

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ім.В.Н.Каразіна

**Проценко Сергій Іванович**

УДК 621. 316. 8

**ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОЇ І ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ПАРАМЕТРІВ  
ЕЛЕКТРОПЕРЕНЕСЕННЯ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ  
ПЛІВОК НА ОСНОВІ Cr, Cu І Sc (Co)**

**01.04.07 – фізика твердого тіла**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

**Харків - 2004**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - кандидат фізико-математичних наук,  
доцент  
**Чорноус Анатолій Миколайович,**  
Сумський державний університет,  
доцент кафедри прикладної фізики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор **Фінкель Віталій Олександрович**, завідувач лабораторії матеріалознавства Інституту фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник **Михайлов Ігор Федорович**, Харківський національний технічний університет "ХПІ", головний науковий співробітник кафедри фізики металів та напівпровідників.

Провідна установа - Львівський національний університет ім. Івана Франка, кафедра фізичної і біомедичної електроніки.

**Захист відбудеться** "13" травня 2005 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.03 Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна (61077, м. Харків, пл. Свободи, 4, ауд. ім. К.Д.Синельникова).

З дисертацією можна ознайомитися у Центральній бібліотеці Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна за адресою: 61077, м. Харків, пл. Свободи, 4.

Автореферат розіслано "8" квітня 2005 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.П. Пойда

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Досягнення в галузі тонкоплівкових технологій стимулюють розвиток мікро- і оптоелектроніки, приладобудування і сенсорної техніки, сприяють удосконаленню елементної бази обчислювальної техніки. У зв'язку з тим що однокомпонентні плівки не можуть забезпечити комплекс властивостей, які б задовольнили вимоги матеріалознавців, конструкторів і технологів, то все більш широко застосовуються багатокомпонентні плівкові матеріали у вигляді плівкових сплавів, шаруватих і багатошарових систем. Елементи мікросхем і сенсорів, які виготовлені із таких багатокомпонентних плівок, мають більш широкий спектр функціональних можливостей. Сказане великою мірою стосується багатошарових плівок, межі поділу яких дуже суттєво впливають на фізичні властивості, зокрема на термічний коефіцієнт опору (ТКО), коефіцієнти температурної чутливості (КТ) та інші властивості. Але інтерес до багатошарових плівкових систем має не тільки прикладний, а і фундаментальний аспект проблеми, оскільки такі плівкові зразки є дуже зручними об'єктами для дослідження процесів взаємної дифузії атомів, вивчення особливостей розмірних ефектів (РЕ) в електрофізичних і термодинамічних властивостях. Хоча у цьому напрямі є великі досягнення, але ряд фундаментальних питань фізики багатошарових систем має проблемний характер. Це, перш за все, відсутність теоретичних моделей, які задовільно описували б РЕ в ТКО (на момент постановки задачі даних досліджень практично були відомі лише моделі для двошарових плівкових зразків), слабка узгодженість експериментальних результатів із теоретично очікуваними. Залишаються не до кінця вивченими питання про температурну і деформаційну залежність таких параметрів електроперенесення, як коефіцієнти дзеркальності поверхні плівки ( $\rho$ ), проходження межі зерна ( $r$ ) і межі поділу окремих шарів ( $Q$ ).

Із вищезазначеного випливає актуальність теми даної роботи та доцільність проведення дослідження РЕ в ТКО і КТ на модельних багатошарових плівкових системах, умову яких задовольняють до великої міри тришарові плівки на основі Cr, Cu і Sc або до деякої міри - на основі Cu, Cr і Co.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася у відповідності до держбюджетних тем № 197U016610 „Електрофізичні властивості багатошарових плівок в умовах взаємної дифузії елементів”; №0100U003219 „Дифузійні процеси в системах плівка/плівка і плівка/масивний матеріал”; №0103U000773 „Вплив статичної деформації і температури на електрофізичні властивості багатошарових плівкових систем”; спільного проекту науково-технічного співробітництва №М/18-2004 „Дифузійні процеси і транспортні властивості мультишарів і тонких плівок” між Сумським держуніверситетом і Інститутом ядерної фізики ПАН (м. Краків, Польща).

Здобувач брав участь у виконанні зазначених НДР як виконавець.

**Мета і задачі досліджень.** Основна мета даної роботи полягала у встановленні особливостей електрофізичних властивостей багатошарових плівок на основі Cr, Cu і Sc (Co) і з'ясуванні внеску тих фізичних процесів, що визначають температурну і деформаційну залежність таких параметрів електроперенесення, як коефіцієнти дзеркальності та проходження межі зерна і межі поділу шарів, у величину термічного коефіцієнта опору і коефіцієнта тензочутливості.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі конкретні наукові задачі:

- здійснити аналіз і макроскопічну апроксимацію теоретичної моделі Р.Дімміха для ТКО у випадку двошарових плівок і розробити напівкласичну теоретичну модель, альтернативну моделі Р.Дімміха, яка б дозволяла теоретично описати експериментально спостережені залежності ТКО від загальної товщини плівки та товщини окремих компонент;
- розробити і уточнити теоретичні моделі для ТКО і КТ (за умови коректного врахування внутрішнього РЕ), які враховують температурну і деформаційну залежність параметрів електроперенесення  $\rho$ ,  $r$  і  $Q$ ;
- експериментально дослідити та встановити фазовий склад, структурний стан поверхні, особливості дифузійних процесів та електрофізичні властивості дво- та тришарових плівок на основі Cr, Cu і Sc (Co);
- здійснити експериментально перевірку розроблених теоретичних моделей, апроксимаційних і відкоригованих співвідношень на дво- та тришарових плівкових системах на основі Cr, Cu і Sc (Co);
- проаналізувати внесок у величину ТКО наноструктурних плівок об'ємного (фонового), поверхневого і зерномежового розсіювання електронів;
- здійснити комп'ютерне моделювання термо- та тензорезистивних властивостей тришарових плівкових систем на основі Cr, Cu і Sc;
- проаналізувати і експериментально перевірити хід температурної залежності коефіцієнтів тензочутливості полікристалічних і нано-структурних плівок Cr.

*Об'єкт дослідження* -: розмірні, температурні та деформаційні ефекти в електрофізичних властивостях плівкових матеріалів та температурна і деформаційна залежність параметрів електроперенесення.

*Предмет дослідження* - термічний коефіцієнт опору і коефіцієнт повздожньої тензочутливості дво-, три- і багатошарових плівок на основі Cr, Cu і Sc (Co).

