

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Великодний Дмитро Володимирович

УДК 621. 316. 8

**ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ
Cu/Cr I Fe/Cr В ОБЛАСТІ ПРУЖНОЇ І ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2009

Дисертацією є рукопис.

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

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

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

доктор фізико-математичних наук, професор **Багмут Олександр Григорович**, завідувач кафедри теоретичної та експериментальної фізики Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Захист відбудеться «17» грудня 2009 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Сумського державного університету.

Автореферат розіслано « 10 » листопада 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.С. Опанасюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Велика увага дослідників до плівкових матеріалів обумовлена їх унікальними механічними, електричними, оптичними та іншими властивостями, що дає можливість їх широкого використання як чутливих елементів різних сенсорів. Не зважаючи на тривалий час досліджень тензорезистивних властивостей різних матеріалів, ця проблема й досі залишається актуальною, хоча відносно тензочутливості в області пружної деформації (до 1%) тонких дротів, одно- та багатошарових плівок, у тому числі і плівкових сплавів, накопичений значний теоретичний і експериментальний матеріал. Поряд із цим вивчення тензорезистивних, механічних та інших властивостей в області непружної деформації залишається актуальним і до теперішнього часу. Вузловими тут залишаються питання, пов'язані з впливом дисперсності плівки на механічні та електрофізичні властивості, роллю дифузійних процесів і фазоутворення у цих явищах. Також слід зазначити, що дослідження останніх років відображають тенденцію пошуку різних матеріалів із покращеними тензорезистивними характеристиками і, зокрема, з підвищеною термостійкістю, більшою величиною коефіцієнта тензочутливості (КТ) та більш широким інтервалом пружної деформації. Виходячи із узагальнень літературних даних і аналізу результатів робіт, ми дійшли до висновку, що певну перспективу з точки зору температурного інтервалу стійкості і величини КТ мають дво- і багатошарові плівкові системи. Ця обставина і визначила мету наших досліджень тензорезистивних властивостей двошарових металевих плівок на основі Cu і Cr (вони задовольняють умові двошаровості, або біпластини) та Fe і Cr (в них утворюється твердий розчин на основі ОЦК Fe) у діапазоні повздовжньої деформації 0-2%, який включає у себе пружну, квазіпружну та пластичну деформацію.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до 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” Міністерства освіти і науки України та спільних проектів науково-технічного співробітництва № М/344-2008 „Електрофізичні властивості (температурний коефіцієнт опору і тензочутливість) багатошарових плівкових систем Cr/Fe і Gd/Fe” (2008-2010 рр.) між Сумським держуніверситетом і Університетом Барода (м. Вадодара, Індія). Дисертант брав участь у виконанні зазначених НДР як

виконавець наукових досліджень та при підготовці проміжних і заключних звітів.

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи полягає у проведенні комплексних експериментальних та теоретичних досліджень фізичних процесів у чутливих елементах тензодатчиків на основі двошарових плівкових систем Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації, встановленні взаємного зв'язку між структурно-фазовим складом і тензорезистивними властивостями та закономірностей тензоєфекту з метою подальшого прогнозування тензорезистивних властивостей.

Для досягнення даної мети нами були поставлені та розв'язані такі задачі:

- розроблена автоматизована система із відповідними апаратно-програмними засобами, що дозволяє отримувати плівкові зразки з наперед заданими товщинами;
- виготовлена автоматизована система для дослідження повздовжньої тензочутливості у діапазоні деформації до 2% із використанням апаратних засобів та програмного забезпечення, розробленого у середовищі програмування LabVIEW;
- розроблена методика контролю структурного стану плівки у процесі деформації за допомогою оптичної системи;
- встановлені особливості деформаційних залежностей опору, відносної зміни опору та миттєвого коефіцієнта тензочутливості від величини деформації та номера деформаційного циклу;
- вивчені особливості розмірного ефекту у КТ двошарових плівок Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації;
- здійснена експериментальна перевірка феноменологічних моделей та „правила важеля” для КТ двох різних типів систем: перша система Cu/Cr задовольняє умові двошаровості, або біпластини, а друга Fe/Cr – умові гомогенності, оскільки у ній вже у процесі конденсації утворюється по всьому об'єму зразка твердий розчин (т.р.) (α -Fe,Cr);
- розраховані параметри електроперенесення і їх зміна при деформації плівок.

Об'єкт дослідження: фізичні процеси у чутливих елементах плівкових високотемпературних тензодатчиків у діапазоні пружної, квазіпружної та пластичної деформації на основі металевих плівок.

Предмет дослідження: тензорезистивні властивості двошарових плівкових систем Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації.

Відповідно до поставлених задач були використані такі *методи одержання та дослідження* зразків:

- термічне випаровування і пошарова конденсація плівок;

- метод дослідження тензорезистивних властивостей за допомогою розробленої автоматизованої системи;
- методика контролю структурного стану поверхні зразка на основі оптичних вимірювань;
- електронна мікроскопія та електронографія.

Наукова новизна одержаних результатів. Здійснені у роботі експериментальні та теоретичні дослідження фізичних процесів і тензорезистивних властивостей одно- та багатошарових плівок на базі Cu, Cr та Fe в області пружної та пластичної деформації дозволили отримати такі нові результати:

- вперше отримані експериментальні дані про тензорезистивні властивості плівок Cu/Cr та Fe/Cr як чутливих елементів високотемпературних тензодатчиків у діапазоні деформацій до 2 %, що включає область пружної, квазіпружної та пластичної деформації;
- здійснено порівняння експериментальних результатів з розрахунковими на основі феноменологічних моделей та „правила важеля”;
- вперше здійснено розрахунок параметрів електроперенесення для плівок Cu/Cr та Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації;
- вперше встановлені особливості тензорезистивних властивостей для двошарових плівок Cu/Cr та Fe/Cr при великих кількостях деформаційних циклів (до 35-и) та при різних швидкостях деформації (від 0 до 0,1 %/с).

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність становлять більшість отриманих експериментальних результатів, які можуть бути у подальшому використані у різноманітних сферах науки і техніки, у приладобудуванні, мікро- та наноелектроніці. Фундаментальне значення мають дані, що розширюють уявлення про властивості плівкових систем, деформація яких відбувається не лише у діапазоні пружної, але й пластичної деформації.

Особистий внесок здобувача. Виготовлення плівкових зразків та дослідження їх тензорезистивних властивостей, проведення електронно-мікроскопічних та електронографічних досліджень, обробка всіх експериментальних результатів. Постановка мети та задачі досліджень виконані спільно з науковим керівником проф. Проценком І.Ю. Розробка автоматизованої системи вимірювання КТ здійснено спільно з доц. Проценком С.І. Особисто автором підготовлені статті [3, 8, 9], тези доповідей [10-17], окремі розділи у [2, 5, 6], обговорювалися матеріали робіт [1, 4, 7].

Апробація результатів дисертації. Основні результати, що були отримані у ході виконання експериментів та підготовки роботи, обговорювалися на таких наукових конференціях та семінарах:

II Міжнародній конференції „Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології” (Київ, 2007 р.); VIII Міжнародній конференції „Фізичні явища у твердих тілах” (Харків, 2007 р.); Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики „ЕВРИКА” (Львів, 2008 р.); Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів Сумського державного університету (Суми, 2005, 2007, 2008, 2009 рр.); Міжнародній науковій конференції „Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур” (Харків, 2008 р.); у рамках Харківської нанотехнологічної Асамблеї (Харків, 2008 р.); семінарі кафедри прикладної фізики Університету Барода (Вадодара, Індія, 2008 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 17 публікаціях, основними з них є 9 [1-9], серед них 7 статей [1-7], опублікованих у фахових наукових журналах, 2 статті [8, 9] у нефармових виданнях та 8 тез доповідей [10-17].

Структура і зміст роботи. Робота складається із вступу, 4-х розділів, висновків та списку використаних джерел із 121 найменувань. Дисертація викладена на 132 сторінках, містить 53 рисунки і 33 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, основні задачі, об'єкт та предмет досліджень, розкриті новизна та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведені відомості про апробацію результатів та структуру дисертації.

