазовим складом ГЦК-Re(N,O)<sub>x</sub>+ГЦП-Re на рис.7а, і при цьому величина ТКО у гетерогенних плівках має відносно мале ( $\sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) від'ємне значення.

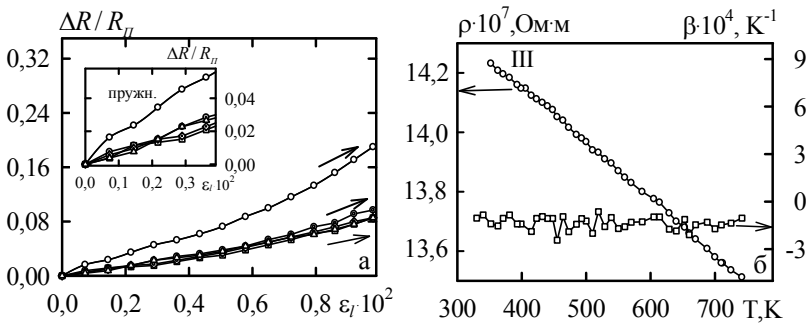


Рис. 7. Деформаційні (а) та температурні (б) залежності  $\rho$  і ТКО для плівок Re(N,O)<sub>x</sub> + Re товщиною 40 нм

У другому підрозділі встановлено особливості формування фазового складу та електрофізичних властивостей плівкових сплавів Ni<sub>x</sub>Mo<sub>1-x</sub> і Fe<sub>x</sub>Mo<sub>1-x</sub> при вакуумній термообробці до 750 K. У сплавах на основі Ni і Mo спостерігалася така особливість твердофазної реакції: при

концентрації  $c_{Ni} \cong 75 \text{ ат. \%}$  на електронограмах фіксується система ліній від двох ГЦК-решіток, які відповідають ГЦК-Ni ( $a = 0,352 \text{ нм}$ ) і метастабільному ГЦК-Ni<sub>75</sub>Mo<sub>25</sub> ( $a = 0,360 \text{ нм}$ ). Типові деформаційна і температурні залежності для  $\rho$  і  $\beta$  такої двофазної плівки на основі Ni і Mo наведені на рис.8.

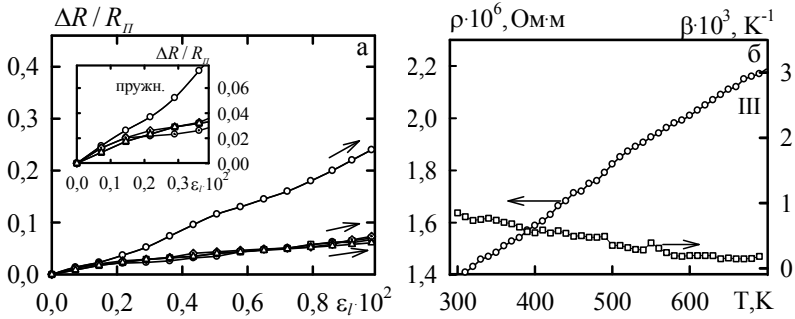


Рис. 8. Деформаційні (а) та температурні (б) залежності для плівкового сплаву Ni<sub>65</sub>Mo<sub>35</sub> товщиною 30 нм

У третьому підрозділі проаналізовано питання про кореляцію між асимптотичними значеннями КТ та ТКО і числом  $n = s + d$  електронів провідності, яка дозволяє здійснити прогноз  $\gamma_{lg}$  і  $\beta_g$ . Зокрема, спрогнозовані величини:  $\gamma_{lg} = 2,0$  (плівка Ni); 2,4 (Fe) і 1,8 - 2,1 (Cr, Mo, W, Re) та  $\beta_g = 3,0 \cdot 10^{-3}$  (Ni, Fe) і  $1,3 - 1,4 \cdot 10^{-3}$  (Cr, Mo, W, Re)  $\text{K}^{-1}$  знаходяться в діапазоні значень, які відповідають експериментально отриманим.

Результати дослідження тензочутливості на прикладі тонких дротів Mo та Ni представлені у четвертому підрозділі. Отримано, що при пластичній деформації можуть мати місце нерівності  $\gamma_l^p > 0$  або  $\gamma_l^p < 0$ , що пов'язано з результатом конкурентної дії двох механізмів розсіювання електронів – зерномежового і об'ємного. Проаналізовано питання про можливу величину і знак деформаційних коефіцієнтів СДВП та концентрації електронів провідності. Розрахована залежність коефіцієнта Пуассона для дротів Mo і Ni від величини деформації до 1,2%. В обох випадках має місце монотонне зменшення його величини із кутовими коефіцієнтами залежності  $\partial \mu / \partial \epsilon_l = -0,33$  (Ni) та  $-0,63$  (Mo). На прикладі плівок Mo, W, Re і Ni підтверджена відома кореляція між величинами  $\gamma_{lg}$  і  $\beta_g$  в залежності від числа (s+d) електронів.



## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведені комплексні дослідження взаємозв'язку між структурно-фазовим складом та електрофізичними властивостями двокомпонентних і гетерогенних плівкових систем на основі d-металів та їх хімічних сполук, які можуть бути використані для розроблення тензо- і терморезисторів, датчиків деформації і тиску з високостабільними робочими характеристиками.

1. Дослідження кристалічної структури та фазового складу свіжосконденсованих і відпалених двокомпонентних плівкових систем у вигляді дво- і тришарових плівок та плівкових сплавів і гетерогенного складу плівкових зразків на основі Cr, Mo, W, Fe, Ni і Re та їх хімічних сполук дозволили установити температурні і концентраційні інтервали стабілізації дво- чи тришарових плівкових систем; аморфних фаз; твердих розчинів та інтерметалідів і гетерогенного складу плівкових матеріалів.

2. Експериментальні дослідження тензочутливості в області пружної і пластичної деформації дозволили вперше встановити таке:

– величина КТ у дво- та тришарових системах має значення 5,4 - 7,6 (Ni/Mo); 4,8 - 9,8 (Fe/Mo); 3,5 - 4,3 (Ni/Cr); 9,1 (Ni/Mo/Ni); 11,5 (Fe/Mo/Fe) і 6,6 (Ni/Cr/Ni), що узгоджується з уявленнями про розмірний ефект в КТ; у плівкових сплавах, близьких до складу  $Ni_{65}Mo_{35}$  і  $Fe_{65}Mo_{35}$ , дорівнює 6,0 і 4,7 одиниць, відповідно, а у гетерогенних плівках – близько 8,0 ( $Re + Re(N,O)_x$ ) та 4,0 ( $Mo + Mo(C,N)_x$ ) одиниць;

– при пружній або пластичній деформації плівок основний внесок у чутливість питомого опору до деформації дають процеси зерномежового розсіювання електронів, у той час як поверхневе розсіювання - помітний внесок лише при малій товщині зразків;

– величина чутливості питомого опору до деформації при пластичній деформації має більше значення, ніж при пружній, що пов'язано із певним збільшенням ефективності зерномежового розсіювання електронів, оскільки величина  $R$  збільшується від 0,22 - 0,24 до 0,27 - 0,30; межа переходу від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації плівок становить величину  $\varepsilon_{lner} \cong 0,15 - 0,30 \%$ ;

– уперше проаналізовано питання про чутливість питомого опору до деформації і проведено числовий розрахунок параметрів електроперенесення ( $\lambda_0$ ,  $p$ ,  $R$ ,  $\eta_{\lambda_0}$ ,  $\eta_p$  та величин  $\Delta lnr/\Delta lnp$  і  $\Delta lnr/\Delta lnm$ ; отримані співвідношення, які дозволяють аналізувати зміну величини СДВП при

зміні умов розсіювання на поверхні плівки або на межі зерна в умовах поздовжньої деформації.

3. Розмірна залежність чутливості питомого опору до деформації ( $10^{-7}$ - $10^{-6}$  Ом·м/% для дво- та тришарових плівкових систем та  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  Ом·м/% для плівкових сплавів і гетерогенного складу плівок) визначається доданком, пов'язаним із внеском поверхневого розсіювання електронів, а її абсолютне значення – доданками, пов'язаними із внесками зерномежового та об'ємного розсіювання.

4. Величина ТКО плівкових матеріалів залежить від фазового складу плівок і при загальній товщині зразка від 40 до 60 нм в інтервалі температур 300 - 800 К має такі значення:

–  $(1,0 - 0,6) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  (Fe/Mo);  $(0,8 - 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  (Ni/Mo) і  $(1,7 - 1,0) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  (Ni/Cr);  
 –  $(0,6 - 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  (Fe<sub>65</sub>Mo<sub>35</sub>) і  $(0,8 - 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  (Ni<sub>65</sub>Mo<sub>35</sub>);  
 –  $(0,1 - 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  (ГЦП-Re + ГЦК-Re(N,O)<sub>x</sub>); –  $(0,2 - 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  (ОЦК-Mo + ГЦК-Mo(C,N)<sub>x</sub>) та  $(0,5 - 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  (ОЦК-Mo + Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