*Методи дослідження*: вакуумна пошарова конденсація і резистивний метод при термовідпалюванні і деформації зразків у високому вакуумі, електронна і атомно-силова мікроскопія (АСМ), електронографія, електронна оже-спектроскопія (ЕОС), вторинно-іонна мас-спектрометрія (ВІМС), чисельний розрахунок та комп'ютерне моделювання термо- і тензорезистивних властивостей тришарових плівкових систем.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Проведення теоретичних і експериментальних досліджень електрофізичних властивостей плівкових систем дозволило отримати такі нові наукові результати:

1. Вперше запропонована напівфеноменологічна модель для ТКО багат шарових плівкових систем із урахуванням температурної залежності коефіцієнтів дзеркальності, проходження меж зерен і поділу шарів, яка дозволяє краще описати теоретично експериментальні результати у порівнянні із моделлю Р.Дімміха, її апроксимаційним співвідношенням та напівкласичною моделлю;
2. Уточнена і доопрацьована аналогічна модель для КТ багат шарових плівок за рахунок більш коректного урахування поверхневого і зерномежового розсіювання електронів;
3. Для кількісної характеристики температурних і деформаційних ефектів у параметрах електроперенесення вперше введені до розгляду температурні і деформаційні коефіцієнти  $\beta_p$ ,  $\beta_r$  і  $\beta_Q$  та  $\eta_p$ ,  $\eta_r$  і  $\eta_Q$ , фізична природа яких пов'язана із тими релаксаційними процесами, які проходять на зовнішніх поверхнях плівки, межі поділу шарів та межі зерен при збільшенні температури або деформації зразка; величина і знак зазначених термічних і деформаційних коефіцієнтів визначаються ступенем дисперсності плівок, їх товщиною, наявністю інохідних атомів та інших дефектів на межах зерен і межі поділу шарів.
4. Встановлені структурно-фазовий стан, особливості дифузійних процесів та електрофізичні властивості двошарових плівкових систем як складових тришарових на основі Cr, Cu і Sc (Co);
5. На підставі аналізу теоретичної залежності КТ від температури та експериментальних даних, отриманих у ході проведення тензорезистивних досліджень, встановлені умови, за яких можливе відхилення від напівемпіричного правила  $\beta_{\gamma_{it}} \cong -\beta$  для термічних коефіцієнтів КТ і ТКО.
6. Здійснено подальший розвиток уявлень про розмірні ефекти у КТ і ТКО.

**Практичне значення отриманих результатів.** Наукові результати, отримані у ході виконання дисертаційної роботи, можуть бути використані для подальшого розвитку уявлень про фізичну суть РЕ в електрофізичних властивостях і у випадку інших багат шарових плівкових систем і, зокрема, про температурні і деформаційні ефекти параметрів електроперенесення. Ті з них, які, зокрема, захищені патентом України, можуть бути використані при розробленні чутливих елементів терморезисторів або тензодатчиків з підвищеною величиною КТ. Розроблена методика прогнозування термо- і тензорезистивних властивостей та програмне забезпечення до неї дають можливість прогнозувати термо- і тензорезистивні властивості різних плівкових систем у широкому інтервалі товщин і температур. Вперше запропонована методика розрахунку внеску в загальну величину ТКО фонового, поверхневого і зерномежового розсіювання може бути використана при

аналізі результатів терморезистивних досліджень металевих та напівпровідникових одношарових плівок.

Фундаментальне значення отриманих результатів полягає у подальшому розвитку уявлень про РЕ в електрофізичних властивостях багатошарових плівкових систем і, зокрема, про температурні і деформаційні ефекти для параметрів електроперенесення.

**Особистий внесок здобувача** полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, проведенні технологічних і фізичних досліджень. Автор особисто розробляв експериментальні методики, проводив вимірювання, обробку та інтерпретацію отриманих результатів, розробив програмне забезпечення та здійснив комп'ютерні розрахунки і моделювання. Самостійно проводив електронографічні та електронно-мікроскопічні дослідження. Постановку задач досліджень і узагальнення результатів зроблено спільно з науковим керівником доц. Черноусом А.М. В обговоренні результатів досліджень брав участь докторант, к.ф.-м.н. Дехтярук Л.В. Разом з доц. Салтиковою А.І. були проведені дослідження методом вторинно-іонної мас-спектрометрії. При консультаціях доктора наук М. Маршалек (Інститут ядерної фізики ПАН, м. Краків) автором самостійно були проведені дослідження методами атомно-силової мікроскопії та електронної оже-спектроскопії. Особисто автором підготовлено статті [3,6,8,9,13] і тези доповідей [15,17,18], обговорювалися матеріали робіт [1,2,5,7,10,12]. Основні наукові результати доповідалися особисто автором на наукових семінарах, конференціях і асамблеях.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові та практичні результати роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях: Науково-технічних конференціях фізико-технічного факультету Сумського держуніверситету (Суми, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 рр.); International Workshop DIFTRAN'98 (Черкаси, 1998 р.); International Conference MPSL (Суми, 1999 р.); VII, VIII і IX Міжнародних конференціях „Фізика і технологія тонких плівок” (Івано-Франківськ, 1999, 2001, 2003 рр.); 12-му, 14-му і 15-му Міжнародних симпозиумах „Тонкие пленки в оптике и электронике” в рамках Харківської наукової асамблеї (Харків, 2001, 2002, 2003 рр.); на Всеукраїнських конференціях „ЕВРІКА” (Львів, 2002, 2003, 2004 рр.), на Міжнародній конференції МЕТІТ (Кременчук, 2004 р.); III і V Всеросійських семінарах „Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении” (Воронеж, 2000, 2004 рр.).

**Публікації.** Основні матеріали дисертації відображені у 26 публікаціях, назви 18 з яких наведені у списку опублікованих праць у авторефераті.