У першому розділі „Тензорезистивні властивості двошарових плівкових систем як чутливих елементів тензодатчиків (літературний огляд)” наведено аналітичний огляд і аналіз публікацій, присвячених ефекту тензочутливості у тонкоплівкових зразках в цілому та, зокрема, у плівкових системах на основі металів Cu, Cr та Fe. Наведено основні співвідношення феноменологічної моделі розрахунку величини КТ для двошарових плівкових систем, що являють собою біпластину або плівковий сплав. Розглянуті механічні та тензорезистивні властивості дво- і багатошарових металевих плівкових систем в області пружної і пластичної деформації та зроблено висновок, що, хоча це питання і перебуває у полі зору інтенсивних експериментальних і теоретичних досліджень, дані стосовно тензорезистивних властивостей металевих плівок в області пластичної деформації обмежені. З метою оцінки температурної стабільності та стабільності у часі наведено огляд робіт стосовно кристалічної структури та дифузійних процесів у плівкових чутливих елементах тензодатчиків. Дослідження двошарових плівок на

основі α -Fe і Cr свідчать про те, що в них утворюється т.р. (α -Fe, Cr) вже на стадії конденсації верхнього шару, в той час як плівкова система Cu/Cr з відхиленням у декілька відсотків являє собою біпластину. Приклади успішного застосування плівкових зразків як чутливих елементів тензодатчиків стимулюють до пошуку нових матеріалів з покращеними робочими характеристиками.

У другому розділі „Методика і техніка експерименту” описані методи одержання та дослідження тензорезистивних властивостей плівкових систем на основі Cu, Cr та Fe. Одно- та двошарові плівки (товщина окремих шарів становила $d=10-80$ нм) отримувалися методом термічного випаровування з використанням спеціально розробленої автоматизованої системи вакуумної конденсації в камері установки ВУП-5М з тиском залишкових газів $\sim 10^{-4}$ Па на підкладку (П) з полістиролу із заздалегідь підготовленими контактними майданчиками (рис. 1). Для вимірювання товщини застосовувався метод кварцового резонатора; екран, що закривав зразок і пластину кварцу, приводився в рух вакуумним електромагнітом. Використання автоматизованої системи дало можливість в автоматичному режимі отримувати плівкові зразки заданої товщини з точністю ± 1 нм, будувати експериментальні залежності $d(t)$ та $R(d)$.

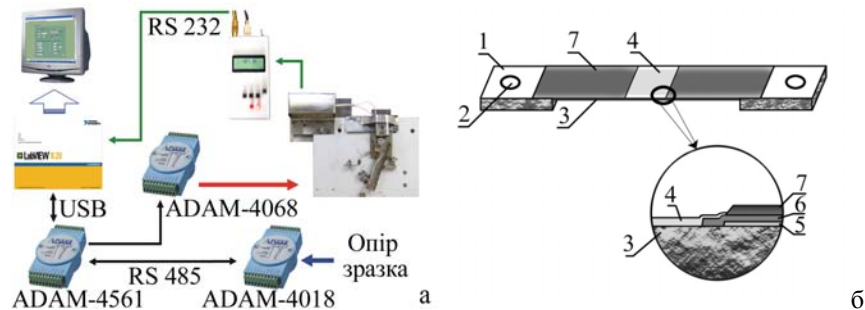


Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи вакуумної конденсації тонкоплівкових зразків (а) та схематична будова підкладки для вимірювання КТ (б): 1 – алюмінієві кріплення; 2 – отвори під гвинти; 3 – підкладка з полістиролу; 4 – плівковий зразок; 5, 6 – підшар Cr і Cu; 7 – шар електролітично осадженого Cu

Дослідження тензорезистивних властивостей проводилося за допомогою розробленої автоматизованої системи (рис. 2), її розробка дала можливість проводити велику кількість деформаційних циклів „навантаження – зняття навантаження” у статичному і динамічному режимах роботи та вивчати ресурс роботи чутливих елементів

тензодатчика; змінювати швидкість деформації у діапазоні від 0 до 0,1 %/с, отримувати до 10^6 експериментальних точок, що свідчить про точність отримуваних результатів, а також дозволила одночасно з процесом деформації зразка проводити дослідження його структурного стану.



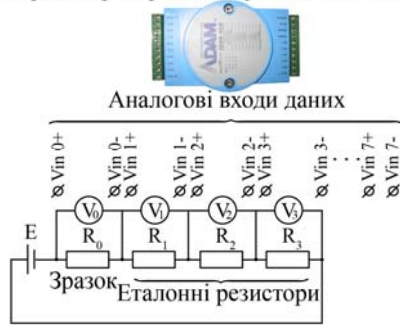
Рис. 2. Структурна схема автоматизованої системи дослідження тензоефекту (а) та інтерфейс програмного забезпечення (б)

Управління ходом експерименту та обробка результатів (побудова графіків, таблиць) здійснювалися за допомогою програмного забезпечення, розробленого у середовищі LabVIEW 8.50 з використанням модуля машинного зору LabVIEW Vision Development Module 8.2.

Апаратну основу розроблених автоматизованих систем склали: саморобний частотомір, 8-канальний 16-бітний сигма-дельта АЦП ADAM-4018, за допомогою якого за чотириточковою схемою вимірювався опір зразка (рис. 3а); релейний модуль ADAM-4068, який подавав управляючу напругу на електродвигун та електромагніт екрану (рис. 3б); перетворювач інтерфейсів USB→RS232/422/485 ADAM-4561; асинхронний конденсаторний електродвигун типу Д-219П1У3 та веб-камера Creative Labs з розрізняльною здатністю 640x480 при 10 кадрах/с. Структурний стан плівкових зразків контролювався оптичним методом за допомогою світло- та фотодіоду (рис. 4).

При дослідженні тензоефекту підкладка із системою контактів і зразком одним кінцем фіксувалася консольно, а другим – кріпилася до штоку мікрогвинта (ціна поділки – 0,02 мм), який через редуктор приєднувався до електродвигуна, напрям обертання якого задавався сигналом з релейного модуля ADAM-4068. Web-камера розміщувалась біля мікрогвинта і фіксувала його зображення із частотою 10 кадрів/с. Автоматизована система дозволила вивчати тензоефект у динамічному або статичному режимі зі швидкістю деформації від 0 до 0,1 %/с в інтервалах пружної ($\Delta\varepsilon_1 = 0-1$ %) або пластичної деформації ($\Delta\varepsilon_2 = 1-2$ %) зразків.

Мікроконтролерний модуль ADAM-4018



Модуль електромагнітних реле ADAM-4068

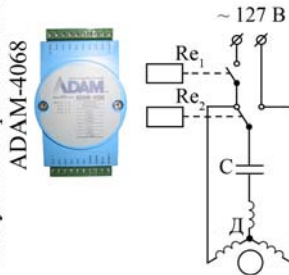


Рис. 3. Електрична принципова схема вимірювання опору за допомогою модуля ADAM-4018 (а) та схема управління асинхронним конденсаторним електродвигуном типу Д-219П1У3 (б)

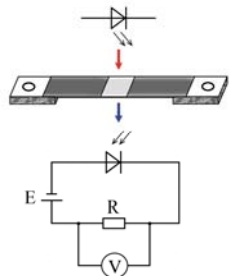


Рис. 4. Схема системи контролю структурного стану плівки

Деформація зразків у інтервалі $\Delta\varepsilon_{i2}$ здійснювалася лише після VII-го деформаційного циклу в інтервалі $\Delta\varepsilon_{i1}$. Крім цього, режими роботи системи дозволяють вивчати ресурс роботи плівкових зразків як можливих чутливих елементів тензодатчиків при різній кількості деформаційних циклів „навантаження-зняття навантаження” (до 35 таких циклів). З метою стабілізації мікропластичних процесів через інтервал $\Delta\varepsilon_i = 0,05\%$ здійснювалася зупинка на 10 с.

