

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Говорун Тетяна Павлівна**

**УДК 539.216.2**

**РОЗМІРНИЙ ЕФЕКТ В ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЯХ  
ПЛІВОК Cu, Ni ТА Co З ТОНКИМ МЕТАЛЕВИМ АБО  
ДИЕЛЕКТРИЧНИМ ПОКРИТТЯМ**

**01.04.07 – фізика твердого тіла**

**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 – доктор фізико-математичних наук, професор  
**Чорноус Анатолій Миколайович,**  
проректор з наукової роботи,  
професор кафедри прикладної фізики Сумського державного університету.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Погребняк Олександр Дмитрович,**  
професор кафедри електроніки і комп'ютерної техніки Сумського державного університету;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Татаренко Валентин Андрійович,**  
провідний науковий співробітник відділу теорії твердого тіла Інституту металофізики ім.  
Г.В. Курдюмова НАН України.

Захист відбудеться « 03 » липня 2009 р. о 14<sup>00</sup> 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 « 2 » червня 2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

А.С. Опанасюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одно- та багатошарові плівки металів набули досить широкого використання у сучасній мікроелектроніці, спінтроніці, мікросенсорній техніці тощо. На електрофізичні властивості елементів із плівкових матеріалів, таких як багатошарові системи, впливає ряд факторів. Зокрема, вони визначаються ступенем взаємної розчинності атомів сусідніх шарів, і, навіть у випадку незначної взаємної розчинності, вплив зерномежової дифузії на електрофізичні властивості при відносно низьких температурах експлуатації приладів може бути досить суттєвим. Дифузія інохідних атомів призводить до зміни умов розсіювання електронів на межах зерен, а нанесення тонкого покриття на поверхню дозволяє змінювати умови поверхневого розсіювання носіїв заряду.

У літературі не існує однозначної думки про характер і ступінь впливу процесів дифузії на величину коефіцієнтів розсіювання і проходження меж зерен електронами провідності. Це питання актуальне з точки зору аналізу результатів апробації теоретичних моделей розмірного ефекту електропровідності і температурного коефіцієнта опору (ТКО) металевих плівкових систем. Відповідність розрахункових і експериментальних значень відіграє велику роль при прогнозуванні електрофізичних властивостей елементів на основі багатошарових плівкових матеріалів. Коректно встановити вплив інохідних атомів на умови розсіювання носіїв заряду на межах зерен у плівках металів (компонентах плівкових систем) можливо, провівши дослідження електрофізичних властивостей плівок із тонким покриттям з ефективною товщиною в декілька моношарів. Також потрібно відмітити, що такі матеріали, як плівки з покриттям, можуть конкурувати з одношаровими плівками, оскільки шляхом нанесення покриття (або на вільну зовнішню поверхню, або на підкладку перед конденсацією плівки) можна модифікувати електричні властивості і тим самим отримати елементи мікро- і нанoeлектроніки з необхідними характеристиками. Тому дослідження розмірних ефектів у електрофізичних властивостях плівок з тонким покриттям становить самостійну актуальну задачу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася у відповідності до держбюджетних тем № 0103U000773 «Вплив статичної деформації і температури на електрофізичні властивості багатошарових плівкових систем» (2003-2005 рр.), № 0106U001942 «Формування кристалічної структури і електрофізичних властивостей плівкових матеріалів на основі багатошарових плівкових систем» (2006-2008 рр.) та спільного проекту науково-технічного співробітництва «Дифузійні процеси і транспортні властивості мультишарів і тонких плівок» між Сумським державним університетом та Інститутом ядерної фізики ПАН (м. Краків, Польща) (договір №М/18-2004 від 29 березня 2004 р.) (2004-2005 рр.). Здобувач брала участь у проведенні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень та у підготовці проміжних і заключних звітів.

**Мета і задачі досліджень.** Мета дисертації полягає у встановленні впливу дифузійних процесів на електрофізичні властивості (питомий опір, температурний коефіцієнт опору) та параметри електроперенесення (параметр дзеркальності зовнішніх поверхонь, коефіцієнти проходження і розсіювання меж зерен) у плівках Cu, Co (Ni) з тонким покриттям із Ni (Cu) або SiO<sub>2</sub>.

Для досягнення мети роботи були вирішені наступні задачі:

- розроблена методика і сконструйовано необхідне експериментальне обладнання для дослідження електрофізичних властивостей плівок металів з покриттям на підкладках з полікору;
- досліджені структурні характеристики та елементний склад зразків методами просвічуючої електронної мікроскопії, електроннографії, атомно-силової мікроскопії та вторинної іонної мас-спектрометрії;
- вивчені електрофізичні властивості плівок без або з покриттям як при термоциклюванні в інтервалі температур 300-650 К, так і в процесі відпалювання при постійній температурі;

- проведено розрахунок параметрів електроперенесення шляхом обробки розмірних залежностей ТКО з використанням лінеаризованої моделі та моделі ізотропного розсіювання Тельє, Тоссе і Пішар;
- проведено апробацію асимптотичного співвідношення запропонованої теоретичної моделі для питомої провідності крупнозернистих плівок металів з покриттям.

**Об'єкт дослідження** – розмірні ефекти в електрофізичних властивостях плівок металів з тонким покриттям та дифузійні процеси в системі покриття/плівка.

**Предмет дослідження** – температурні і розмірні залежності питомого опору і температурного коефіцієнту опору та вплив на параметри електроперенесення в плівках p-Ni/Cu(Co)/П, p-SiO<sub>2</sub>/Cu(Co)/П та p-Cu(SiO<sub>2</sub>)/Ni/П умовах дифузії атомів (п – покриття, П - підкладка).

**Методи дослідження** – конденсація металів і SiO<sub>2</sub> у вакуумі термічним і електронно-променевим способами; метод резистометрії для вимірювання електричного опору в умовах термоцикування та відпалювання при постійній температурі; просвічуюча електронна мікроскопія (ПЕМ) і атомно-силова мікроскопія (АСМ); вторинна іонна мас-спектрометрія (ВІМС); метод теоретичного аналізу.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Проведені у роботі комплексне експериментальне і теоретичне дослідження розмірних ефектів в електрофізичних властивостях плівок Cu, Ni і Co із тонким металевим або діелектричним покриттям з ефективною товщиною в декілька моношарів дозволили отримати такі нові результати:

1. Уперше встановлено, що після нанесення тонкого покриття із Ni на плівки Cu і Co та покриття із Cu на плівки Ni з подальшою термообробкою величина їх ТКО при температурах визначення від 100 до 650 К зменшується на 5-20% залежно від товщини і складу базисної плівки та температури, що обумовлено зміною умов розсіювання на зовнішніх і внутрішніх межах базисних плівок.
2. Уперше встановлено, що наявність на зовнішній поверхні плівок Cu, Ni і Co покриття із SiO<sub>2</sub> впливає на умови розсіювання на них носіїв заряду, зокрема:
  - дзеркальність поверхні у плівках Cu зростає від  $0,29 \pm 0,02$  до  $0,41 \pm 0,02$  ( $T=150$  К) та від  $0,25 \pm 0,02$  до  $0,39 \pm 0,02$  ( $T=360$  К), що є головною причиною збільшення ТКО зразків;
  - для плівок Ni і Co спостерігається зменшення коефіцієнта дзеркальності при  $T=300$  К від  $0,19 \pm 0,02$  до  $0,11 \pm 0,02$  та від  $0,11 \pm 0,02$  до  $0,02 \pm 0,02$  відповідно.
3. Уперше шляхом обробки експериментальних розмірних залежностей ТКО і питомого опору для плівок Cu, Co (Ni) з тонким покриттям із Ni (Cu) або SiO<sub>2</sub>, показано, що величина коефіцієнта розсіювання межі зерна може як збільшуватися, так і зменшуватися, зокрема:
  - у базисних плівках Cu і Ni за рахунок зерномежової дифузії атомів тонкого покриття із Ni і Cu відповідно зростає дефектність меж зерен, що спричиняє збільшення їх розсіювальної здатності;
  - у плівках Co за рахунок дифузії атомів Ni відбувається заліковування дефектів на межах зерен, що викликає збільшення їх прозорості для електронів;
  - у плівках Cu з покриттям із SiO<sub>2</sub> внаслідок захищеності поверхні шаром оксиду знижується проникність у межу зерна атомів газів залишкової атмосфери, що приводить до покращання прозорості меж зерен для електронів;
  - у плівках Ni з покриттям із SiO<sub>2</sub> за рахунок дифузійної взаємодії вздовж меж зерен формується незначна кількість низькотемпературних силіцидів, що збільшує зерномежовий коефіцієнт розсіювання електронів.
4. При застосуванні резистометричного методу для вивчення низькотемпературної зерномежової дифузії у плівках Cu, Co (Ni) з тонким покриттям із Ni (Cu), показано, що значення ефективного коефіцієнта зерномежової дифузії становить величину порядку  $10^{-19}$  м<sup>2</sup>/с, що співрозмірно з величинами, розрахованими на основі результатів мас-спектрометричних досліджень, та свідчить про домінування зерномежової дифузії у плівках над об'ємною.

5. Уперше здійснено апробацію асимптотичного співвідношення для питомої провідності (опору) полікристалічних плівок металів з тонким металевим покриттям, яке було отримане на основі теорії Маядаса-Шатцкеса. Показано, що експериментальні значення питомого опору відповідають розрахунковим з точністю до 8%.

**Практичне значення отриманих результатів.** Отримані у роботі результати мають як фундаментальне, так і прикладне значення. Фундаментальне значення результатів полягає у розширенні уявлень про розмірні ефекти в електрофізичних властивостях плівок металів, на поверхню яких нанесене тонке металеве або діелектричне покриття з ефективною товщиною в декілька моношарів. У даному контексті важливе більш глибоке розуміння питання про зміну умов розсіювання на межах зерен за рахунок дифузії інохідних атомів. Встановлені закономірності можуть бути використані для пояснень і прогнозування електрофізичних властивостей багатшарових плівкових систем, які знайшли практичне використання у сучасному мікро-приладобудуванні. У роботі показано, що нанесення певної контрольованої кількості інохідних атомів покриття може дати можливість виготовляти елементи із заздалегідь визначеними характеристиками та модифікувати матеріали мікро- і наноелектроніки, створюючи зразки плівкових матеріалів з тими чи іншими необхідними електрофізичними властивостями.

**Особистий внесок здобувача** полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень та обробці їх результатів. Автор особисто отримувала зразки плівок Cu, Ni та Co з тонким покриттям із металів та SiO<sub>2</sub>, проводила експерименти, пов'язані із дослідженням температурної залежності опору, дифузійних процесів, електронною мікроскопією і електронною графією. Постановку задач досліджень, розробку методик проведення експериментів та обговорення і узагальнення результатів здійснено спільно із науковим керівником д-ром фіз.-мат. наук, проф. Черноусом А.М. Дослідження плівкових зразків методом АСМ було здійснено за участі доцента Проценка С.І. Спільно із доцентами Салтиковою А.І. та Шпетним І.О. було проведено дослідження дифузійних процесів методом вторинної іонної мас-спектрометрії. В обговоренні результатів цієї роботи брав участь проф. Проценко І.Ю. Модель для провідності полікристалічних плівок з покриттям, асимптотичне співвідношення якої було апробовано у роботі, розроблено спільно із д-ром фіз.-мат. наук Дехтяруком Л.В. Особисто автором підготовлено статті [3, 6, 7], тези доповідей [8-11], у статтях [1, 2, 4, 5] написано окремі розділи. Основна частина результатів доповідалася на наукових конференціях і семінарах.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на таких наукових конференціях: Всеросійському семінарі „Нелінійні процеси і проблеми самоорганізації у сучасному матеріалознавстві” (Воронеж, 2004 р.), X, XI та XII Міжнародних конференціях „Фізика і технологія тонких плівок” (Івано-Франківськ, 2005, 2007, 2009 рр.), Харківських нанотехнологічних Асамблеях (Харків, 2007, 2008 рр.), науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів та студентів фізико-технічного факультету СумДУ (Суми, 2002-2008 рр.).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані у 18 публікаціях, серед яких 5 статей у фахових наукових журналах, 2 статті у нефархових виданнях та 11 тез доповідей. Назви основних 11 робіт наведені у списку опублікованих праць.

**Структура і зміст роботи.** Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел із 189 найменувань. Дисертацію викладено на 173 сторінках друкованого тексту, вона містить 68 рисунків і 20 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, зв'язок із науковими темами і програмами, висвітлено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів і внесок здобувача, наведено методи досліджень, показано відомості про апробацію роботи, основні публікації автора та структуру і обсяг дисертації.

У першому розділі «Розмірні ефекти у електрофізичних властивостях тонких металевих плівок (літературний огляд)» проведено аналітичний огляд відомих результатів, що присвячені дослідженню поверхневого і зерномежового розсіювання електронів у плівкових матеріалах.

Поверхнєве розсіювання носіїв струму помітно впливає на електрофізичні властивості плівок, якщо їх товщина близька або менша середньої довжини вільного пробігу (СДВП) електронів. Розсіювання електронів на поверхні, з чим власне пов'язаний зовнішній розмірний ефект, у теоріях електрофізичних властивостей тонких плівок описується за допомогою параметра дзеркальності ( $p$ ), який може змінюватись від 0 до 1. У реальних полікристалічних плівкових зразках, де поверхня складається з набору випадковим чином орієнтованих площин кристалів, важко очікувати дзеркального відбивання носіїв електричного струму і тому значення  $p$  завжди менше одиниці.