**Структура і зміст роботи.** Робота складається із вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел із 189 найменувань. Дисертацію викладено на 159 сторінках друкованого тексту, ілюстровано 30 рисунками і 19 таблицями.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі „Розмірні ефекти у температурному коефіцієнті опору і коефіцієнті тензочутливості металевих плівок (літературний огляд)” наведено аналітичний огляд і аналіз публікацій, присвячених проблемі електрофізичних властивостей багат шарових металевих плівкових систем стосовно термічного коефіцієнта опору і явища тензочутливості. Зокрема, розглянуті теоретичні моделі Тельє, Тоссе і Пішар (ТПП) та Варкуша для ТКО і КТ одношарових плівок. В цілому зазначені теоретичні моделі задовільно описують розмірний ефект в ТКО, дозволяють проаналізувати питання про температурну залежність таких параметрів електроперенесення, як середня довжина вільного пробігу електронів (СДВП)  $\lambda_0$ , коефіцієнтів дзеркальності ( $\rho$ ) та розсіювання на межі зерен (МЗ) ( $R$ ). Зроблено висновок, що найбільш ефективною є модель ізотропного розсіювання ТПП, і тому вона в подальшому буде використовуватися для обробки результатів з ТКО одношарових плівок. Наведено аналіз можливих фізичних причин зменшення зазначених параметрів при збільшенні температури. Поряд з цим відмічається, що теоретична модель Варкуша для КТ слабо узгоджується з експериментальними результатами в інтервалі відносно малих товщин і дає протилежну експериментальним і розрахунковим за моделями ТПП даним залежність КТ від товщини плівки. При переході до двошарових плівкових систем ситуація значно ускладнюється, оскільки відома напівкласична модель Дімміха для ТКО двошарових плівок дає лише якісне узгодження із експериментальними результатами (в окремих випадках розходження досягає 100%). Відмічається, що можливою причиною розходження може бути як невизначеність параметра електроперенесення  $a = \lambda_{01} \cdot H_2 \cdot m_2^* \cdot (\lambda_{02} \cdot H_1 \cdot m_1^*)^{-1}$  ( $H_i$  - відомі функції,  $m_i^*$  - ефективна маса електрона), так і ефект температурної залежності параметрів електроперенесення  $\lambda_0$ ,  $\rho$ ,  $r$  (коефіцієнт проходження межі зерна) і  $Q$  (коефіцієнт проходження межі поділу (МП) шарів) та можливі дифузійні процеси і фазоутворення на МП. У випадку ефекту тензочутливості відомі напівкласичні моделі для двошарових плівок також узгоджуються лише якісно. В той же час напівфеноменологічна модель О.Б.Ласюченко, Л.В. Однодворець та І.Ю.Проценка, в якій враховується деформаційна залежність параметрів  $\lambda_0$ ,  $\rho$ ,  $r$  і  $Q$ , навіть при некоректному врахуванні внутрішнього розмірного ефекту, дає задовільне узгодження з експериментальними результатами. В результаті проведеного аналізу основний напрям досліджень був визначений так: розроблення і уточнення теоретичних моделей для ТКО і КТ, які враховують температурну або деформаційну залежність па-

раметрів електроперенесення, та їх експериментальна перевірка на прикладі дво- та тришарових плівкових систем на основі Cr, Cu і Sc (в окремих випадках Co замість Sc).

У другому розділі „Техніка і методика експерименту” описані методи отримання, дослідження і контролю індивідуальності шарів у дво- чи тришаровій плівковій системі.

Плівки Cr, Cu і Sc отримувалися методом термічного, а Co – електронно-променевого випаровування. Для забезпечення необхідних температурних і деформаційних інтервалів досліджень використовувалися два типи підкладок – із фторопласта Ф4 і фольги із Ni. В обох випадках надзвичайна увага приділялася утворенню низькоомних контактів, які мали східчастий характер. У першому випадку він являв собою таку багатошарову систему  $\text{Cu (2 мкм)}_{\text{ел}} / \text{Cu(60 нм)}_{\text{тер}} / \text{Al(20 нм)}_{\text{тер}} / (\text{SiO})_{\text{тер}} / \text{Ni}$ , яка одержувалася шляхом електролітичного (ел) і термічного (тер) осадження. Плівкові зразки (розмір 5 мм×2 мм) конденсувалися у проміжку між контактними майданчиками на Ф4 або SiO. Для коректного порівняння результатів з ТКО і КТ зразки отримувалися на однакових підкладках у одних і тих самих вакуумних умовах, для чого використовувався спеціально сконструйований пристрій, що дозволяв здійснити термоцикування в інтервалі температур 300-700 К або поздовжню деформацію зразка до  $\epsilon_1 \leq 2\%$ . Похибка вимірювання опору за допомогою приладів АРРА-109 і UT-70В, спряжених з комп’ютером, складала не більше 0,06 %. Товщина зразків, на яких вивчалися електрофізичні властивості, визначалася інтерферометричним методом із реєстрацією картини інтерференції цифровою камерою, спряженою з комп’ютером, та методом кварцового резонатора, що забезпечувало точність  $\pm(2-10)$  нм при товщинах плівок 50-200 нм. При проведенні досліджень методом ОЕС товщина зразків вимірювалася лише за допомогою системи кварцових резонаторів. Особливістю другого розділу є те, що в ньому наведена велика кількість температурних і деформаційних залежностей різних плівкових систем.

Оскільки в нашому випадку питання збереження індивідуальності окремих шарів у багатошаровій системі є надзвичайно принциповим при апробації теоретичних моделей, то йому була приділена особлива увага. Для цього були проведені систематичні дослідження кристалічної структури і фазового складу (мікроскоп ЕММА-4), структурного стану поверхні одношарових плівок при різних температурах відпалювання (метод АСМ)<sup>\*</sup>, елементний склад і дифузійні процеси за допомогою методів ВІМС (МС-7201М) та ЕОС<sup>\*</sup>. Зазначимо, що застосування двох останніх альтернативних методів було пов’язано з тим, що при використанні ВІМС поряд із конденсаційно-або термостимульованою дифузією фіксується також іонно-стимульована дифузія, що завищує коефіцієнт дифузії інерідних атомів (рис. 1). У цьому відношенні метод ОЕС як неруйнівний метод дає більш достовірну інформацію. Поряд з цим одночасне використання методів ВІМС і ЕОС дозволяє покрити великий інтервал товщин.

У розділі дане обґрунтування вибору плівкових систем на основі Cu, Cr і Sc(Co).