Дослідження кристалічної структури та фазового складу проводилося методом просвічуючої електронної мікроскопії та електронографії швидких електронів на мікроскопі ПЕМ-125К. Електронографічні дослідження вказують на те, що плівки Cr і Fe мають ОЦК, а Cu – ГЦК решітки з параметрами, близькими до їх величини у масивних зразках. У той час як фазовий склад двошарових плівок Fe/Cr та Cu/Cr відповідає ОЦК твердий розчин (α -Fe, Cr) та ОЦК Cr + ГЦК Cu (біпластина).

Третій розділ „Тензорезистивні властивості плівкових систем на основі Cu і Cr як чутливих елементів тензодатчиків” складається з двох підрозділів.

У *першому підрозділі* наведені результати дослідження тензорезистивних властивостей одношарових плівок Cu та Cr в області пружної і пластичної деформації. На рис.5 наведено приклади

деформаційних залежностей відносної зміни опору $\Delta R/R_0$, опору R і миттєвого значення КТ γ_{EM} та відносної зміни напруги $\Delta U/U_0$ і напруги U на p-n-переході фотодіода від деформації ε_i для одношарових плівок Cr та Cu.

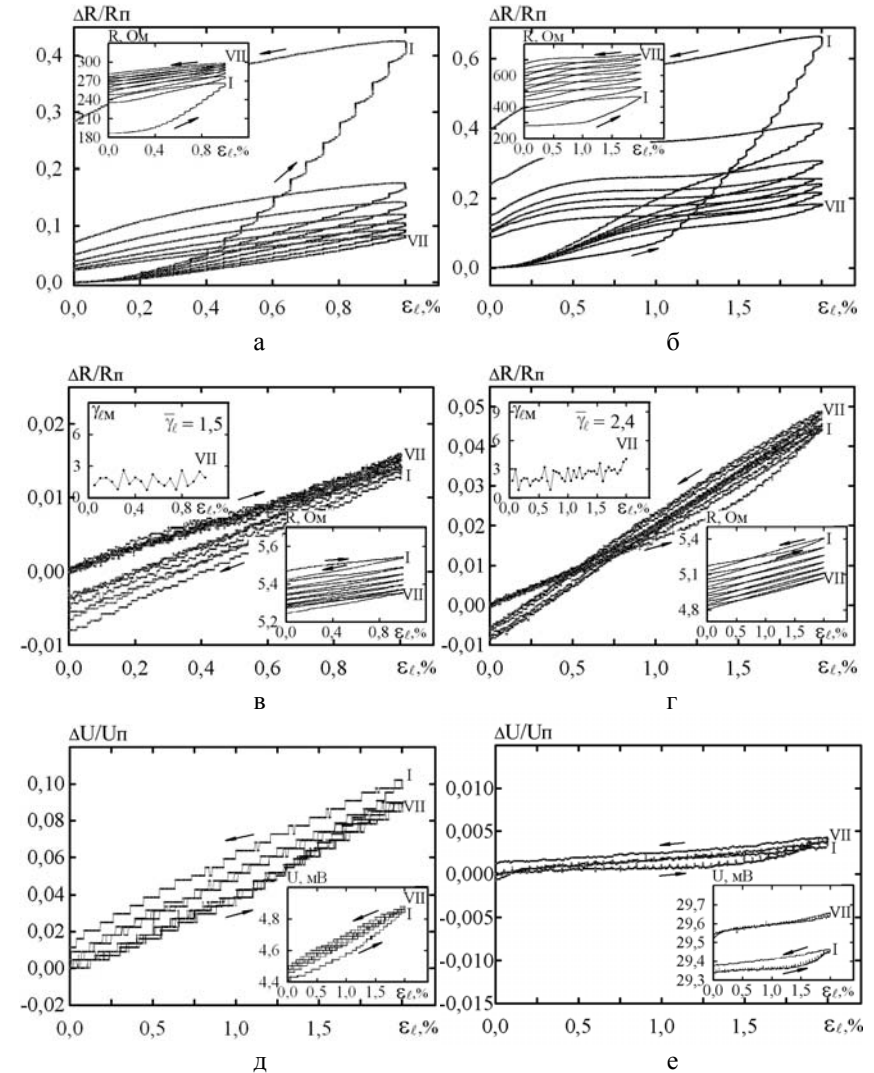


Рис. 5. Деформаційна залежність $\Delta R/R_0$, R та γ_{EM} (а- г), $\Delta U/U_0$ та U (д, е) від ε_i для плівки Cr(30)/Pi (а, б, д) та Cu(40)/Pi (в, г, е)

Значний інтерес при дослідженні тензорезистивних властивостей становить І-й цикл, оскільки при його реалізації проявляється механізм переходу від пружної до пластичної деформації. Він проявляється у зміні кута нахилу деформаційної залежності та появи сходинок, що з'являються в області пластичної деформації під час зупинок мікрогвинта на кожній поділці (через 0,05 % деформації) на 10 с і відсутні в області пружної деформації. На рис. 5 а на І-му деформаційному циклі можна бачити перехід пружна-пластична деформація. Значення величини деформації переходу $\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$ залежить від товщини плівки, зменшуючись або збільшуючись із товщиною.

Оскільки тензоефект доцільно вивчати лише за умови структурної суцільності зразків, то у процесі експерименту нами контролювався структурний стан плівкових систем за допомогою фотоелемента, яким реєструється відносна інтенсивність (I) світлових променів, що проходять через систему плівка/підкладка (реєструється напруга U на р-п-переході фотодіода, яка пропорційна I). В області пружної деформації залежність I від ε_{ℓ} має лінійний характер, і при переході до пластичної деформації відбувається незначна зміна кутового коефіцієнта. Коли у зразках з'являються мікротріщини (їх можна спостерігати у растровому або тунельному мікроскопі), зазначена залежність відхиляється від лінійної. Залежності, наведені на рис. 5 д, е, мають лінійний характер і відповідно свідчать про збереження структурної цілісності зразка.

Однією з основних характеристик роботи тензодатчика також є його чутливість до деформації ($S=dR/d\varepsilon$) у залежності від типу деформації. Результати розрахунків чутливості в області пружної і пластичної деформації для плівок Cr та Cu наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Чутливість до деформації плівок Cr і Cu

Плівка	$\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}, \%$	$S_{\text{пр}}, \text{ Ом}/\%$	$S_{\text{пл}}, \text{ Ом}/\%$	$\left(\frac{S}{R}\right)_{\text{пр}}$	$\left(\frac{S}{R}\right)_{\text{пл}}$	$\frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{пр}}}$	$\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{пр}}}$
Cr(30)/П	0,20	16,3	28,7	8,7	15,2	1,8	1,0
Cr(50)/П	0,15	11,5	24,5	13,8	29,1	2,1	1,0
Cr(75)/П	0,10	8,8	18,8	17,3	38,2	2,3	1,0
Cu(20)/П	>2	0,18	-	2,6	-	-	-
Cu(30)/П		0,16	-	2,2	-	-	-
Cu(40)/П		0,10	-	1,8	-	-	-

При проведенні розрахунків на графіках залежності опору R від деформації ε_{ℓ} визначалася межа переходу пружна-пластична деформація. Від цієї межі відкладалися відрізки величиною 0,2 % в області пружної і

пластичної деформації і відносно цих відрізків проводився розрахунок чутливості для кожної із областей, які відповідають певному типу деформації. Порівняння величин $(S/R)_{\text{пр}}$ і $(S/R)_{\text{пл}}$ дають можливість зробити висновок, що збільшення γ_{ℓ} (як і $\bar{\gamma}_{\ell}$) відбувається за рахунок збільшення чутливості до деформації плівки при переході від пружної до пластичної деформації.

Відповідно до отриманих експериментальних даних можна зробити узагальнюючий висновок: величина деформації, при якій відбувається перехід пружна-пластична деформація $\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$ у одношарових плівках Cr, знаходиться у межах від 0,2 до 0,1 % і зменшується з ростом товщини. При цьому величини КТ лежать у межах від 42,3–47,5 для І-го до 8,2–13,3 для VII-го деформаційного циклу і з ростом товщини зростають. Для одношарових плівок Cu $\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$ знаходиться в діапазоні деформацій, що перевищує 2 %, а КТ знаходяться у межах від 1,5–1,3 до 2,6–1,4 і зменшуються з ростом товщини плівки.