5. Здійснена апробація феноменологічних моделей для КТ і ТКО плівкових зразків, у яких зберігається індивідуальність окремих шарів; утворюються тверді розчини; має місце залежність параметрів електроперенесення від деформації зразка і отримана задовільна відповідність розрахункових та експериментальних результатів.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Бурик И.П.** Особенности тензорезистивного эффекта в тонких металлических пленках в области упругой и пластической деформации / [И.П.Бурик, Д.В.Великодный, Л.В.Одноворец, И.Е.Проценко, Е.П.Ткач] // ЖТФ. – 2011. – Т.81, Вып. 2. – С. 75-81; Buryk I.P., Tensorresistive effect in thin metal films in the range of elastic and plastic strain / [I.P. Buryk, D.V. Velykodnyi, L.V. Odnodvoretz, I.E. Protsenko, E.P. Tkach] // Techn. Phys. – 2011. – V. 56, № 2. – P. 232-237.

2. **Бурик І.П.** Тензорезистивні властивості плівкових матеріалів на основі Мо, Ні та Fe / [І.П. Бурик, Т.М. Гричановська, Л.В. Одноворець] // Металлофиз. новейшие технол. – 2010. – Т.32, №3. – С.345 - 356.

3. Сынашенко О.В. Магниторезистивные свойства многослойных наноразмерных пленочных систем / [О.В. Сынашенко, Е.П. Ткач, **И.П. Бурик**, Л.В. Одноворец, С.И. Проценко, Н.И. Шумакова] // ВАНТ. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2009. – №6(18). – С. 169-174.

4. **Бурик І.П.** Тензорезистивные свойства пленочных материалов на основе Ni и Mo или Cr / [И.П. Бурик, С.И. Воробьев, Л.В. Одноворець] // ФИП. – 2009. – Т.7, №1-2. – С. 115-118.

5. **Бурик І.П.** Тензорезистивні властивості гетерогенних плівкових матеріалів на основі тугоплавких металів / [І.П. Бурик, Л.В. Одноворець] // Ж. нано – та електрон. фіз. – 2009. –Т.1, №3. – С. 24-29.

6. **Бурик І.П.** Кристалічна структура, фазовий склад і дифузійні процеси в двошарових плівкових матеріалах на основі Ni і Mo / [І.П. Бурик, І.О. Шпетний, Л.В. Одноворець] // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2008. – №2. – С. 118-123.

7. **Бурик І.П.** Структура та електрофізичні властивості нанокристалічних плівок молибдену / [І.П. Бурик, Є.А. Білінський, Л.В. Одноворець] // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2007. – №2. – С.74-78.

8. **Бурик І.П.** Деякі особливості тензорезистивного ефекту в металевих дротах при їх пластичній деформації / [І.П. Бурик, Д.В. Великодний, Л.В. Одноворець, І.Ю. Проценко, Н.І. Шумакова] // ФХТТ. – 2006. – Т.7, №2. – С. 241-244.

9. **Бурик І.П.** Тензорезистивні властивості тонких плівок молибдену і заліза / [І.П. Бурик, Д.П. Дудецький, Л.В. Одноворець] // Нанотехнології. Том 1. Сборник докладов Харьковской нанотехнологической ассамблеи.– Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008. – С. 151-154.

10. **Бурик І.П.** Вплив розсіювання електронів на міжфазній межі на тензорезистивні властивості металевих плівкових матеріалів / [І.П. Бурик, Л.В. Одноворець] // Матеріали 7-ї Міжнародної конференції [«Фізичні явища в твердих тілах»], (Харків, 14-15 грудня, 2005). – С. 64.

11. **Бурик І.П.** Електрофізичні властивості плівкових систем на основі металів і напівпровідників/[І.П. Бурик, Л.В. Одноворець, Н.М. Опанасюк] // Матеріали Ювілейної X Міжнародної конференції [«Фізика і технологія тонких плівок»], (Івано-Франківськ, 16-21 травня, 2005). – С. 287-288.

12. **Бурик І.П.** Тензорезистивні властивості нанокристалічних плівкових матеріалів на основі Fe, Cr та Mo/ [І.П. Бурик, Д.П. Дудецький, Л.В. Одноворець, М. Маршалек] // Матеріали Міжнародної конференції [«Сучасні проблеми фізики твердого тіла»], (Київ, 8-11 жовтня, 2007). – С. 97-98.

13. **Бурик І.П.** Тензоефект в нанокристалічних плівках молибдену / [І.П. Бурик, Л.В. Одноворець] // Матеріали 8-ї Міжнародної конференції [«Фізичні явища в твердих тілах»], (Харків, 11-13 грудня, 2007). – С. 77.