**Третій розділ** „Термічний коефіцієнт опору багатшарових плівкових систем” складається із 4 підрозділів.

У першому підрозділі наведені результати макроскопічної апрокси-

Рис. 1. Приклади дифузійних профілів для невідпалених плівкових систем Cu/Cr/П:  
 ⊙, ⊠ – Cu(80)/Cr(40)/П (метод ВІМС); ○, □ – Cu(10)/Cr(10)/П (метод ОЕС). Розмиття дифузійних профілів (⊙, ⊠) частково пов’язано із іоностимульованою дифузією. МП – межа поділу, П - підкладка

мації напівкласичної моделі Дімміха для ТКО двошарових металевих плівок. У найзагальнішому вигляді основне співвідношення зазначеної моделі має вигляд

$$\beta = A_1 \left\{ \beta_{01} \left( 1 - \frac{d \ln F_1}{d \ln k_1} - \frac{d \ln F_1}{d \ln m_1} + \frac{d \ln F_1}{d \ln a} \right) - \beta_{02} \left( \frac{d \ln F_1}{d \ln k_2} - \frac{d \ln F_1}{d \ln m_2} + \frac{d \ln F_1}{d \ln a} \right) \right\} + A_2 \left\{ \beta_{02} \left( 1 - \frac{d \ln F_2}{d \ln k_2} - \frac{d \ln F_2}{d \ln m_2} + \frac{d \ln F_2}{d \ln a} \right) - \beta_{01} \left( \frac{d \ln F_2}{d \ln k_1} - \frac{d \ln F_2}{d \ln m_1} + \frac{d \ln F_2}{d \ln a} \right) \right\}, \quad (1)$$

де  $F_i = \frac{\rho_{0i}}{\rho_i}$  - функція Фукса ( $i=1,2$ );  $k_i = \frac{d_i}{\lambda_{0i}}$ ,  $m_i = \frac{L_i}{\lambda_{0i}}$  - зведені товщина і середній розмір кристалітів;  $a$  – параметр моделі Дімміха;  $A_i = \frac{d_i \sigma_{0i} F_i}{d_1 \sigma_{01} F_1 + d_2 \sigma_{02} F_2}$  ( $\sigma_{gi}$  – питома провідність). Індекс „g”

відповідає масивним конденсатам, тобто при  $d_i \rightarrow \infty$ . Виразивши похідні  $\frac{d \ln F_i}{d \ln k_i}$  і  $\frac{d \ln F_i}{d \ln m_i}$  через ТКО

$\beta_i$  та  $\beta_{gi}$  і, подавши перехресні похідні таким чином:

$$\frac{d \ln F_i}{d \ln k_k} = \left( 1 - \frac{\beta_i}{\beta_{gi}} \right) \frac{\beta_{gi}}{\beta_{gk}} \cong \frac{d \ln F_i}{d \ln m_k},$$

апроксимаційне співвідношення для (1) можна записати у вигляді

<sup>9)</sup> Дослідження методами АСМ та ЕОС були проведені автором в Інституті ядерної фізики ПАН (м.Краків).

$$\beta = A_1 \left\{ \beta_{g1} \left( 1 - 2 \left( 1 - \frac{\beta_1}{\beta_{g1}} \right) + \frac{d \ln F_1}{d \ln a} \right) - \beta_{g2} \left( 2 \left( 1 - \frac{\beta_1}{\beta_{g1}} \right) \frac{\beta_{g1}}{\beta_{g2}} + \frac{d \ln F_1}{d \ln a} \right) \right\} +$$

$$+ A_2 \left\{ \beta_{g2} \left( 1 - 2 \left( 1 - \frac{\beta_2}{\beta_{g2}} \right) + \frac{d \ln F_2}{d \ln a} \right) - \beta_{g1} \left( 2 \left( 1 - \frac{\beta_2}{\beta_{g2}} \right) \frac{\beta_{g2}}{\beta_{g1}} + \frac{d \ln F_2}{d \ln a} \right) \right\}. \quad (2)$$

Це співвідношення дозволяє оцінити внесок похідних  $\frac{d \ln F}{d \ln a}$  у загальну величину ТКО:

$$\frac{d \ln F}{d \ln a} \cong \frac{\beta - \beta'}{(\beta_{g1} - \beta_{g2})(A_1 + A_2)}, \quad (3)$$

де  $\beta'$  - ТКО, розрахований за (2) при припущенні, що  $\frac{d \ln F}{d \ln a} = 0$ ,  $\beta$  - експериментальне значення ТКО.

Оцінка величини  $\frac{d \ln F}{d \ln a}$  за співвідношенням (3) дає величину  $\sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , сумірну з величиною  $\beta_i$  та  $\beta_{gi}$ .

Звідси стає зрозумілою причина поганої відповідності теоретичної моделі (1) експериментальним результатам, оскільки через невизначеність параметра  $a$  при апробації моделі авторами похідні  $\frac{d \ln F_i}{d \ln a}$  занулялися. Таблиця 1 дає уявлення про те, наскільки ефективнішою стає модель (1) при врахуванні зазначених похідних, хоча розходження залишається досить значним. Однією із причин цього може бути те, що в (1) не враховується можлива температурна залежність параметрів  $\lambda_0$ ,  $r$ ,  $g$  і  $Q$ . Таким чином, питання про ТКО двошарових плівок потребує подальшого вивчення.

Таблиця 1

Експериментальні та розрахункові дані для ТКО двошарових плівок

Плівкова система	ТКО $\cdot 10^3, \text{ K}^{-1}$			
	експер.	розрахунок за (2)	$(\beta - \beta_{\text{розрах}}) / \beta_{\text{розрах}}, \%$ за (2)	$(\beta - \beta_{\text{розрах}}) / \beta_{\text{розрах}}, \%$ при $d \ln F / d \ln a = 0$
Cr(35)/Co(85)/П	1,62	2,00	23	44
Cr(70)/Co(90)/П	2,20	2,10	18	53
Cu(50)/Cr(55)/П	2,58	1,84	28	167
Cr(180)/Cu(90)/П	1,90	1,81	5,0	126
Co(75)/Cr(75)/П	1,56	2,60	67	65

У другому підрозділі викладені запропоновані нами напівкласичні моделі розмірного ефекту в ТКО одно- і двошарових плівок із урахуванням температурної залежності параметрів електроперенесення. Але робочі формули мають складний нелінеаризований вигляд, що не дає можливості розрахувати термічні коефіцієнти  $\eta_p = \frac{d \ln p}{d \ln l}$ ,  $\eta_r = \frac{d \ln r}{d \ln l}$  та  $\eta_Q = \frac{d \ln Q}{d \ln l}$  (при розрахунках допу-