Розрахунок таких параметрів електроперенесення, як деформаційний коефіцієнт $\eta_{\lambda_{g\ell}}$ середньої довжини вільного пробігу (СДВП) та зміна СДВП при деформації $\Delta\lambda_g$ для одношарових плівок Cr і Cu, проводився на основі таких співвідношень:

$$\bar{\gamma}_{\ell} = \bar{\gamma}_{\ell}^p + 1 + 2\mu, \quad \bar{\gamma}_{\ell}^p = \eta_{\lambda_{g\ell}} + 1 \quad \text{та} \quad \Delta\lambda_g = -\eta_{\lambda_{g\ell}} \lambda_g \Delta\varepsilon_{\ell},$$

де $\bar{\gamma}_{\ell}^p$ – середнє значення КТ, виражене через ρ, μ – коефіцієнт Пуассона.

Результати розрахунків наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Тензорезистивні характеристики плівок Cr і Cu

Плівка	λ_0/λ_g ($\varepsilon_{\ell} = 0 \%$)	λ_0/λ_g ($\varepsilon_{\ell} = 1 \%$)	$\eta_{\lambda_{0\ell}}, \eta_{\lambda_{g\ell}}$	$\Delta\lambda_0/\Delta\lambda_g, \text{ нм}$
Cr(30)/П	62,7	68,4	5,6	-3,8/-1,0
Cr(50)/П			8,1	-5,5/-1,4
Cr(75)/П			10,7	-7,3/-1,9
Cu(20)/П	119,5	119,2	-0,1	0,1/0,03
Cu(30)/П			-0,6	0,7/0,17
Cu(40)/П			-1,2	1,4/0,3
Cu(1,2·10 ⁵)			-1,6	2,0/-

У другому підрозділі наведені результати досліджень тензоефекту для двошарових плівок Cu/Cr/П. На рис. 6 наведено типовий приклад деформаційних залежностей $\Delta R/R_{\text{п}}, R, \gamma_{\text{ем}}$ та $\Delta U/U_{\text{п}}$ і U від ε_{ℓ} для двошарової плівки Cu(20)/Cr(30)/П. Узагальнені експериментальні дані наведені у таблицях 3-4.

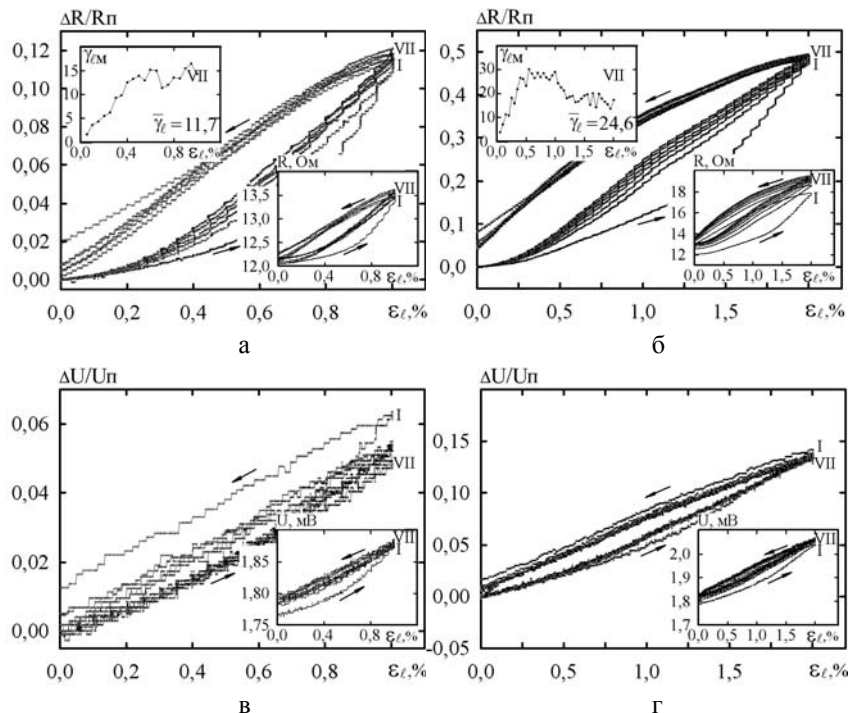


Рис. 6. Залежність R , $\Delta R/R_{п}$ і γ_{lM} (а, б) та U і $\Delta U/U_{п}$ (в, г) від ε_l для плівкової системи $\text{Cu}(20)/\text{Cr}(30)/\Pi$

Таблиця 3

Значення $\bar{\gamma}_l$ для різних деформаційних циклів при $\Delta\varepsilon_l = 1\%$ та порівняння його із $\bar{\gamma}_l$ плівок Cu і Cr

Двошарова система	Загальна товщина, нм	Значення $\bar{\gamma}_l$ для різних деформаційних циклів при $\Delta\varepsilon_l = 1\%$							$\frac{\bar{\gamma}_l^{\text{Cu}}}{\bar{\gamma}_l}$	$\frac{\bar{\gamma}_l^{\text{Cr}}}{\bar{\gamma}_l}$
		I	II	III	IV	V	VI	VII		
$\text{Cu}(20)/\text{Cr}(15)/\Pi$	35	1,9	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	1,2	-
$\text{Cu}(20)/\text{Cr}(20)/\Pi$	40	10,2	10,5	11,1	11,4	11,9	12,2	12,4	0,2	-
$\text{Cu}(20)/\text{Cr}(30)/\Pi$	50	11,3	11,3	11,8	12,1	11,4	11,6	11,7	0,2	0,7
$\text{Cu}(20)/\text{Cr}(35)/\Pi$	55	16,2	15,5	16,0	16,3	16,3	16,3	16,1	0,2	-
$\text{Cu}(20)/\text{Cr}(45)/\Pi$	65	21,5	24,7	25,5	26,3	27,1	27,8	28,5	0,1	-

Таблиця 4

Чутливість до деформації плівок $\text{Cu}/\text{Cr}/\Pi$

Плівка	$\varepsilon_l^{\text{пер}}, \%$	$S_{\text{пр}}, \text{Ом}/\%$	$S_{\text{пл}}, \text{Ом}/\%$	$\left(\frac{S}{R}\right)_{\text{пр}}$	$\left(\frac{S}{R}\right)_{\text{пл}}$	$\frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{пр}}}$	$\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{пр}}}$
$\text{Cu}(20)/\text{Cr}(20)/\Pi$	0,60	0,6	0,9	6,5	10,4	1,6	1,0
$\text{Cu}(20)/\text{Cr}(30)/\Pi$	0,50	0,6	1,3	4,9	10,5	2,2	1,0
$\text{Cu}(20)/\text{Cr}(35)/\Pi$	0,45	0,9	1,9	8,5	16,5	2,0	1,1
$\text{Cu}(20)/\text{Cr}(45)/\Pi$	0,40	2,2	2,2	19,0	18,2	1,0	1,1

Узагальнюючи експериментальні дані, можна відзначити таке: величина деформації, при якій спостерігається перехід пружна-пластична деформація для двошарових плівок Cu/Cr , знаходиться у межах від 1,3 до 0,4% і зменшується зі збільшенням концентрації атомів Cr $c(\text{Cr})$ у загальній товщині плівкової системи, а величина КТ знаходиться у межах від 10,2–21,5 до 12,4–28,5 і збільшується з ростом d_{Cr} при фіксованому значенні товщини шару Cu .