У полікристалічних плівкових зразках, поряд із поверхневим розсіюванням, значний внесок у величину електрофізичних властивостей вкладає розсіювання на межах зерен, що обумовлює внутрішній розмірний ефект.

Для обробки експериментальних результатів, зокрема з метою визначення параметрів електроперенесення, широке застосування отримали лінеаризована модель та модель ізотропного розсіювання носіїв електричного заряду Тельє, Тоссе і Пішар (ТПП).

Робоче співвідношення лінеаризованої моделі ТПП має вигляд:

$$\beta d \cong \beta_{\infty} d - \lambda \beta_{\infty} (1-p) H(\alpha), \quad (1)$$

де  $\beta$  – ТКО плівки;  $\beta_{\infty} = \lim_{d \rightarrow \infty} \beta$ ;  $d$  – товщина плівки;  $\lambda$  – СДВП;  $H(\alpha)$  – відома табульована функція.

Для моделі ізотропного розсіювання ТПП співвідношення наступні:

$$\beta^{-1} d \cong \beta_{\infty}^{-1} d + \frac{3}{8} \frac{\lambda}{\beta_0} \ln\left(\frac{1}{p}\right), \beta_{\infty} \beta_0^{-1} \cong \left(1 + 1,45 \frac{\lambda}{L} \ln\left(\frac{1}{r}\right)\right)^{-1}, \frac{R}{1-R} \cong 0,97 \ln\left(\frac{1}{r}\right), \quad (2)$$

де  $\beta_0$  – ТКО масивного зразка;  $R$  і  $r$  – коефіцієнти розсіювання і проходження межі зерна (МЗ) відповідно;  $L$  – середній розмір зерна.

Для більшості полікристалічних плівкових зразків, згідно з літературними даними, величина СДВП становить декілька десятків нанометрів, значення параметра дзеркальності становить 0-0,2; коефіцієнта проходження МЗ – 0,7-0,9; коефіцієнта розсіювання на МЗ – 0,1-0,5. На величину параметрів електроперенесення  $p$ ,  $R$  і  $r$  впливають температура, деформація плівки, ступінь дисперсності кристалітів та наявність на зовнішній поверхні або на межі зерна інорідних або домішкових атомів.

Наприкінці першого розділу розглядається питання про використання термодинамічного підходу для описання сегрегації чужорідних атомів на межах зерен. У результаті проведеного аналізу показано, що атоми іншого сорту можуть як створювати на МЗ додаткові дефекти, так і їх заліковувати. Це свідчить про можливість очікування зміни умов розсіювання носіїв заряду на МЗ базисних плівок у результаті сегрегації на них атомів іншого сорту. Величина і знак цієї зміни залежать від матеріалів базисної плівки та дифузійного шару на її поверхні, з якого на МЗ проникають інорідні атоми. З'ясувати, як конкретно змінюються коефіцієнти розсіювання і проходження електронами меж зерен в умовах дифузійної взаємодії атомів, можна, провівши дослідження розмірного ефекту в електрофізичних властивостях плівкових матеріалів з тонким покриттям.

У другому розділі «Методика проведення експериментальних досліджень» описані методи отримання плівкових зразків Cu, Co (Ni) з тонким (до 5 нм) покриттям із Ni (Cu) або SiO<sub>2</sub> покриттям, дослідження електрофізичних властивостей, вивчення структурних характеристик і елементного складу, дифузійних процесів та топології поверхні. Вибір металів Cu, Ni і Co як матеріалів базисних плівок обумовлений рядом факторів.

По-перше, електрофізичні властивості одношарових плівок цих металів досить повно досліджені. Тому ми можемо мати змогу порівнювати наші дані про величину питомого опору, ТКО та параметрів електроперенесення з відомими літературними джерелами, що зробить подальші наші висновки більш коректними. По-друге, плівки зазначених металів відносно малочутливі до взаємодії із газами залишкової атмосфери: дотримуючись певних умов конденсації, можна сформувати фазовий стан, який відповідає масивним зразкам з досить близькими параметрами кристалічної решітки. По-третє, плівки Cu, Ni і Co, отримані при температурах підкладки вище за кімнатну, мають різну дисперсність кристалітів. Вибір таких металевих пар, як Cu і Ni та Ni і Co обумовлений тим, що вони мають високу, але обмежену взаємну розчинність один в одному при відносно низьких температурах  $< 0,3 T_{пл}$  ( $T_{пл}$  – температура плавлення), і частина інозидних атомів залишиться на межах зерен, а частина продифундує в об'єм зерна. У результаті зерномежової дифузії та подальшої дифузії атомів покриття із МЗ в їх об'єм (з утворенням т.р.) відбувається певна трансформація меж зерен базисних плівок. Тому потрібно очікувати зміну умов розсіювання носіїв заряду на МЗ. Покриття із SiO<sub>2</sub> повинне залишитися на поверхні, тому у цьому випадку потрібно очікувати зміну лише поверхневого розсіювання.

Коректне дослідження впливу покриття різного типу на електричний опір базисних плівок потребує певних високих вимог до якості проведення експерименту, тому було розроблено відповідну методику та виготовлено обладнання для проведення експериментів. Плівки і покриття Cu, Ni і SiO<sub>2</sub> отримувалися термічним методом, а плівки Co – електронно-променевим. Товщина базисних плівок визначалась інтерферометричним методом, а ефективна товщина покриттів визначалась ваговим та методом кварцевого резонатора. Температура підкладки при конденсації є виключно важливим параметром, що впливає на структурні характеристики плівкових зразків і, як наслідок, на їх властивості. У зв'язку з цим у рамках цієї роботи конденсація базисних плівок Cu, Ni та Co проводилася при температурах підкладки, оптимальних з точки зору електрофізичних властивостей: 343 (Cu), 465 (Ni) та 385 К (Co) у вакуумі  $\sim 10^{-4}$  Па.

Методика проведення експериментів була наступною. На першому етапі отримувалися три базисні плівки відповідного металу при температурі підкладки із полікору ВК-100, наведеній вище, і охолоджувалися до кімнатної температури. На другому – проводилося відпалювання плівок за схемою «нагрівання↔охолодження» протягом двох циклів в інтервалі температур 300 – 550 (Cu), 300-630 (Ni) та 300 – 650 К (Co) для термостабілізації електрофізичних властивостей. На третьому і четвертому етапах наносилися термічним способом тонкі покриття із металу або SiO<sub>2</sub> з подальшою стабілізацією системи протягом 30 хвилин і проводилося відпалювання за схемою «нагрівання↔охолодження» в температурних інтервалах зазначених вище. Між етапами не відбувалося порушень вакууму. Потім зразки піддавались охолодженню у вакуумі за допомогою рідкого азоту до температури 100-110 К.