скається, що  $\beta_Q \cong \beta_r$ ). У зв'язку з цим була також розроблена модель, яка у випадку тришарової системи і з такими

Рис.2. Схема розсіювання і міжшарових переходів електронів: 1,1'' - поверхневе розсіювання (у загальному випадку  $r_1=r_2$ ); 2, 2', 2'' - зерномежове розсіювання (у загальному випадку  $r_1 \neq r_2 \neq r_3$ ); 3, 3', 3'' - розсіювання і проходження межі поділу ( $r_{12} \cong r_1$ ;  $r_{23} \cong r_2$ ;  $r_{32} \cong r_3$ ;  $Q_{12}=Q_{21}$ ;  $Q_{23}=Q_{32}$ ); 3, 3', 3'' - міжшарові переходи при  $\lambda_{01,2} \cong 1/2(d_1+d_2)$ ; 4, 4'' - міжшарові переходи при  $\lambda_{01,3} \cong d_2+1/2(d_1+d_3)$

механізмами розсіювання електронів, як на рис. 2, дає таке співвідношення для ТКО:

$$\begin{aligned}
 \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\} + \\
 & + A_2 \left\{ \beta_{02} - \left( 1 - \frac{\beta_2}{\beta_{02}} \right) \cdot \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) + \right. \right. \\
 & \left. \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) \cdot \frac{\beta_{02}}{\beta_{01}} \right] \right\} + \\
 & + \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) \cdot \frac{\beta_{03}}{\beta_{01}} \left. \right\} + \\
 & + 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\}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

У третьому підрозділі представлені результати комплексних досліджень електронно-мікроскопічними і спектральними методами структурно-фазового стану плівкових зразків. Відсутність фазоутворення (за винятком зразків Co/Cu/П), поступове згладжування поверхневого рельєфу в процесі формування багатошарових зразків (рис.3), відносно слабкі дифузійні процеси дозволяють стверджувати, що різні варіанти плівкових систем мають такий структурно-фазовий стан:

Рис. 3. АСМ – зображення плівок Cr(50)/П (а) і Cu(30)/Cr(30)/П (б)

Дво- або тришарові системи на основі ОЦК Cr, ГЦК Cu та ГЦП Sc незалежно від порядку чергування шарів; тришарові системи ГЦК Cu/ ОЦК Cr/ ГЦП Co або ГЦП Co/ ОЦК Cr/ ГЦК Cu; двошарова система ОЦК Cr/ (ГЦК (Cu-Co)+ ГЦП Co), яка формується при відпалюванні до 900 К системи ГЦП Co/ ГЦК Cu/П. Наведені результати дозволяють здійснити коректно апробацію розроблених нами теоретичних моделей.

У цьому самому підрозділі наведені експериментальні результати для ТКО дво- і тришарових плівкових систем, викладені методика коректного розрахунку ТКО і апробації теоретичної моделі (4). Особливість методики апробації полягає у визначенні термічних коефіцієнтів  $\beta_p$ ,  $\beta_r$  і  $\beta_Q$  та подібних  $\frac{d \ln m_i}{d \ln r_i}$ ,  $\frac{d \ln k_i}{d \ln p_i}$  і т.д. на основі експериментальних залежностей  $\beta$  від  $d$  для одношарових плівок при двох температурах, оброблених у рамках моделі ізотропного розсіювання. Відмічається, що модель (4) найкраще відповідає експериментальним результатам. Наприклад, для плівкових систем Cu(30)/Cr(30)/П; Sc(65)/Cu(43)/П та Cr(15)/Cu(50)/Cr(25)/П розходження складає відповідно 1,8; 21,0 та 18,3%.

У четвертому підрозділі викладена методика розподілу внеску трьох механізмів розсіювання електронів в об'ємі плівки (обумовлює величину  $\rho_0$  або  $\beta_0$ ), на межах зерен (обумовлює величину  $\rho_{gb}$  або  $\beta_{gb0}$ ) та на зовнішніх поверхнях плівки (обумовлює величину  $\rho_d$  або  $\beta_d$ ). Виходячи із умови адитивності цих механізмів, можна записати:

$$\rho = \rho_0 + \rho_{gb} + \rho_d. \quad (5)$$

Із (5) випливає своєрідне правило адитивності для ТКО:

$$\beta = \frac{\rho_0}{\rho} \beta_0 + \frac{\rho_{gb}}{\rho} \beta_{gb} + \frac{\rho_d}{\rho} \beta_d, \quad (6)$$

де  $\frac{\rho_0}{\rho}$ ,  $\frac{\rho_{gb}}{\rho}$  та  $\frac{\rho_d}{\rho}$  - статистична вага внеску в ТКО того чи іншого механізму розсіювання.

Отримавши співвідношення для  $\beta_{gb}$  і  $\beta_d$ :

$$\beta_{gb}(T) = \frac{(\beta_g \rho_g - \beta_0 \rho_0)}{(\beta_g \rho_g - \beta_0 \rho_0)T + (\rho_{gb})_0}, \beta_d(T) = \frac{(\beta \rho - \beta_g \rho_g)}{(\beta \rho - \beta_g \rho_g)T + (\rho_d)_0}, \quad (7)$$

де індекс „0” - значення відповідних величин при  $T \rightarrow 0$  К, можна оцінити статистичну вагу внеску різних механізмів розсіювання в ТКО (табл. 2).

На основі співвідношень (7) проведено розрахунок розмірних залежностей  $\beta_{gb}$  і  $\beta_d$ . Установлено, що в деяких випадках (плівки Cr, Ni, Re) внесок  $\beta_d$  може бути від'ємним, що можна пов'язати

з частково неметалевим механізмом провідності або з особливостями дзеркального відбиття електронів.