Експериментальні результати, отримані в області пружної деформації, непогано співвідносяться з розрахунковими на основі феноменологічної моделі для плівкової системи типу біпластина. На рис. 7 наведено результати розрахунків величини $\bar{\gamma}_l$ та їх порівняння з експериментом.

$$\gamma_l^p = \gamma_{l1}^p + \gamma_{l2}^p - \frac{d_1\mu_1 + d_2\mu_2}{d_1 + d_2} - \frac{\gamma_{l1}^p\rho_1d_2 - \rho_1d_2\mu_2 + \gamma_{l2}^p\rho_2d_1 - \rho_2d_1\mu_1}{\rho_1d_2 + \rho_2d_1} \cong \gamma_{l1}^p + \gamma_{l2}^p - \frac{\gamma_{l1}^p\rho_1d_2 + \gamma_{l2}^p\rho_2d_1}{\rho_1d_2 + \rho_2d_1} \quad (1)$$

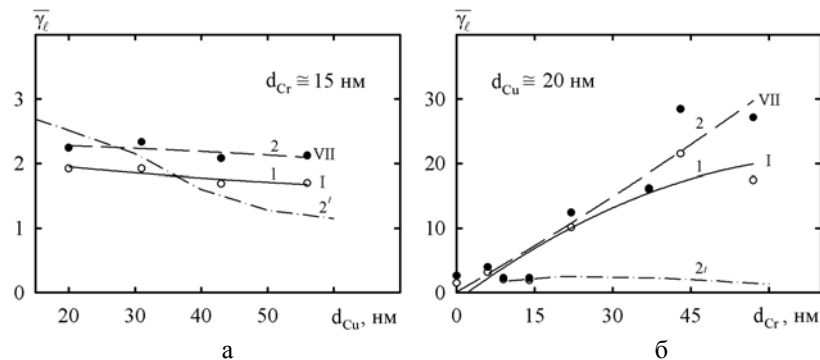


Рис. 7. Порівняння експериментально отриманих значень $\bar{\gamma}_l$ для плівкових систем $\text{Cu}(d)/\text{Cr}(15)/\Pi$ (а) та $\text{Cu}(20)/\text{Cr}(d)/\Pi$ (б) при $\Delta\varepsilon_l = 1\%$ з розрахованими на основі формули 1 (крива 2')

На основі експериментально отриманих для недеформованих і деформованих в області пружної деформації значень питомого опору двошарової плівки ρ і його залежності від товщини d нами вперше був розрахований ефективний коефіцієнт зерномежового розсіювання електронів R для двошарової плівкової системи Cu/Cr на основі співвідношення

$$\rho_{\text{роз}} \cong \rho_{\infty} + \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{1-R} \cdot \frac{8A}{3(1-R)L} + \frac{A}{(d_1 + d_2)},$$

де ρ_{∞} і A відповідно були рівними:

$$\rho_{\infty} = 1,30 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \text{ і } A = \frac{3}{8} (1-R) \rho_{\infty} \lambda_g = 45,2 \cdot 10^{-16} \text{ Ом} \cdot \text{м та}$$

$$\rho_{\infty} + \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{1-R} \cdot \frac{\rho_{\infty} \lambda_g}{L} = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \text{ і } L = \frac{d_1}{d_1 + d_2} L_1 + \frac{d_2}{d_1 + d_2} L_2.$$

Параметр R визначався методом підбору за умови рівності значень $\rho_{\text{роз}}$ та $\rho_{\text{екс}}$ (розрахункове та експериментальне значення питомого опору) для пліткових систем Cu/Cr/П різної товщини. Його величина лежить у межах від 0,08 до 0,15 для недеформованих та від 0,08 до 0,16 для zdeформованих плівок.

Четвертий розділ „Тензорезистивні властивості пліткових систем на основі α -Fe і Cr як чутливих елементів тензодатчиків” складається з двох підрозділів.

У *першому підрозділі* наведені результати дослідження тензорезистивних властивостей одношарових плівок α -Fe в області пружної і пластичної деформації. На рис. 8 наведено типовий приклад деформаційних залежностей $\Delta R/R_{\text{п}}$, R , $\gamma_{\text{ем}}$ та $\Delta U/U_{\text{п}}$ і U від ε_{ℓ} для плівки Fe, нарощення деформації якої відбувалося поступово з кроком $\Delta \varepsilon_{\ell} = 0,25\%$ по три деформаційних цикли у кожному інтервалі деформації.

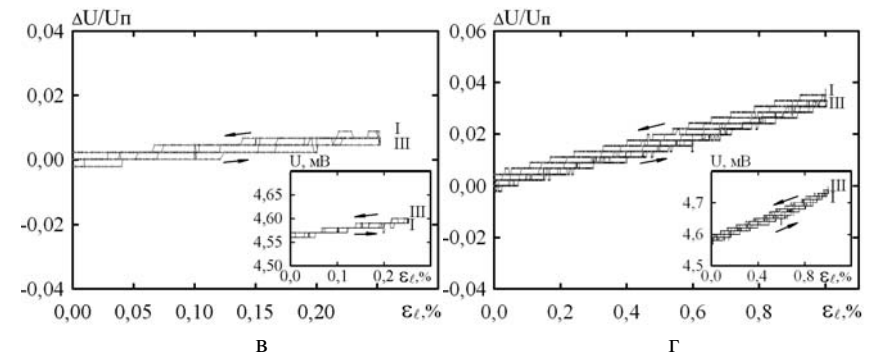
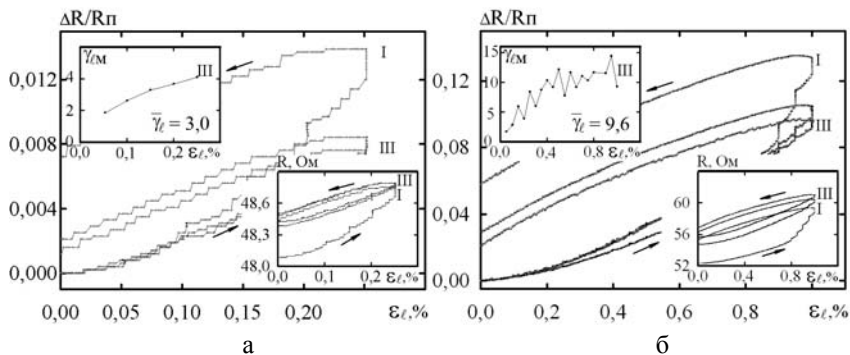


Рис. 8. Залежність R , $\Delta R/R_{\text{п}}$ і $\gamma_{\text{ем}}$ (а, б) та U і $\Delta U/U_{\text{п}}$ (в, г) від ε_{ℓ} для плівки Fe(50)/П

Результати розрахунків чутливості до деформації наведені у таблиці 5. Як висновок можна відзначити, що на відміну від одношарових плівок Cr величина деформації, при якій відбувається перехід пружна-пластична деформація $\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$ в одношарових плівках α -Fe, знаходиться у межах від 0,1 до 0,4% і зростає з ростом товщини. При цьому величина КТ лежить у межах від 40,2–23,5 до 13,2–12,0, з ростом товщини КТ зменшується.

Таблиця 5

Чутливість до деформації плівок Fe

Плівка	$\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}$, %	$S_{\text{пр}}$, Ом/%	$S_{\text{пл}}$, Ом/%	$\left(\frac{S}{R}\right)_{\text{пр}}$	$\left(\frac{S}{R}\right)_{\text{пл}}$	$\frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{пр}}}$	$\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{пр}}}$
Fe(20)/П	0,10	1,6	64,3	0,8	33,4	39,7	1,0
Fe(35)/П	0,10	1,7	31,6	1,2	30,4	18,8	1,0
Fe(50)/П	0,15	1,9	-	4,0	-	-	-
Fe(60)/П	0,30	2,5	6,9	9,3	25,3	2,8	1,1
Fe(100)/П	0,40	4,9	7,0	15,6	21,5	1,4	1,1

У *другому підрозділі* наведені результати досліджень тензоефекту для двошарових плівок Fe/Cr/П. На рис. 9 наведено типовий приклад деформаційних залежностей $\Delta R/R_{\text{п}}$, R , $\gamma_{\text{ем}}$ та $\Delta U/U_{\text{п}}$ і U від ε_{ℓ} для двошарової плівки Fe/Cr/П. Узагальнені експериментально отримані дані наведені у таблицях 6-7. Як висновок дослідження тензорезистивних властивостей у цій плівковій системі можна зазначити, що величина деформації, при якій спостерігається перехід пружна-пластична деформація для двошарових плівок Fe/Cr, знаходиться у межах від 0,15 до 0,40 і зростає зі збільшенням $c(\text{Cr})$, а величина КТ знаходиться у межах від 39,7–28,9 до

14,8–13,9 і залежить від концентрації атомів Fe у загальній товщині плівкової системи і зменшується з ростом $c(\text{Fe})$ при фіксованому значенні товщини шару Cr.