Вивчення фазового і елементного складу та структури плівкових зразків проводилось електроннографічним й електронно-мікроскопічним методом (прилади ПЕМ-125К і ЕММА-4), методом атомно-силової мікроскопії (Інститут ядерної фізики ПАН, м. Краків) та вторинної іонної мас-спектрометрії (прилад MS-7201M). Обробка результатів здійснювалася за стандартними методиками. Для електронно-мікроскопічних та електроннографічних досліджень полікристалічні плівки конденсувалися на плівки-підкладки з вуглецю, а у випадку вивчення дифузійних процесів і топології поверхні використовувалися діелектричні ситалові пластини.

**Третій розділ** «Структурні характеристики та елементний склад плівкових зразків» складається із 5 підрозділів.

У першому та другому підрозділах наведені результати про кристалічну структуру та фазовий склад одношарових плівкових зразків Cu, Ni і Co та плівок із покриттям з Cu і Ni. Показано, що плівки Cu і Ni мають ГЦК-структуру, а плівки Co – ГЦП+ГЦК-структуру з міжплощинними відстанями та параметрами решітки, близькими до масивних зразків: Cu –  $a=0,3612$  нм ( $a_0=0,3615$  нм); Ni –  $a=0,3528$  нм ( $a_0=0,3524$  нм); ( $\alpha$ -Co) –  $a=0,2478$  нм ( $a_0=0,2507$  нм) і ( $\beta$ -Co) –  $a=0,3546$  нм ( $a_0=0,3548$  нм). Покриття із Cu і Ni ефективною товщиною до 5 нм мають острівцеву структуру, а їх фазовий склад відповідає фазовому складу суцільних плівок з ГЦК-решіткою. Хоча параметр решітки має дещо вище значення у порівнянні із масивними зразками і одношаровими плівками:  $a_{Cu}=0,3625$  нм;  $a_{Ni}=0,3534$  нм. Відпалені плівки Cu і Ni з покриттям із Ni і Cu відповідно мають також ГЦК-решітку з параметрами решітки, відповідними до правила Вегарда, що пов'язано із дифузійними процесами, за рахунок яких атоми покриття дифундують як по межах зерен, так і в об'єм зерен базисних плівок. У двошарових плівках на основі цих металів, після термообробки, утворюється т.р. з параметрами решітки, що мають значення, які знаходяться між параметрами решітки для масивних зразків Ni та Cu.

Згідно електронографічних даних, фазовий склад нанокристалічних плівкових зразків Co суттєво не змінюється після нанесення тонких покриттів з Ni та після відповідного циклу термовідпалювання, і електронографічно лінії від кристалографічних площин ГЦК Ni і Co розділити неможливо.

У третьому підрозділі наведено результати про фазовий склад, кристалічну структуру та дифузійні процеси у плівках Cu, Ni і Co з тонким покриттям із SiO<sub>2</sub>. Нанесення тонкого покриття та подальша термообробка зразків до температури  $T_B=550$ -650 К не змінюють структурно-фазового стану плівкових систем p-SiO<sub>2</sub>/Cu/П і p-SiO<sub>2</sub>/Co/П, що пов'язане з недостатньою температурою відпалювання даних зразків для формування силіцидів. Для плівкової системи p-SiO<sub>2</sub>/Ni/П характерне утворення низькотемпературного ( $T_B=630$  К) силіциду Ni<sub>2</sub>Si. Процеси фазоутворення у плівках металів із SiO<sub>2</sub> обумовлюють характер протікання в них дифузійних процесів.

У четвертому підрозділі приведено дані дослідження дифузійних процесів в плівках з тонким металевим покриттям та двошарових плівкових системах. У плівках з невідпаленим покриттям спостерігається максимальна концентрація атомів покриття на поверхні, а відпалення викликає його подальше проникнення у глибину базисної плівки. Величина ефективного коефіцієнта дифузії становить порядку  $10^{-19}$  м<sup>2</sup>/с, що свідчить про те, що дифузія атомів покриття із металів у базисну плівку відбувається переважно по межах зерен.

Результати топологічних досліджень поверхні плівкових зразків Cu з тонким покриттям із Ni або SiO<sub>2</sub> у невідпаленому та відпаленому станах представлені у *п'ятому підрозділі*. При відпалюванні плівок p-Ni/Cu/П до температури  $T_B=550$  К спостерігається збільшення шорсткості поверхні, а при відпалюванні плівкових систем p-SiO<sub>2</sub>/Cu/П до тієї самої температури – зменшення шорсткості. Це пов'язано з дифузійними процесами атомів Ni у базисну плівку Cu, а у випадку покриття із SiO<sub>2</sub> після проведення термовідпалювання воно залишається на поверхні, що підтверджується результатами досліджень структурно-фазового складу і дифузійних процесів методом ВІМС.

**Четвертий розділ** «Розрахунок параметрів електроперенесення» складається із чотирьох підрозділів.

У першому підрозділі проведено порівняння експериментальних результатів про температурні залежності електрофізичних властивостей у базисних плівках та плівках з покриттям. Показано, що нанесення тонкого покриття та подальша термообробка призводять до зміни значення питомого опору в бік зростання (плівки p-Ni/Cu/П і p-Cu/Ni/П) або зменшення (p-SiO<sub>2</sub>/Cu/П) та зміни чутливості питомого опору до зміни температури  $\Delta\rho/\Delta T$  у плівкових зразках p-Ni/Co/П, p-SiO<sub>2</sub>/Ni/П і p-SiO<sub>2</sub>/Co/П.



У другому підрозділі наведено експериментальні розмірні залежності температурного коефіцієнта опору для плівок Cu, Ni і Co без та з тонким покриттям при температурах вимірювання: для Cu –  $T=150, 360$  і  $550$  К; для Ni –  $T=100, 300$  і  $550$  К та для Co –  $T=130, 210, 300$  і  $450$  К. Можна відзначити, що загальною особливістю для плівок Cu, Ni і Co з тонкими металевими покриттями є зменшення значень ТКО (на 5-20%) у порівнянні з базисними плівковими зразками. На це різним чином впливає або збільшення питомого опору (плівки p-Ni/Cu/П, p-Cu/Ni/П), або зменшення чутливості  $\Delta\rho/\Delta T$  (плівки p-Ni/Co/П). Необхідно зазначити, що тенденція до зменшення ТКО спостерігається і при інших температурах вимірювання.

Нанесення покриття із  $\text{SiO}_2$  на поверхню плівок Cu призводить до збільшення ТКО на 10-12% при  $T=150$  К і на 6-9% при  $T=360$  К, а при  $T=500$  К значення ТКО зменшується на 4-6%; у плівках Ni і Co за рахунок нанесення покриття із  $\text{SiO}_2$  величина ТКО зменшується до 15%. Це обумовлено зміною параметра дзеркальності та коефіцієнтів розсіювання і проходження меж зерен.