**Четвертий розділ** „Коефіцієнт тензочутливості багатошарових плівкових систем” складається із трьох підрозділів.

Таблиця 2

Статистична вага різних механізмів розсіювання електронів у величину ТКО

Плівка	d, нм	$\frac{\rho_0}{\rho}$	$\frac{\rho_{gb}}{\rho}$	$\frac{\rho_d}{\rho}$	$\beta \cdot 10^4, K^{-1}$	$\beta_{розр} \cdot 10^4, K^{-1}$ , співвід. (6)	$\frac{\beta - \beta_{розр}}{\beta}, \%$
Cr	36	0,23	0,22	0,54	5,90	6,06	-2,7
	76	0,35	0,33	0,31	9,00	9,75	-8,3
	200	0,42	0,40	0,14	13,82	13,05	5,6
Cu	55	0,38	0,05	0,62	20,00	19,94	0,3
	75	0,42	0,05	0,56	24,00	22,78	5,1
	130	0,48	0,06	0,48	26,00	24,18	7,0

У першому підрозділі наведені експериментальні результати про тензочутливість тришарових плівок на основі Cr, Cu і Sc. Товщини зразків були підбрані таким чином, щоб можна було порівняти  $\gamma_1$  тришарової системи і одношарової плівки – складової цієї системи ( $\gamma_1^{Me}$ ) та тришарової і одношарової однакової товщини. Було отримано, що в обох випадках  $\gamma_1$  більше  $\gamma_1^{Me}$  від 2 до 10 разів залежно від конкретної системи, що пояснюється значним внеском у величину КТ межі поділу шарів. Отримані результати дозволили запропонувати чутливий елемент тензодатчика на основі багатошарової плівкової системи.

У другому підрозділі здійснено уточнення напівфеноменологічної моделі тензоефекту, яка враховує вплив деформаційних ефектів на параметри електроперенесення. Для тришарової плівкової системи відкориговане співвідношення має вигляд, аналогічний до співвідношення (4), відрізняючись лише тим, що в правій частині похідні  $\ln k_i$  і  $\ln m_i$  по  $\ln p_i$ ,  $\ln r_i$  та  $\ln Q_{ik}$  домножаються на

деформаційні коефіцієнти  $\eta_{pl} = -\frac{d \ln p}{d \varepsilon_1}$ ,  $\eta_{rl} = -\frac{d \ln r}{d \varepsilon_1}$  та  $\eta_{ql} = -\frac{d \ln Q}{d \varepsilon_1}$  (допускається, як у випадку ТКО, рівність  $\eta_{ql} \cong \eta_{pl}$ ), а  $\beta_{oi}$  і  $\beta_i$  замінюються на  $\gamma_{oi}$  і  $\gamma_{il}$ .

Проведена апробація моделі в окремих випадках дає дуже добре узгодження із експериментом (розходження складає від 3 до 27 %). Зокрема, для плівкових систем Cr(70)/Cu(45)/Sc(55)/П, Cu(140)/Cr(65)/Sc(200)/П та Cu(140)/Cr(80)/Cu(75)/П величина  $\frac{(\gamma_1 - \gamma_{1 розр})}{\gamma_1}$  складає відповідно 3%, 13% та 27%. Ми приходимо до висновку, що врахування деформаційних ефектів, як і температурних у випадку ТКО, дозволяє

досягти найкращого узгодження із експериментальними результатами. Це дає можливість на основі запропонованої моделі здійснити комп'ютерне прогнозування тензорезистивних властивостей тришарових систем (рис. 4).

а	б
в	г

Рис.4. Тривимірні діаграми для  $\gamma_1$  при фіксованій товщині одного із шарів. Плівкові системи: Cr/Cu/Sc(46)/П (а), Cu/Sc(46)/Cr/П (б), Cu/Cr/Sc(46)/П (в), Cu(140)/Cr/Sc/П (г)

У третьому підрозділі проаналізоване одне із маловивчених питань про температурну залежність коефіцієнтів поздовжньої і поперечної тензочутливості ( $\gamma_t$ ). Розглянуто два випадки: полікристалічну плівку із  $\beta > 0$  і нанодисперсну або аморфну плівку із  $\beta < 0$ . Зроблено висновок, що залежно від знака  $\beta$  та величини  $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon \partial T}$  може мати місце як збільшення, так і зменшення КТ при збільшенні температури. У випадку полікристалічних металевих плівок має місце майже лінійна залежність з термічним коефіцієнтом КТ  $\beta_{\gamma,t} > 0$ . Крім того, відмічається, що напівемпіричне правило  $\beta_{\gamma,t} \cong -\beta$  не виконується, оскільки аналітичне співвідношення має такий вигляд:

$$\beta_{\gamma,t} \cong -\beta + \frac{1}{\gamma_{t,i} \rho} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_{t,i} \partial T}, \quad (9)$$

де другий доданок має величину порядку  $|\beta|$ . Проведено порівняння (9) із власними експериментальними даними на прикладі плівок Cr та результатами інших авторів для плівок V, (Co-Ni), Mo, W, In, різних керамік.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана задача стосовно встановлення особливостей електрофізичних властивостей і, зокрема, термічного коефіцієнта опору і коефіцієнта тензочутливості багатошарових плівок на основі Cr, Cu і Sc (Co) та з'ясована суть тих фізичних процесів у них, які визначають температурну і деформаційну залежність коефіцієнтів дзеркальності поверхні плівки, проходження межі зерна і межі поділу окремих шарів, і їх внеску у величину ТКО і КТ. У дисертаційній роботі були розв'язані поставлені задачі і отримані такі наукові і практичні результати:

1. Методами електронної та атомно-силової мікроскопії, електроннографії, оже-спектроскопії та вторинно-іонної мас-спектрометрії проведені дослідження структурно-фазового стану двошарових плівок як складових тришарових систем на основі Cr, Cu і Sc (Co) та ступеня збереження індивідуальності окремих шарів:

-різні варіанти двошарових плівок у невідпаленому чи відпаленому стані на основі Cr, Cu і Sc; Cr і Co та Cu і Co (до 600 К) можна розглядати як біпластини, хоча в результаті зерномежової дифузії

має місце певне перемішування елементів (згідно з ЕОС довжина дифузійного пробігу атомів – до 10 нм);

-аналогічне збереження індивідуальності і перемішування елементів має місце у тришарових плівкових системах, що є методичним підґрунтям для апробації теоретичних моделей електрофізичних властивостей, які не враховують дифузійні процеси;

-при температурах відпалювання  $T_b > 600$  К у плівках Co/Cu утворюється метастабільний  $\beta$ - твердий розчин (Cu-Co) на основі Cu, який при охолодженні до  $T < 600$  К частково розпадається із виділенням частинок гексагонального Co.