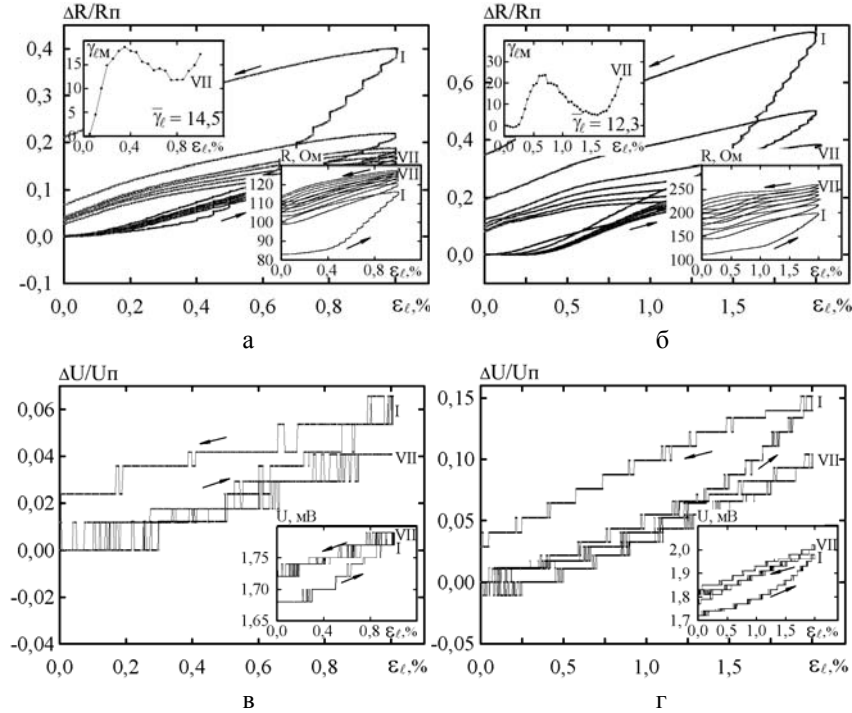


Рис. 9. Залежність R , $\Delta R/R_{\text{п}}$ і $\gamma_{\ell\text{м}}$ (а, б) та U і $\Delta U/U_{\text{п}}$ (в, г) від ε_{ℓ} для плівкової системи Fe(20)/Cr(30)Π

Таблиця 6

Значення $\bar{\gamma}_{\ell}$ для різних деформаційних циклів при $\Delta\varepsilon_{\ell} = 1\%$ та порівняння його із $\bar{\gamma}_{\ell}$ плівок Fe і Cr

Двошарова система	Загальна товщина, нм	Значення $\bar{\gamma}_{\ell}$ для різних деформаційних циклів при $\Delta\varepsilon_{\ell} = 1\%$							$\bar{\gamma}_{\ell}^{\text{Fe}}$	$\bar{\gamma}_{\ell}^{\text{Cr}}$
		I	II	III	IV	V	VI	VII		
		Fe(20)/Cr(30)Π	50	39,7	21,8	18,6	17,7	16,7		
Fe(45)/Cr(30)Π	75	31,2	17,3	16,5	16,0	15,5	15,0	14,7	0,9	0,6
Fe(50)/Cr(30)Π	80	28,9	15,8	15,1	14,8	14,4	14,1	13,9	0,9	0,6

Таблиця 7

Чутливість до деформації плівок Fe/Cr/Π

Плівка	$\varepsilon_{\ell}^{\text{пер}}, \%$	$S_{\text{пр}}, \text{Ом}/\%$	$S_{\text{пл}}, \text{Ом}/\%$	$\left(\frac{S}{R}\right)_{\text{пр}}$	$\left(\frac{S}{R}\right)_{\text{пл}}$	$\frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{пр}}}$	$\frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{пр}}}$
Fe(70)/Cr(20)Π	0,15	2,0	-	7,5	-	-	-
Fe(50)/Cr(30)Π	0,25	5,2	16,2	14,5	44,0	3,1	1,1
Fe(40)/Cr(30)Π	0,30	7,9	22,5	16,0	44,1	2,8	1,1
Fe(20)/Cr(30)Π	0,40	14,6	38,3	17,5	44,5	2,6	1,1

У рамках відомих теоретичних моделей вперше здійснено розрахунок для плівок т.р. (α -Fe, Cr) основних параметрів електроперенесення (λ_0 , λ_g , $\Delta\lambda_g$, $\eta_{\lambda_{g\ell}}$, R та r) в області пружної і пластичної деформації. Основними формулами для розрахунку були:

$$\gamma_{\ell} d \cong (\eta_{\lambda_{g\ell}} + 1) f(\alpha) d - \lambda_0 (1 - p) [(\eta_{\lambda_{g\ell}} + 1) f(\alpha) H(\alpha) - (1 - \mu') U(\alpha)],$$

де $H(\alpha)$ та $U(\alpha)$ – відомі і протабульовані функції; μ' – зведений коефіцієнт Пуассона; $f(\alpha) = \rho_0 / \rho_{\infty}$ – функція зерномежового розсіювання.

Результати розрахунку параметрів $\lambda_0(1-p)$, λ_g , $\Delta\lambda_g$, $\eta_{\lambda_{g\ell}}$, R та r у залежності від концентрації атомів Cr для областей пружної та пластичної деформації наведено у таблиці 8.

Таблиця 8

Розрахункова залежність параметрів $\lambda_0(1-p)$, λ_g , $\Delta\lambda_g$, $\eta_{\lambda_{g\ell}}$, R і r від $c(\text{Cr})$ в області пружної і пластичної деформації для плівкової системи Fe/Cr

$c(\text{Cr})$	$\lambda_0(1-p)$	$\lambda_g, \text{нм}$	$\Delta\lambda_g, \text{нм}$	$\eta_{\lambda_{g\ell}}$	R	r
Пружна деформація						
0,0	97,1	38,1	-5,9	77,0	0,47	0,40
0,1	96,6	39,0	-5,8	74,6	0,45	0,43
0,2	95,7	39,9	-5,8	72,3	0,43	0,46
0,3	95,4	41,0	-5,8	70,2	0,41	0,48
0,4	94,6	41,8	-5,7	68,2	0,39	0,51
0,5	94,3	42,8	-5,7	66,3	0,38	0,54
Пластична деформація						
0,0	89,7	35,1	-16,1	228,7	0,49	0,37
0,1	89,1	36,0	-16,0	221,6	0,47	0,40
0,2	88,3	36,8	-15,8	215,0	0,45	0,43
0,3	88,1	37,8	-15,8	208,8	0,43	0,45
0,4	87,3	38,6	-15,6	202,9	0,41	0,48
0,5	87,0	39,5	-15,6	197,3	0,39	0,51

Із отриманих даних витікає, що при переході від пружної до пластичної деформації параметри $\lambda_0(1-p)$, λ_g та γ зменшуються, у той час як параметри $\Delta\lambda_g$, η_{λ_g} і R збільшуються, що пояснюється впливом зміни чутливості до деформації і збільшенням ролі зерномежового і об'ємного розсіювання електронів, та зменшенням прозорості меж зерен.

Наведено також дані щодо можливості застосування дво- і багат шарових плівкових систем Fe/Cr та Cu/Cr як чутливих елементів тензодатчиків в області високих температур до 1800 К зі значним ресурсом роботи та величиною КТ до 40 одиниць.