Результати розрахунку параметрів електроперенесення у плівкових зразках з тонким покриттям та їх обговорення наведено відповідно у *третьому та четвертому підрозділах*. Обробка експериментальних розмірних залежностей ТКО проводилася з використанням співвідношень лінеаризованої моделі (1) та моделі ізотропного розсіювання (2) ТТП. При розрахунку параметрів електроперенесення було зроблено припущення, що нанесення покриття не призводить до зміни величини СДВП, а викликає тільки зміни умов розсіювання на зовнішніх і внутрішніх межах плівки. Для розрахунку було використано такі значення розмірів зерен:  $L_{Cu}=50$  нм,  $L_{Ni}=40$  нм,  $L_{Co}=20$  нм, які були одержані виходячи з даних електронно-мікроскопічних досліджень. Результати обробки експериментальних даних наведено в таблиці 1.

Як бачимо з таблиці 1, нанесення тонкого покриття із металів у всіх випадках призводить до погіршення параметра дзеркальності, що пов'язане зі зміною мікрорельєфу поверхні базисних плівок. Також, аналізуючи величину  $p$ , можна відмітити, що дзеркальність зовнішніх поверхонь менша, у плівках Co, де середній розмір зерна має найменше значення, а більша – у плівках Cu. Зовнішня поверхня складається з окремих граней кристалітів, які випадковим чином орієнтовані один стосовно іншого, що обумовлює ступінь її шорсткості, яка зростатиме при збільшенні ступеня дисперсності кристалітів.

Острівцеве покриття із металів викликає погіршення умов розсіювання на зовнішніх межах, оскільки будь-яка кількість інорідних атомів на поверхні утворює додаткові центри розсіювання для електронів. У плівках Ni після нанесення покриття із  $\text{SiO}_2$ , формується низькотемпературна силіцидна фаза  $\text{Ni}_2\text{Si}$ , у тому числі і на поверхні, що викликає зменшення параметра дзеркальності відносно непокритих базисних плівок. У плівковій системі p- $\text{SiO}_2/\text{Cu}/\text{П}$  коефіцієнт дзеркальності зростає, що підтверджується результатами досліджень атомно-силової мікроскопії. Не виключено, що тонке покриття із  $\text{SiO}_2$ , поглинаючи електрони із базисної плівки Cu, отримує негативний заряд, який збільшує ймовірність дзеркального відбиття електронів від поверхні.

За рахунок дифузії атомів покриття із Ni (Cu) у базисну плівку Cu (Ni) величина коефіцієнта  $R$  зростає, а  $r$  зменшується (табл. 1), що можливо пов'язано зі створенням додаткових дефектів на МЗ базисної плівки, які, в свою чергу, створюють додаткові розсіювальні центри, що підтверджується розрахунками на основі термодинамічного підходу та уявленнями теорії Маядаса-Шатцкеса про взаємозв'язок сили потенціального бар'єра на межах зерен і коефіцієнта розсіювання електронів.

Таким чином, у результаті нанесення тонкого покриття з Ni (Cu) на суцільну плівку з Cu (Ni) значення ТКО зменшується під дією двох факторів: за рахунок погіршення прозорості меж зерен у результаті дифузії атомів Ni

або Cu та збільшення дифузності зовнішніх поверхонь. У плівковій системі p-SiO<sub>2</sub>/Ni/П також має місце погіршення умов розсіювання на МЗ, із зазначеної вище причини, яка поглиблюється ще й утворенням Ni<sub>2</sub>Si.

Таблиця 1

Параметри електроперенесення

Плівка	<i>T</i> , К	$\lambda(1-p)$ , нм	<i>p</i>	<i>R</i>	<i>r</i>
Cu/П	150	27,5	0,29	0,07	0,92
п-Ni/Cu/П			0,25	0,13	0,85
п-SiO <sub>2</sub> /Cu/П			0,41	0,03	0,96
Cu/П	360	22,4	0,25	0,46	0,41
п-Ni/Cu/П			0,10	0,51	0,38
п-SiO <sub>2</sub> /Cu/П			0,39	0,41	0,48
Cu/П	500	19,8	0,11	0,57	0,26
п-Ni/Cu/П			0,04	0,58	0,25
п-SiO <sub>2</sub> /Cu/П			0,10	0,57	0,26
Ni/П	100	42,6	0,26	0,12	0,86
п-Cu/Ni/П			0,18	0,16	0,81
п-SiO <sub>2</sub> /Ni/П			0,22	0,14	0,84
Ni/П	300	28,7	0,19	0,02	0,97
п-Cu/Ni/П			0,10	0,05	0,94
п-SiO <sub>2</sub> /Ni/П			0,11	0,03	0,96
Ni/П	550	26,9	0,21	0,04	0,95
п-Cu/Ni/П			0,06	0,16	0,82
п-SiO <sub>2</sub> /Ni/П			0,09	0,10	0,89
Co/П	130	53,1	0,10	0,07	0,92
п-Ni/Co/П			0,05	0,09	0,90
п-SiO <sub>2</sub> /Co/П			0,06	0,08	0,91
Co/П	300	42,2	0,11	0,12	0,86
п-Ni/Co/П			0,06	0,14	0,84
п-SiO <sub>2</sub> /Co/П			0,02	0,13	0,85
Co/П	450	39,7	0,03	0,25	0,71
п-Ni/Co/П			0,02	0,27	0,68
п-SiO <sub>2</sub> /Co/П			0,02	0,26	0,69

Ситуація у випадку плівок міді з покриттям із SiO<sub>2</sub> зворотна, тобто має місце покращення прозорості МЗ. Згідно з даними ВІМС і АСМ на поверхні плівки Cu після відпалювання залишається шар SiO<sub>2</sub>. Молекулярний об'єм SiO<sub>2</sub> більший за атомарний об'єм плівки Cu і молекули діоксиду кремнію майже не дифундують у плівку Cu. Можливо, покриття із SiO<sub>2</sub> на поверхні Cu не дозволяє проникнути по МЗ домішковим атомам із залишкової атмосфери. Тому межі зерен містять їх меншу кількість і, як наслідок, мають вищу прозорість для електронів провідності.

Нанесення покриття із Ni на плівку Co призводить до зменшення питомого опору, тому прозорість меж зерен повинна стати більшою внаслідок дифузії по них атомів Ni, а отримане незначне збільшення (зменшення) коефіцієнтів  $R(r)$  (таблиця 1) пов'язане з суто методичними питаннями розрахунку на основі моделей ТТП. Розрахунок значення коефіцієнта розсіювання на межі зерна на основі означення для параметра зерномежового розсіювання ( $\alpha$ ) із моделі Маядаса-Шатцкеса та асимптотичного співвідношення для питомого опору моделі Ухлінова-Косаківської свідчить, що при  $T=300$  К для плівок Co –  $R=0,10$ , а для плівок p-Ni/Co/П –  $R=0,06$ . Аналіз даних про величину коефіцієнта розсіювання на межі зерна у плівках Co показав наступне.