14. **Бурик І.П.** Тензорезистивні властивості пліночних матеріалів на основі металів і їх оксидів / [І.П. Бурик, Д.П. Дудецкий, В.А. Соломаха, Е.П. Ткач, Л.В. Одноворец] // Матеріали 9-ї Міжнародної науково-практичної конференції [«Современные информационные и электронные технологии»], (Одесса, 19-23 мая, 2008). – С. 145.

15. **Бурик І.П.** Терморезистивні властивості двошарових плівкових систем Ni/Cr та Ni/Mo / [І.П. Бурик, Т.М. Гричановська, Л.В. Одноворец] // Матеріали XII Міжнародної конференції [«Фізика і технологія тонких плівок»], (Івано-Франківськ, 18-23 травня, 2009). – С. 141-143.

16. **Бурик І.П.** Фазовий склад плівкових структур Fe/Pd і Fe/Mo / [І.П. Бурик, О.П. Ткач, Л.В. Одноворец] // Матеріали 9-ї Міжнародної конференції [«Фізичні явища в твердих тілах»], (Харків, 1-4 грудня, 2009). – С. 20.

17. **Бурик І.П.** Тензорезистивні властивості металевих плівок: прогноз і експеримент / [І.П. Бурик, К.В. Тищенко, Ю.М. Шабельник, Ш. Хамідреза, І.Ю. Проценко, Л.В. Одноворец] // Матеріали науково-технічної конференції факультету електроніки та інформаційних технологій Сумського державного університету (Суми, 19-23 квітня, 2010). – С. 87-88.

## АНОТАЦІЯ

**Бурик І.П. Електрофізичні властивості двокомпонентних та гетерогенних плівкових матеріалів на основі перехідних d-металів. - Рукопис.**

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

Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню взаємозв'язку між структурно-фазовим складом, дифузійними процесами та електрофізичними властивостями (коефіцієнт тензочутливості, чутливість опору до деформації і термічний коефіцієнт опору) двокомпонентних і гетерогенних плівкових систем на основі d-металів: Cr, Mo, W, Fe, Ni і Re та їх хімічних сполук.

Установлено, що в двох- і тришарових плівкових системах Ni/Mo, Ni/Cr, Fe/Mo, Ni/Mo/Ni, Ni/Cr/Ni, Fe/Mo/Fe КТ має величину 5,4 - 7,6 (Ni/Mo); 4,8 - 9,8 (Fe/Mo); 3,5-4,3 (Ni/Cr); 9,1 (Ni/Mo/Ni); 11,5 (Fe/Mo/Fe) і 6,6 (Ni/Cr/Ni), а в плівкових сплавах і плівках гетерогенного складу - 6,0 (Ni<sub>65</sub>Mo<sub>35</sub>), 4,7 (Fe<sub>65</sub>Mo<sub>35</sub>), 8,0 (Re+Re(N,O)<sub>x</sub>) і 4,0 (Mo+Mo(C,N)<sub>x</sub>) одиниць.

Вперше проаналізовано питання про чутливість питомого опору до деформації і проведено числовий розрахунок параметрів електроперенесення (середньої довжини вільного пробігу електронів (СДВП),

коефіцієнта дзеркальності, коефіцієнта відбиття електронів на межі зерен, деформаційного коефіцієнта СДВП та ін.). Здійснена апробація феноменологічних моделей для КТ і ТКО плівкових зразків, у яких зберігається індивідуальність окремих шарів або утворюються тверді розчини і отримана задовільна відповідність розрахункових та експериментальних результатів.

**Ключові слова:** двокомпонентні та гетерогенні плівки, коефіцієнт тензочутливості, пружна і пластична деформація, чутливість до деформації, термічний коефіцієнт опору.

### АННОТАЦИЯ

**Бурый И.П. Электрофизические свойства двухкомпонентных и гетерогенных пленочных материалов на основе переходных d-металлов.– Рукопись.**