Здійснено узагальнення експериментальних результатів для плівкових систем Cu/Cr і α -Fe/Cr стосовно особливостей деформаційних залежностей та основних параметрів тензочутливості. Зокрема відзначено, що деформація плівкових зразків на атмосфері призводила до втрати чутливим елементом своїх тензорезистивних властивостей, а швидкість деформації зразка для усіх одно- та двошарових плівок виявила мінімальний вплив на значення величини КТ, і його відмінність для різних швидкостей деформації у межах 5 %, скоріше за все, може бути пояснена монотонною зміною величини КТ (зростанням або спаданням) з ростом числа деформаційних циклів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вивчені фізичні процеси і особливості ефекту тензочутливості у двошарових плівкових системах Cu/Cr і Fe/Cr як чутливих елементів тензодатчиків, фазовий склад яких відповідає ОЦК Cr + ГЦК Cu (біпластина) та ОЦК твердий розчин (α -Fe, Cr), в області пружної і пластичної деформації та отримані такі наукові і практичні результати:

1. Розроблена методика отримання та дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів за допомогою автоматизованої системи проведення експерименту, що може знайти подальше використання у варіанті віддаленої фізичної лабораторії.

2. Дослідження ефекту тензочутливості дозволили встановити таке:

- при переході від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації спостерігається зміна характеру залежності відносної зміни опору плівки від деформації; це проявляється у нелінійній залежності $\Delta R/R_0$ від ϵ_e , появі гістерезису та сходинок, що пояснюється зміною умов розсіювання електронів в об'ємі і на межах зерен, характеру деформації та зменшенням прозорості меж зерен;

- на значення величини деформації, при якій відбувається перехід від пружної до пластичної деформації у плівкових системах Cu/Cr та Fe/Cr, у значній мірі впливає концентрація атомів Cr, тобто загальна товщина плівкової системи;

- у плівках Cr, Fe та Fe/Cr величина КТ при I-му деформаційному циклі завжди більша від КТ при наступних циклах (але ця особливість з точністю до навпаки проявляється в одношарових плівках Cu та двошарових плівкових системах Cu/Cr), що можна пояснити дуже відмінною величиною чутливості до деформації плівок Cr, Fe і Cu; різним типом і концентрацією дефектів у них;

- значення середньої величини КТ для одношарових плівок Cu знаходяться у межах від 1,5–1,3 для I-го до 2,6–1,4 для VII-го деформаційного циклу, а для плівок Fe – від 40,2–23,5 до 13,2–12,0 і зменшується з ростом товщини плівки, у той час як для плівок Cr середній КТ знаходиться у межах від 42,3–47,5 до 8,2–13,3 і з ростом товщини КТ зростає. Для двошарових плівок Cu/Cr КТ у більшості випадків знаходиться у межах від 10,2–21,5 до 12,4–28,5, величина КТ залежить від концентрації атомів Cr у загальній товщині плівкової системи і збільшується з ростом $c(Cr)$ при фіксованому значенні товщини шару Cu, а для двошарових плівок Fe/Cr – від 39,7–28,9 до 14,5–13,9 і залежить від концентрації атомів Fe у загальній товщині плівкової системи, зменшуючись з ростом концентрації атомів Fe при фіксованому значенні товщини шару Cr;

- величина деформації, при якій спостерігається перехід пружно-пластична деформація, у одношарових плівках Cr знаходиться у межах від 0,2 до 0,1 % і зменшується з ростом товщини, а для одношарових плівках Fe – від 0,1 до 0,4 % і зростає з ростом товщини плівки; для двошарових плівок Cu/Cr межа переходу знаходиться у межах від 1,3 до 0,4 % і зменшується зі збільшенням $c(Cr)$, а для двошарових плівок Fe/Cr – від 0,15 до 0,40 і зростає зі збільшенням $c(Cr)$. Для одношарових плівок Cu знаходиться у діапазоні деформацій, що перевищує 2 %;

- поступове збільшення деформації із кроком 0,25 % дає величину КТ, близьку до величини КТ для плівки, одразу деформованої до 1 % або до 2 %, процес деформації якої вже стабілізувався, але разом з тим спостерігається пришвидшення спрацювання ресурсу її роботи, що говорить про однаковий характер релаксаційних процесів при двох способах деформації;

- значне зростання величини γ_e (як і $\bar{\gamma}_e$) при переході від пружної до пластичної деформації обумовлене різним ступенем чутливості при різних типах деформації; відношення $S_{np}/S_{пл}$ складає від 2 до 35 у залежності від загальної товщини плівки та концентрації у ній атомів Cr;

- швидкість деформації у межах від 140 до 20 c^{-1} для усіх плівок виявила мінімальний вплив на значення величини КТ, а його відмінність для різних швидкостей деформації у межах 5% , швидше за все, може бути пояснена монотонною зміною величини КТ (зростанням або спаданням) з ростом числа деформаційних циклів.

3. Робота чутливого елемента тензодатчика на атмосфері без додаткового захисту призводить до пришвидшення втрати його тензорезистивних властивостей;

- контроль структурної цілісності плівкових зразків при деформації за допомогою світлового променя в усіх випадках давав або горизонтальну (для плівок Cu) або лінійну залежність U і $\Delta U/U_n$ від ε_i .

4. На основі співвідношень для феноменологічної моделі КТ проведено порівняння експериментальних та розрахункових даних і встановлено, що експериментальні результати, що відповідають області пружної деформації, задовільно узгоджуються з феноменологічними теоретичними моделями для плівкової системи типу біпластина (Cu/Cr) та плівкового сплаву (тр. (α -Fe, Cr)), що пояснюється адекватністю теоретичних моделей і структурно-фазового складу плівок Cu/Cr і Fe/Cr.

5. Вивчено вплив деформації на величину таких параметрів електроперенесення як $\lambda_0(1-p)$, λ_g , $\Delta\lambda_g$, $\eta_{\lambda_{gl}}$, R і γ , і зроблено висновок, що при переході від пружної до пластичної деформації параметри $\lambda_0(1-p)$, λ_g та γ зменшуються, у той час як параметри $\Delta\lambda_g$, $\eta_{\lambda_{gl}}$ і R збільшуються, що можна пояснити суттєвою зміною чутливості до деформації і збільшенням ролі зерномежового і об'ємного розсіювання електронів, а також зменшенням прозорості меж зерен.

СПИСОК ОПУБЛКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Protsenko S. I. Electrophysical properties of Cu/Cr and Fe/Cr film systems within elastic and plastic deformation range / S. I. Protsenko, D. V. Velykodnyi, V. A. Kheraj, M. S. Desai, C. J. Panchal, I. Yu. Protsenko // J. Mater. Sci. – 2009. – V. 44, № 18. – P. 4905-4910.

2. Odnodvoret L. Electrophysical properties of Ni/V and Cr/Fe multilayer films / L. Odnodvoret, S. Protsenko, O. Synashenko, D. Velykodnyi, I. Protsenko // Cryst. Res. Technol. – 2009. – V. 44, № 1, 1-6. – P. 74-81.

3. Великодний Д. В. Тензоэффект в двухслойных пленках Cu/Cr и Fe/Cr / Д. В. Великодний, С. И. Проценко, И. Е. Проценко // ФИП. – 2008. – Т. 6, № 1-2. – С. 37-42.

4. Великодний Д. В. Тензорезистивні властивості двошарових плівкових систем Cu/Cr і Fe/Cr / Д. В. Великодний, С. І. Проценко,

І. Ю. Проценко // Металлофиз. новейшие технол. – 2008. – Т. 30, № 12. – С. 1659-1666.

5. Великодний Д. В. Тензочутливість металевих плівок: теоретичні моделі, експериментальні результати, застосування (огляд) / Д. В. Великодний, Т. М. Гричановська, Л. В. Одневорець, І. Ю. Проценко, С. І. Проценко // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2007. – № 1. – С. 5-51.

6. Проценко С. І. Структурно-фазовий стан, стабільність інтерфейсів та електрофізичні властивості двошарових плівкових систем / С. І. Проценко, І. В. Чешко, Д. В. Великодний, О. В. Синашенко, Л. В. Одневорець, І. М. Пазуха, І. Ю. Проценко // Успехи физ. метал. – 2007. – Т. 8, № 4. – С. 247-278.

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

8. Великодний Д. В. Тензорезистивные свойства двухслойных пленок Cu/Cr в области пластической деформации / Д. В. Великодний, А. И. Кучма, С. И. Проценко // Тонкие пленки в оптике, нанопотонике и наноэлектронике : XIX-й международного симпозиум : Мат. симпоз. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007. – С. 124-126.