По-перше, порядок величини узгоджується з даними, отриманими у рамках моделей ТТП (табл. 1). По-друге, за рахунок дифузії атомів Ni із покриття по межах зерен плівок Co спостерігається покращення прозорості їх для електронів провідності.

У випадку плівкових зразків p-SiO<sub>2</sub>/Co/П можна відзначити, що величина коефіцієнта розсіювання і проходження межі зерна не змінюється. Тобто із покриття SiO<sub>2</sub>, як і потрібно було очікувати, відсутній потік домішки у межі зерен Co, що підтверджується даними ВІМС та електронно-мікроскопічних досліджень. Це покриття впливає лише на дзеркальність зовнішньої поверхні. Саме зміна параметра дзеркальності  $p$  і призводить до зменшення ТКО, хоча величина опору фактично залишається незмінною.

**П'ятий розділ** «Вплив дифузійних процесів на електрофізичні властивості плівок з покриттям» складається із 2 підрозділів.

У *першому підрозділі* наведено результати досліджень, отримані при використанні методу резистометрії для вивчення дифузійних процесів у плівкових системах покриття/базисна плівка при низькотемпературному відпалюванні. Нанесення тонкого покриття із металів та витримка при  $T=300$  К не призводять до відчутних змін опору (зменшення становить не більше 2%). В процесі відпалюванні при температурах 373, 473 та 533 К спостерігається незворотне збільшення електроопору протягом 10 хвилин на величину від десятих часток до декількох Ом, що обумовлено дифузійними процесами атомів покриття у базисний шар. Розрахунок коефіцієнта зерномежової дифузії у плівках Cu, Co (Ni) з покриттям з Ni (Cu) показав, що його величина має значення порядку  $10^{-19}$  м<sup>2</sup>/с, що узгоджується з даними обробки дифузійних профілів, які були отримані методом ВІМС.

У *другому підрозділі* проведено апробацію асимптотичного співвідношення ( $\alpha \ll 1$ ) теоретичної моделі для питомої провідності моноблокових полікристалічних плівок металів із тонким покриттям, яка отримана на основі теорії Маядаса-Шатцкеса:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\infty}} = 1 - \frac{3}{2} \alpha' - \frac{3\lambda(2 - p_1 - p_2)}{16d} \left( 1 - \frac{32}{3\pi} \alpha' \right), \quad (3)$$

де  $\sigma_{\infty} = \lim_{d \rightarrow \infty} \sigma$ ,  $p_1$  і  $p_2$  – параметри дзеркальності двох протилежних зовнішніх поверхонь плівок.

Під час розрахунку провідності плівок із тонким покриттям на основі (3) величина параметра зерномежового розсіювання  $\alpha'$  знаходилася нами за формулою  $\alpha' = (\lambda/L)(R'/(1-R'))$ , де  $R' = R + \gamma_g c_g$  ( $\gamma_g$  - коефіцієнт, який визначає характер межі: при  $\gamma_g < 0$  інерідні атоми призводять до того, що межа стає більш прозорою, а при  $\gamma_g > 0$  – більш розсіювальною;  $c_g$  - концентрація дифундуючих атомів по межах кристалітів). На основі наведеного співвідношення було отримано залежності питомої провідності від товщини для плівок Cu, Ni і Co з металевим покриттям та без нього (в останньому випадку у співвідношенні (3) замість  $\alpha'$  використовувався  $\alpha$  – параметр зерномежового розсіювання для плівок без покриття).

У плівках p-Ni/Cu/П та p-Cu/Ni/П нанесення покриття призводить до зменшення питомої провідності, а у плівках Co з покриттям із Ni провідність зростає. Тенденція до зміни електрофізичних властивостей на основі запропонованої моделі узгоджується з отриманими експериментальними результатами. Про ступінь відповідності екс-

периментальних та розрахункових даних можна робити висновки із таблиці 2. Як бачимо, має місце кількісна відповідність.

Таблиця 2

Експериментальні та розрахункові значення питомого опору

Плівка	$d$ , нм	$\rho_{\text{екс.}} \cdot 10^8$ Ом·м	$\rho_{\text{роз.}} \cdot 10^8$ Ом·м	$ \rho_{\text{роз.}} - \rho_{\text{екс.}}  / \rho_{\text{роз.}}, \%$
п-Ni/Cu/П	36	3,3	3,2	3
	60	2,6	2,6	0
п-Cu/Ni/П	30	19,4	19,6	1
	60	17,6	16,3	8
п-Ni/Co/П	32	37,7	36,3	4
	50	24,8	23,9	4

Використавши співвідношення (3) та аналогічне співвідношення для ТКО:

$$\frac{\beta}{\beta_0} = 1 - \frac{3}{2}\alpha - \frac{3\lambda(1-p)}{8d} \left(1 - \frac{12}{\pi}\alpha\right),$$

було проведено розрахунки розмірних залежностей питомого опору і ТКО плівок при різних значеннях коефіцієнтів дзеркальності і розсіювання на межі зерна. Аналізуючи отримані результати, можна відзначити наступне. По-перше, збільшення параметра дзеркальності призводить до зменшення питомого опору та збільшення ТКО. По-друге, за рахунок підсилення зерномежового розсіювання питомий опір плівкових зразків зростає, що викликає зменшення ТКО. По-третє, розсіювання на міжкристалітних межах сильніше впливає на електрофізичні властивості плівкових зразків, ніж поверхневе.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведено вивчення впливу зміни умов поверхневого і зерномежового розсіювання електронів за рахунок сегрегації на зовнішніх і внутрішніх межах інохідних атомів на розмірні ефекти в електрофізичних властивостях (питомий опір, температурний коефіцієнт опору) та параметрах електроперенесення (параметр дзеркальності зовнішніх поверхонь, коефіцієнти проходження і розсіювання меж зерен) плівкових систем покриття/плівка. Це дало можливість отримати такі наукові результати:

1. Методами просвічуючої електронної та атомно-силової мікроскопії, електроннографії та вторинної іонної мас-спектрометрії вперше проведені комплексні дослідження структурно-фазового стану і дифузійних процесів у плівкових зразках Cu, Co (Ni) та з металевим Ni (Cu) або діелектричним (SiO<sub>2</sub>) покриттям з ефективною товщиною в декілька моношарів :

- встановлено, що внаслідок дифузії атомів покриття із Cu і Ni в базисні шари Ni і Cu спостерігається зміна параметра решітки базисних плівок відповідно до правила Vegarda;
- фазовий склад у плівок Cu і Co після нанесення тонкого покриття із SiO<sub>2</sub> і термообробки до 550-650 К відповідає одношаровим плівкам цих металів; для плівок п-SiO<sub>2</sub>/Ni/П, які пройшли аналогічне термовідпалювання, електроннографічно фіксується утворення низькотемпературного силіциду Ni<sub>2</sub>Si;

- дифузійні процеси в плівках із металевим покриттям починають відбуватися вже на стадії конденсації; термообробка до температур 550-650 К призводить до розподілу, за рахунок зерномежової дифузії, атомів покриття за глибиною базисних шарів із максимальною концентрацією біля поверхні;
- за рахунок термовідпалювання до 550 К у плівках Cu з покриттям із SiO<sub>2</sub> має місце зменшення шорсткості зовнішньої поверхні, що збільшує її дзеркальність для електронів провідності.