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

Диссертационная работа посвящена комплексному исследованию взаимосвязи между структурно-фазовым составом, диффузионными процессами и электрофизическими свойствами (коэффициент тензочувствительности (КТ), чувствительность сопротивления к деформации и термический коэффициент сопротивления (ТКС)) двухкомпонентных Fe/Mo, Ni/Mo, Ni/Cr, Fe<sub>65</sub>Mo<sub>35</sub> и Ni<sub>65</sub>Mo<sub>35</sub> или гетерогенных пленочных систем (ГЦП-Re+ГЦК-Re(N,O)<sub>x</sub>), ОЦК-Mo + ГЦК-Mo(C,N)<sub>x</sub> и ОЦК-Mo + Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Установлено, что в двух- и трехслойных пленочных системах Ni/Mo, Ni/Cr, Fe/Mo, Ni/Mo/Ni, Ni/Cr/Ni, Fe/Mo/Fe КТ имеет величину 5,4 - 7,6 (Ni/Mo); 4,8 - 9,8 (Fe/Mo); 3,5-4,3 (Ni/Cr); 9,1 (Ni/Mo/Ni); 11,5 (Fe/Mo/Fe) и 6,6 (Ni/Cr/Ni), а в пленочных сплавах и пленках гетерогенного состава - 6,0 (Ni<sub>65</sub>Mo<sub>35</sub>), 4,7 (Fe<sub>65</sub>Mo<sub>35</sub>), 8,0 (Re+Re(N,O)<sub>x</sub>) и 4,0 (Mo+Mo(C,N)<sub>x</sub>) единиц.

Впервые проанализирован вопрос о чувствительности удельного сопротивления к деформации и проведен численный расчет параметров электропереноса (средней длины свободного пробега (СДСП), коэффициента зеркальности ( $p$ ), коэффициента прохождения электронов через границу зерна ( $r$ ), деформационного коэффициента СДСП ( $\lambda_0$ ) и др.). Осуществлена апробация феноменологических моделей для КТ и ТКС пленочных образцов, в которых сохраняется индивидуальность отдельных слоев; образуются твердые растворы; имеет место зависимость параметров электропереноса от деформации образца, получено

удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Получено, что величина чувствительности удельного сопротивления к деформации при пластической деформации имеет большее значение, чем при упругой, что связано с определенным возрастанием эффективности зернограничного рассеивания электронов вследствие уменьшения прозрачности границ зерен; граница перехода от упругой (квазиупругой) к пластической деформации пленок составляет величину  $\varepsilon_{\text{пер}} \cong 0,15-0,30 \%$ .

**Ключевые слова:** двухкомпонентные и гетерогенные пленки, коэффициент тензочувствительности, упругая и пластическая деформация, чувствительность к деформации, термический коэффициент сопротивления.

### SUMMARY

**Buryk I.P. Electrophysical properties of bicomponent and heterogenous film materials based on transition d-metals. – Manuscript.**

Thesis for a Doctor of philosophy degree (Ph. D.) in physics and mathematics on specialty 01.04.07 – physics of solid state. – Sumy State University, Sumy, 2011.

The thesis is devoted to the complex investigates of the relationship between the structural-phase state, diffusion processes and electrophysical properties (gaude factor (GF), the sensitivity of resistance to deformation and thermal coefficient of resistance (TCR)) in the bicomponent or heterogeneous thin film systems based on d-metals: Cr, Mo, W, Fe, Ni and Re, and their chemical compositions.

Established that in double- and three-layer film systems Ni/Mo, Ni/Cr, Fe/Mo, Ni/Mo/Ni, Ni/Cr/Ni, Fe/Mo/Fe value of GF is 5,4 - 7,6 (Ni/Mo); 4,8 - 9,8 (Fe/Mo); 3,5-4,3 (Ni/Cr); 9,1 (Ni/Mo/Ni); 11,5 (Fe/Mo/Fe) and 6,6 (Ni/Cr/Ni), in the film alloys and heterogeneous film systems - 6,0 ( $\text{Ni}_{65}\text{Mo}_{35}$ ), 4,7 ( $\text{Fe}_{65}\text{Mo}_{35}$ ), 8,0 ( $\text{Re}+\text{Re}(\text{N},\text{O})_x$ ) and 4,0 ( $\text{Mo}+\text{Mo}(\text{C},\text{N})_x$ ) units.

For the first time the questions about the sensitivity of resistivity to deformation and a quantitative calculation parameters electrotransition (mean free path of electrons (MFP), the coefficient of reflectivity, grain-boundary scattering parameter, deformation coefficient of MNP etc.). The approbation of the phenomenological models for GF and TCR film samples that contain identity separate layers or formed solid solution and satisfactory correlation between calculated and experimental results.

**Keywords:** bicomponent and heterogeneous films, gaude factor, elastic and plastic deformation, sensitivity of deformation, thermal coefficient of resistance.

Підп. до друку 1.04.2011.  
Обл.- вид. арк. 0,9.  
Ум. друк. арк. 1,1.  
Наклад 100 пр  
Замовлення №

Формат 60×90/16.  
Папір ксероксний.  
Гарнітура Times New Roman Суг.  
Друк офсетний.

Вид-во СумДУ. 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.  
Свідоцтво ДК № 3062 від 17.12.2007р.  
Друкарня СумДУ. 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.