9. Великодний Д. В. Автоматизация процесса исследования тензорезистивных свойств тонкопленочных материалов / Д. В. Великодний, С. И. Проценко // Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития: 2-я Международная научная конференция, 2-5 окт. 2007 г. : мат. конф. – Харьков-Туапсе: ХНУРЕ, 2007. – С. 164-165.

10. Великодний Д. Тензоэффект в плівках Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації / Д. Великодний, Н. Шумакова // ЕВРИКА-2008: Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики, 19-21 тр. 2008 р. : тези доп. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2008. – С. С4.

11. Білинський Є. А. Тензорезистивні властивості двошарових плівок Cu/Cr і Fe/Cr / Є. А. Білинський, Д. В. Великодний, Н. І. Шумакова // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.: 12-й Міжнародний молодіжний форум, 1-3 кв. 2008 р. : зб. мат. форуму Ч.1. – Харків: ХНУРЕ, 2008. – С. 271.

12. Великодний Д. В. Тензорезистивные свойства пленочных систем Cu/Cr и Fe/Cr в области упругой и пластической деформации / Д. В. Великодний, Н. И. Шумакова, В. В. Спильный, И. Е. Проценко // Современные информационные и электронные технологии: 9-я

Международная научно-практическая конференция, 19-23 мая 2008 г. : науч. труды. – Одесса: ОНПУ, 2008. – С. 145.

13. Великодний Д. В. Тензорезистивні властивості двошарових плівок Cu/Cr в області пружної і пластичної деформації / Д. В. Великодний, І. Ю. Проценко // НАНСИС-2007: нанорозмірні системи будова-властивості-технології, 21-23 лист. 2007 р. : тези конф. – Київ: НАН України, 2007. – С. 389.

14. Великодний Д. В. Тензорезистивные свойства многослойных пленок на основе хрома и железа или никеля и ванадия / Д. В. Великодний, Т. М. Гричановская, Л. В. Однодворец, Ч. Панчал, И. Е. Проценко // ФММН-2008: Международная научная конференция Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур, 8-10 окт. 2008 г. : сб. науч. трудов. – Харьков: НФТЦ МОН и НАН Украины, 2008. – С. 90–92.

15. Великодний Д. В. Особливості тензорезистивних властивостей нанорозмірних плівок Cu/Cr при великій кількості деформаційних циклів / Д. В. Великодний, М. Г. Демиденко, С. І. Проценко // Фізичні явища в твердих тілах: матеріали 8-ї Міжнародної конференції, 11-13 гр. 2007 р. : мат. конф. – Харків: ХНУ ім. В.Н.Каразіна, 2007. – С. 72.

16. Великодний Д. В. Автоматизована система вакуумного напилення / Д. В. Великодний // Науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету Сумського державного університету, 21-24 кв. 2008 р. : тези доп. – Суми: СумДУ, 2008. – С. 130-131.

17. Великодний Д. В. Застосування програмно-апаратних засобів у фізичному експерименті / Д. В. Великодний, С. І. Проценко // Науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету Сумського державного університету, 18-29 кв. 2005 р. : тези доп. – Суми: СумДУ, 2005. – С. 133.

АНОТАЦІЯ

Великодний Д. В. Тензорезистивні властивості плівкових систем Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2009.

Дисертаційна робота присвячена експериментальному та теоретичному дослідженню фізичних процесів у двошарових плівкових системах Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації, що можуть бути використані як чутливі елементи високотемпературних тензодатчиків.

За результатами досліджень, що проводилися з використанням автоматизованої системи управління експериментом, були встановлені особливості деформаційних залежностей опору, відносної зміни опору, миттєвого та середнього коефіцієнтів тензочутливості від величини деформації та номера деформаційного циклу. Вивчені особливості розмірного ефекту у КТ двошарових плівок Cu/Cr і Fe/Cr в області пружної і пластичної деформації. Здійснено експериментальну перевірку феноменологічних моделей для КТ двошарових плівкових систем, фазовий склад яких відповідає ОЦК твердий розчин (α -Fe,Cr) та ОЦК Cr + ГЦК Cu (біпластина). Розраховані параметри електроперенесення ($\lambda_0(1-p)$, λ_g , $\Delta\lambda_g$, $\eta_{\lambda_g^t}$, R і r) та їх зміна при деформації для плівок Cu/Cr і Fe/Cr.

Ключові слова: коефіцієнт тензочутливості, двошарові плівки Cu/Cr і Fe/Cr, пружна та пластична деформація, параметри електроперенесення.

АННОТАЦИЯ

Великодний Д. В. Тензорезистивные свойства пленочных систем Cu/Cr и Fe/Cr в области упругой и пластической деформации. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2009.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию физических процессов в двухслойных пленочных системах Cu/Cr и Fe/Cr в области упругой и пластической деформации, которые могут быть использованы в качестве чувствительных элементов высокотемпературных тензодатчиков.

Экспериментальные исследования проводились с использованием разработанной автоматизированной системы, которая позволила получать пленочные образцы заданной толщины и исследовать их тензорезистивные свойства в диапазоне деформации до 2 % с параллельным контролем структурного состояния пленки с помощью оптической системы. По результатам исследований были установлены особенности деформационных зависимостей сопротивления, относительного изменения сопротивления, мгновенного и среднего коэффициентов тензочувствительности от величины деформации и номера деформационного цикла. Получены размерные зависимости КТ и величины деформации, при которых наблюдается переход упруго-пластическая деформация, от общей толщины пленочной системы и от величины концентрации в ней атомов одного из компонентов. Установлены значения чувствительности к деформации чувствительного элемента тензодатчика в зависимости от типа деформации. Исследовано

влияние скорости деформации и атмосферы на значение величины КТ. Осуществлена экспериментальная проверка феноменологических моделей для КТ двух различных типов систем: первая система Cu/Cr отвечает условию двухслойности, или бипластине, а вторая Fe/Cr – условию гомогенности, поскольку в ней уже в процессе конденсации образовывается по всему объему образца твердый раствор (α -Fe,Cr). Рассчитаны такие параметры электропереноса, как средняя длина свободного пробега (СДСП) электронов, её деформационный коэффициент и изменение величины СДСП при деформации, коэффициенты прохождения и рассеивания электронов на границах зерен.

Ключевые слова: коэффициент тензочувствительности, двухслойные пленки Cu/Cr і Fe/Cr, упругая и пластическая деформация, параметры электропереноса.

SUMMARY

Velykodnyi D. V. Electrophysical properties of Cu/Cr and Fe/Cr film systems within the range of elastic and plastic deformation. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of philosophy degree (Ph. D.) in physics and mathematics on specialty 01.04.01 – physics of devices, elements and systems – Sumy State University, Sumy, 2009.

The thesis research is devoted on the experimental investigation and theoretical study of physical processes in the range of elastic and plastic deformation of Cu/Cr and Fe/Cr two-layer film systems, which can be used as sensitive elements of high-temperature strain sensors.

According to the results of the investigations, which were made using the experiment control automated system, peculiarities of the deformation dependences of the resistance, relative change of resistance, instantaneous and mean values of gauge factor on the deformation value and on the number of deformation cycle were revealed. Peculiarities of size effect in GF of Cu/Cr and Fe/Cr two-layer films within the range of elastic and plastic deformation were studied. Experimental check of phenomenological models for GF of two-layer film systems, phase composition of which corresponds to BCC solid solution (α -Fe,Cr) and BCC Cr + FCC (binary plate) was made. Electron transfer parameters ($\lambda_0(1-p)$, λ_g , $\Delta\lambda_g$, $\eta_{\lambda_g \ell}$, R and r) and their change under deformation for Cu/Cr and Fe/Cr films were calculated.

Key words: gauge factor, Cu/Cr and Fe/Cr two-layer films, elastic and plastic deformation, electron transfer parameters.

Підп. до друку 29.10.2009.

Обл.- вид. арк. 0,9.

Ум. друк. арк. 1,2.

Наклад 100 пр.

Замовлення № 1352.

Формат 60x84/16.

Папір ксероксний.

Гарнітура Times New Roman Cyr.

Друк офсетний.

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

Свідоцтво ДК № 3062 від 17.12.2007 р.

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