2. Експериментально показано, що внаслідок нанесення тонкого покриття із Cu і Ni на базисні плівки Ni і Cu та наступної термообробки значення їх ТКО зменшується до 20%. Покриття із SiO<sub>2</sub> викликає також зменшення ТКО до 15% у плівках Ni і Co та збільшення до 12% – у плівках Cu.

3. Шляхом обробки експериментальних результатів з розмірної залежності ТКО плівок Cu, Ni і Co без та з покриттям отримано значення коефіцієнтів проходження і розсіювання електронів на межах зерен. Показано, що їх значення можуть як збільшуватися, так і зменшуватися. Зокрема:

- дифузія атомів Cu і Ni у базисні плівки Ni і Cu відповідно за рахунок створення додаткових розсіювальних центрів викликає зменшення (збільшення) коефіцієнта проходження (розсіювання) меж зерен;
- у плівках Co дифузія атомів Ni приводить до заліковування існуючої дефектної структури, що збільшує значення коефіцієнта проходження МЗ електронами;
- утворення на межі зерна та на поверхні у плівках Ni з покриттям із SiO<sub>2</sub> незначної кількості силіцидів викликає погіршення умов розсіювання для електронів провідності;
- прозорість меж зерен у плівках Cu з покриттям із SiO<sub>2</sub> зростає, оскільки покриття із діоксиду кремнію не дозволяє проникати в межі атомам із залишкової атмосфери.

4. Покриття із металів на базисних плівках Cu, Ni і Co викликає погіршення дзеркальності зовнішніх поверхонь зразків. У випадку плівок з покриттям із SiO<sub>2</sub> можливе як зростання коефіцієнта дзеркальності (плівки p-SiO<sub>2</sub>/Cu/П), так і його зменшення (плівки p-SiO<sub>2</sub>/Ni(Co)/П).

5. Використання резистометричного методу для плівок Cu, Ni та Co з металевим покриттям показало:

- в процесі відпалюванні плівкових зразків при постійних температурах нижче 533 К спостерігається протягом декількох хвилин незворотне збільшення електричного опору від десятків до декількох Ом, яке обумовлено дифузійними процесами атомів покриття по межах зерен базисних плівок;
- коефіцієнт зерномежової дифузії має значення порядку  $10^{-19}$  м<sup>2</sup>/с, що узгоджується з даними, які були отримані з використанням методу вторинної іонної мас-спектрометрії.

6. Проведення апробації асимптотичного співвідношення теоретичної моделі для питомої провідності моноблокових полікристалічних плівок з тонким металевим покриттям, яке отримано в рамках теорії Маядаса-Шатцкеса, показало, що у плівках p-Ni/Cu/П та p-Cu/Ni/П нанесення покриття призводить до зменшення питомої провідності, а у плівках Co з покриттям із Ni провідність збільшується; відповідність розрахункових результатів експериментальним даним становить 8%.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Говорун Т.П. Електрофізичні властивості плівок міді з тонким покриттям з нікелю / [Т.П. Говорун, А.О. Степаненко, А.М. Черноус] // ФХТТ.– 2004.– Т.5, № 2.– С. 280–285.

*Здобувачем було здійснено відбір літературних джерел, отримано експериментальні результати з досліджень впливу тонкого покриття із Ni на плівки Cu, проведено їх обробку за допомогою лінеаризованої моделі та моделі ізотропного розсіювання Тельє, Тоссе і Пішар.*

2. Novorun T. Thin overlayer influence on electrophysical properties of nickel films / [T. Novorun, A. Chornous] // Cryst. Res. Technol.– 2006.– V.41, № 5.– P. 458–463.

*Здобувачем було отримано експериментальні результати з температурних залежностей питомого опору та розмірних залежностей ТКО для плівок Ni з покриттям із Cu або SiO<sub>2</sub>, проведено розрахунок параметрів електроперенесення за допомогою лінеаризованої моделі та моделі ізотропного розсіювання ТПП.*

3. Говорун Т.П. Електрофізичні властивості нанокристалічних плівок кобальту із покриттям Ni або SiO<sub>2</sub> / [Т.П. Говорун, Л.В. Дехтярук, А.М. Черноус] // Металлофиз. новейшие технологии.– 2007.– Т. 29, № 11.– С. 1479–1493.

*Здобувачем було проведено аналіз літературних джерел, дослідження електрофізичних властивостей у плівках Co з тонким покриттям із Ni або SiO<sub>2</sub> та підготовлено текст статті.*

4. Chornous A.M. Influence of diffusing impurities on the electrical conductivity of single-crystal and polycrystalline metal films / [A.M. Chornous, L.V. Dekhtyaruk, T.P. Novorun, and A.O. Stepanenko] // Металлофиз. новейшие технологии.- 2007.– Т. 29, № 2.– С. 249–266.

*Здобувач брала участь у постановці задачі та виконала апробацію асимптотичного співвідношення для питомої провідності моноблокових полікристалічних плівок.*

5. Говорун Т.П. Дифузійні процеси та фазовий склад плівок на основі Cu, Ni і Co з тонким покриттям / [Т.П. Говорун, С.І. Проценко, І.О. Шпетний, А.М. Черноус, А.І. Салтикова] // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка.– 2008. –№1.– С. 66–81.

*Здобувачем підготовлено зразки, вона брала участь у проведенні експериментів та здійснила обробку експериментальних результатів, отриманих при дослідженні методом ВІМС, структурного і фазового складу плівкових зразків Cu, Ni і Co з тонким металевим та діелектричним покриттям і двошарових плівок на основі цих металів.*

6. Белоус Е.А. Расчет параметров электропереноса в пленках металлов с тонким покрытием / [Е.А. Белоус, Т.П. Говорун, А.Н. Черноус] // Тонкие пленки: сборник докладов 19-го Международного симпозиума «Тонкие пленки в оптике, нанофотонике и наноэлектронике».- Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007.- Т.2.- С. 72 – 77.

*Здобувачем було отримано експериментальні дані та проведено розрахунок параметрів електроперенесення у плівках Cu, Ni і Co з тонким металевим покриттям, узагальнено експериментальні результати, підготовлено текст статті.*

7. Говорун Т.П. Дифузійні процеси в плівкових системах (Ni, SiO<sub>2</sub>)/Cu та (Cu, SiO<sub>2</sub>)/Ni / [Т.П. Говорун, І.О. Шпетний] // Наноматериалы: сборник докладов Харьковской нанотехнологической Ассамблеи-2008.- Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008.- Т.2.- С. 51 – 54.