2. Здійснено подальший розвиток теоретичних моделей для електрофізичних властивостей (ТКО і КТ) багат шарових плівкових систем:

-запропонована методика розрахунку величини ТКО двошарових плівок на основі макроскопічного апроксимаційного співвідношення моделі Р. Дімміха, яке дозволяє врахувати вплив на функцію Фукса параметра провідності, пов'язаного із ефективними масами електронів і СДВП першого і другого шарів;

-розроблені напівкласичні моделі для ТКО (альтернативна моделі Р. Дімміха) і КТ багат шарових плівкових систем;

-розроблена напівфеноменологічна модель для ТКО багат шарових плівкових систем, що враховує температурні ефекти, тобто залежність від температури коефіцієнтів дзеркальності, проходження межі зерен та межі поділу шарів;

-для кількісної характеристики температурних і деформаційних ефектів у параметрах електроперенесення вперше введені до розгляду температурні ( $\beta_p, \beta_r$  і  $\beta_Q$ ) та деформаційні ( $\eta_p, \eta_r$  і  $\eta_Q$ ) коефіцієнти, а також запропонована методика їх визначення, виходячи із експериментальних розмірних залежностей ТКО або КТ при двох різних температурах чи деформаціях відповідно;

-отримано відкориговане співвідношення напівфеноменологічної моделі із урахуванням деформаційних ефектів для параметрів  $p, r$  і  $Q$ , в якому більш правильно враховано поверхневе і зерномежове розсіювання електронів;

-установлено, що узгодженість експериментальних і розрахункових даних покращується при переході від моделі Р.Дімміха до апроксимаційного співвідношення, напівкласичних і напівфеноменологічних моделей; зокрема, в останньому випадку ступінь відповідності знаходиться в межах

$$\frac{\beta - \beta_{\text{розрах}}}{\beta} = \pm(20-22)\% \text{ і } \frac{\gamma - \gamma_{\text{розрах}}}{\gamma} = \pm(3-19)\% \text{ (системи на основі Cu і Sc) та } \pm(0,5-36)\% \text{ і } \pm(25-27)\%$$

(системи на основі Cr і Cu) відповідно.

3. Вперше отримані співвідношення, що дозволяють розраховувати внесок у питомий опір і ТКО плівки об'ємного, поверхневого та зерномежового розсіювання електронів; отримано, що поверхневе розсіювання при малих товщинах (плівки Cr, Ni, Re) може давати від'ємний внесок у

загальну величину ТКО, що можна пояснити зменшенням коефіцієнта дзеркальності при збільшенні температури.

4. Проаналізовано питання про температурну залежність КТ у дисперсних плівкових матеріалах і установлені умови, за яких КТ збільшується або зменшується при нагріванні зразків.

5. Розроблена методика комп'ютерного моделювання терморезистивних і тензорезистивних властивостей тришарових плівкових систем у вигляді тривимірних діаграм  $\beta(\gamma_1)-d_i-d_k$  при фіксованій товщині ( $d_j$ ) одного із шарів; запропонований чутливий елемент тензодатчика у вигляді багатшарової наноструктурної плівкової системи на основі Cr, Co і Ni.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Однодворець Л.В., Проценко С.И., Салтыкова А.И. Электрофизические свойства двухслойных пленок Cu/Cr в условиях взаимной диффузии атомов // Металлофиз. новейшие технол. – 1999. – Т.21, № 8. – С.71-74.
2. Проценко С.И., Черноус А.Н. Методика разделения вклада зернограничного и поверхностного рассеяния в величину удельного сопротивления и ТКС металлических плёнок // ВАНТ. Серия Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 1999. – Вып. 2(10). – С.107-109.
3. Однодворець Л.В., Проценко С.И., Черноус А.М. Про можливість макроскопічної апроксимації мікроскопічної моделі Р.Дімміха // Вісник СумДУ. Серія Природознавчі науки. – 1999. - №2. – С.18-21.
4. Розмірні ефекти в термічному коефіцієнті опору та коефіцієнті розсіювання електронів на межі зерен у тонких металевих плівках / О.А.Білоус, Л.В.Дехтярук, С.И.Проценко, А.М. Черноус // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2001. - №3-4. – С.67-73.
5. Проценко С.И., Токмань В.В., Черноус А.Н. Формирование многослойных пленочных структур с отрицательным ТКС и увеличенным коэффициентом тензочувствительности // Вестник ВГТУ. Серия: Материаловедение. – 2002.- Вып.11. – С.17-19.
6. Проценко С.И. Про температурну залежність коефіцієнтів поздовжньої і поперечної тензочутливості металевих плівок // ФХТТ. – 2002. – Т.3, №3. – С.401-403.
7. Проценко С.И., Черноус А.М. Дослідження і прогнозування тензорезистивних властивостей плівкових систем на основі Cr, Cu і Sc // Металлофиз. новейшие технол. – 2003. - Т.25, №5. – С.587-601.
8. Вплив розсіювання електронів на міжфазній межі на величину коефіцієнта тензочутливості металевих плівок / Є.О.Забіла, Л.В.Однодворець, С.И. Проценко, А.М.Черноус // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2003. - №8. – С.71-78.



9. Проценко С.І., Чорноус А.М. Температурні ефекти в термічному коефіцієнті опору багат шарових плівкових систем // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2003. - №10. – С.43-51.
10. Conductivity and the temperature coefficient of resistance of two-layer polycrystalline films / L.V.Dekhtyaruk, S.I.Protcenko, A.M.Chornous, I.O Shpetnyi // Ukr. J. Phys. – 2004. – V.49, №6. – P.587-597.
11. Ефект тензочутливості у тонких металевих полікристалічних плівках / Л.В. Дехтярук, Є.О. Забіла, С.І. Проценко, А.М. Чорноус // Металлофиз. новейшие технол. – 2004. – Т.26, №10. – С.1333-1345.
12. Пат. 98073761 Україна, G01B7/16. Чутливий елемент тензодатчика / Однодворець Л.В., Проценко С.І., Чорноус А.М.- №0031144А; Заявл. 14.07.1998; Опубл. 15.12.2000, Бюл. №7-11.- С 1.190.
13. Ласюченко Е.Б., Проценко С.І. Температурная и деформационная зависимость зернограничного рассеяния электронов // Тонкие пленки в электронике. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2001. – С.27-28.
14. Маршалек М., Проценко С.І., Чорноус А.Н. Структурно-фазовое состояние двухслойных пленок Co/Cu и Co/Cr // Тонкие пленки в оптике и электронике // Сборник докладов 15-го Международного симпозиума. – Харьков: ННЦ “ХФТИ”, 2003. – С.205-208.
15. Проценко С.І. Температурные и деформационные эффекты в параметрах электропереноса металлических пленок // Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. – Сумы: СумГУ, 2001. – С.130-131.
16. Дехтярук Л.В., Проценко С.І., Чорноус А.М. Температурный коэффициент опору двошарової металеві полікристалічної плівки // Матеріали Міжнародної конференції з фізики і хімії тонких плівок. – Івано-Франківськ: ПрУ, 2001. – С.256.
17. Проценко С.І. Зерномежова дифузія атомів у наноплівковій системі Cr/Cu/Cr // Зб. тез Всеукраїнської конференції ЄВРИКА-2003. – Львів: ЛНУ, 2003. – С.40.
18. Маршалек М., Приходько І., Проценко С. Особливості фазового стану двошарових плівок Co/Cu // Матеріали ІХ Міжнародної конференції з технологій і фізики тонких плівок. Травень, 2003. – Івано-Франківськ: ПрУ, 2003. – С.94-96.

#### АНОТАЦІЯ

**Проценко С.І. Вплив температурної і деформаційної залежності параметрів електроперенесення на електрофізичні властивості багат шарових плівок на основі Cr, Cu і Sc (Co). - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07-фізика твердого тіла.- Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, 2004.

Дисертація присвячена теоретичному і експериментальному дослідженню електрофізичних властивостей (термічний коефіцієнт опору (ТКО) і коефіцієнт поздовжньої тензочутливості (КТ)) одно-, дво- і тришарових плівкових систем на основі Cr, Cu і Sc (Co).

Запропоновані напівкласичні моделі ТКО і КТ для двошарових плівок, які задовільно узгоджуються з експериментальними результатами. Більш ефективними виявилися напівфеноменологічні моделі для багатошарових плівкових систем, які враховують температурну або деформаційну залежність не тільки середньої довжини вільного пробігу електронів, але і коефіцієнтів дзеркальності, проходження межі зерен і межі поділу шарів. Апробація моделей здійснена на дво- і тришарових системах, в яких згідно з даними ВІМС, ЕОС і АСМ зберігається індивідуальність шарів.

Проаналізовані питання про внесок об'ємного, поверхневого і зерномежового розсіювання у величину ТКО та про температурну залежність КТ.

**Ключові слова:** термічний коефіцієнт опору, коефіцієнт тензочутливості, багатошарові плівки, температурна і деформаційна залежність параметрів електроперенесення, термічний коефіцієнт коефіцієнта тензочутливості.

## АННОТАЦИЯ

**Проценко С.И. Влияние температурной деформационной зависимости параметров электропереноса на электрофизические свойства многослойных пленок на основе Cr, Cu и Sc (Co).– Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, 2004.

Диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию электрофизических свойств (термический коэффициент сопротивления (ТКС) и коэффициент продольной тензочувствительности (КТ)) одно-, двух- и трехслойных пленочных систем на основе Cr, Cu и Sc, а в отдельных случаях – Cr, Cu и Co.

Проведенный анализ полуклассической модели Диммиха для ТКС двухслойных пленок показал, что её сильное расхождение с экспериментальными результатами связано с наличием в модели трудноопределяемого параметра и с неучетом температурной зависимости не только СДВП ( $\lambda_0$ ), но и коэффициентов зеркальности ( $\rho$ ), прохождения границы зерен ( $\tau$ ) и границы раздела слоев ( $Q$ ). В связи с этим в работе предложены полуклассическая модель, которая не оперирует вышеуказанным параметром Диммиха, и полуфеноменологическая модель, учитывающая темпе-

ратурную зависимость параметров электропереноса  $\lambda_0$ ,  $\rho$ ,  $\tau$  и  $Q$ . Апробация моделей показала, что вторая более эффективно описывает ТКС двух- и трехслойных пленок.

На момент постановки задач исследований, связанных с коэффициентом тензочувствительности, были известны полуклассическая модель для двухслойных монокристаллических металлических пленок, адаптированная на случай поликристаллических образцов, и полуфеноменологическая модель, учитывающая по аналогии с моделью для ТКС, деформационную зависимость указанных выше параметров электропереноса. Поскольку этот учет был сделан не корректно, то в работе осуществлено уточнение и апробация модели. Имеет место очень хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных (расхождение менее 30%).

В работе особое внимание уделено вопросу структурно-фазового состояния образцов и сохранению в них индивидуальности отдельных слоев – необходимого условия корректной апробации предложенных теоретических моделей.

Проанализировано ряд сопутствующих вопросов, связанных с температурной зависимостью КТ, методикой разделения вклада фонового, поверхностного и зернограничного рассеивания электронов в величину ТКС.

**Ключевые слова:** термический коэффициент сопротивления, коэффициент тензочувствительности, многослойные пленки, температурная и деформационная зависимость параметров электропереноса, термический коэффициент коэффициента тензочувствительности.

## SUMMARY

**Protsenko S.I. The influence of temperature and deformation dependence of electrons transfer parameters on electrical and physical properties of multilayer film Cr, Cu and Sc (Co) based. – Manuscript.**

Thesis for a Doctor of philosophy degree (Ph. D.) in physics and mathematics on specialty 01.04.07 - Solid State Physics. – Kharkiv National Karazin University, Kharkiv, 2005.

The dissertation is devoted to theoretical and experimental investigation of electrophysical properties (thermal coefficient of resistance - TCR and gauge factor-GF of longitudinal tensosensitivity of single-, double- and triple-layers film systems Cr, Cu and Sc (Co) based.

Semi-classic models of TCR and GF for double-layers films, which satisfactorily correspond to experimental results, were proposed. Semi-phenomenon models for multilayers film systems with account temperature and deformation dependences of the mean-free path of electrons, coefficients of the transmission at the grain boundary and at the interfaces rendered more effective. Models has been tested for double- and triple-layers systems, in which individual layers keep with SIMS, EAS and AFM data.

Selection method of volume, surface, and grain boundary electron scattering contribution in TCR proposed.

**Key words:** thermal coefficient of resistance, gauge factor, multilayer films, temperature and deformation dependence of parameters of electrons conductivity, thermal coefficient of gauge factor.

Підп. до друку 31.03.2005р.

Формат 60×84/16.Ум. друк. арк. 1,1.

Наклад 100 прим.

Замовл. № 143.

Обл.- вид. арк. 0,9.

Вид-во СумДУ. Р.с. № 34 від 11.04.2000 р.

40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Друкарня СумДУ.

40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.