*Здобувач підготував зразки, брав участь у проведенні та здійснив обробку експериментальних результатів, отриманих при дослідженні методом ВІМС дифузійних процесів в плівкових системах (Ni, SiO<sub>2</sub>)/Cu та (Cu, SiO<sub>2</sub>)/Ni, розрахував ефективні коефіцієнти дифузії, підготував текст статті.*

8. Говорун Т.П. Влияние тонкого покрытия на электрофизические свойства пленок никеля / [Т.П. Говорун, А.Н. Черноус] // Материалы докладов V Международной конференции «Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении» (3-5 октября 2004 г.).– Воронеж: ВГТИ, 2004. – С. 96-97.

*Здобувачем було отримано експериментальні результати з дослідження впливу тонкого покриття із Си на електрофізичні властивості плівок нікелю та підготовлено текст тези.*

9. Воробійов Г.С. Вплив зерномежової дифузії в тонких плівках на процеси розсіювання електронів / [Г.С. Воробійов, Т.П. Говорун, А.М. Черноус] // Матеріали Ювілейної X Міжнародної конференції «Фізика і технологія тонких плівок» (16-21 травня 2005 р.).- Івано-Франківськ, 2005.- С. 241-242.

*Здобувачем були проведені експериментальні дослідження впливу тонкого покриття з Ni і Си на величину температурного коефіцієнта опору плівок Си і Ni відповідно та проведений розрахунок параметрів електроперенесення, підготовлено текст тези.*

10. Говорун Т.П. Вивчення зерномежової дифузії у плівкових матеріалах методом резистометрії / [Т.П. Говорун, В.М. Кузнецов] // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів фізико-технічного факультету (20-29 квітня 2006 р. ).– Суми: СумДУ, 2006. – С. 19–21.

*Здобувачем було вивчено дифузійні процеси за допомогою резистометричного методу у плівкових матеріалах і проведено оцінку коефіцієнта зерномежової дифузії та підготовлено текст тези.*

11. Бондар О.О. Вплив тонкого покриття із Ni або SiO<sub>2</sub> на електрофізичні властивості плівок Со / О.О. Бондар, Т.П. Говорун, А.М. Черноус // Матеріали XI Міжнародної конференції «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем» (7-12 травня 2007 р.).- Івано-Франківськ, 2007.- С. 56.

*Здобувачем досліджено розмірний ефект у питомому опорі і ТКО плівок Со з тонким покриттям та підготовлено текст тези.*

## АНОТАЦІЯ

**Говорун Т.П. Розмірний ефект в електрофізичних властивостях плівок Си, Ni та Со з тонким металевим або діелектричним покриттям. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла. - Сумський державний університет, Суми, 2009.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню розмірних ефектів в електрофізичних властивостях (питомий опір, температурний коефіцієнт опору) і параметрах електроперенесення (параметр дзеркальності зовнішніх поверхонь, коефіцієнти проходження і розсіювання меж зерен) та особливостей структурно-фазового стану, дифузійних процесів у плівках Си, Со (Ni) з тонким покриттям із Ni (Cu) або SiO<sub>2</sub>.

Встановлено, що за рахунок нанесення тонкого металевого покриття з ефективною товщиною в декілька моносарів та проведення термообробки, величина температурного коефіцієнта опору базисних плівок зменшується до 20%, що обумовлено зміною умов розсіювання на зовнішніх і внутрішніх межах. Шляхом обробки експериментальних розмірних залежностей на основі теоретичних моделей Тельє, Тоссе і Пішар показано, що дзеркальність зовнішніх поверхонь в усіх випадках, за винятком плівок p-SiO<sub>2</sub>/Cu/P, погіршується. У плівках Си і Ni за рахунок зерномежової дифузії атомів Ni і Си відповідно зростає дефектність меж зерен, що спричиняє збільшення їх розсіювальної здатності, на відміну від плівок Со, де нанесення покриття із Ni приводить до заліковування дефектів на МЗ, результатом чого є покращання їх прозорості для електронів провідності.

**Ключові слова:** металева плівка, тонке покриття, температурний коефіцієнт опору, внутрішній і зовнішній розмірні ефекти, параметр дзеркальності, коефіцієнти проходження і розсіювання на межах зерен.

## АННОТАЦІЯ

**Говорун Т.П. Размерный эффект в электрофизических свойствах пленок Cu, Ni и Co с тонким металлическим или диэлектрическим покрытием. -Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2009.

Диссертационная работа посвящена исследованию размерных эффектов в электрофизических свойствах (удельное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления (ТКС)), параметрах электропереноса (параметр зеркальности внешних поверхностей, коэффициенты прохождения и рассеивания границ зерен) и особенностей структурно-фазового состояния, диффузионных процессов в пленках Cu, Co (Ni) с тонким покрытием из Ni (Cu) або SiO<sub>2</sub>.

Показано, что вследствие термообработки, атомы металлического покрытия диффундируют преимущественно по границам зерен вглубь базисных пленок. Фазовый состав при этом соответствует фазовому составу одношаговых пленок Cu, Ni и Co с немного отличающимися (в соответствии с правилом Вегарда) параметрами решетки. Нанесение тонкого покрытия из SiO<sub>2</sub> и последующая термообработка образцов до температуры  $T_B=550-650$  К не изменяют структурно-фазового состояния пленок Cu и Co. Для пленочной системы p-SiO<sub>2</sub>/Ni/П характерно образование низкотемпературного силицида Ni<sub>2</sub>Si.

Установлено, что за счет нанесения тонкого металлического покрытия и проведения термообработки значение температурного коэффициента сопротивления базисных пленок уменьшается до 20%, что обусловлено изменением условий рассеивания на внешних и внутренних границах. Путем обработки экспериментальных размерных зависимостей на основе теоретических моделей Телье, Тоссэ и Пишар показано, что зеркальность внешних поверхностей во всех случаях, за исключением пленок Cu с покрытием из SiO<sub>2</sub>, становится хуже. В пленках Cu и Ni за счет зернограницной диффузии атомов Ni и Cu соответственно увеличивается дефектность границ зерен, что вызывает рост их рассеивающей способности, в отличие от пленок Co, где нанесение покрытия из Ni залечивает дефекты на границах зерен, что приводит к улучшению их прозрачности для электронов проводимости.

Проведено апробацию асимптотического соотношения для удельной проводимости (сопротивления) поликристаллических пленок Cu, Ni и Co с тонким металлическим покрытием, полученного на основании теории Маядаса-Шатцкеса. Показано, что экспериментальные значения соответствуют расчетным с точностью до 8%.

**Ключевые слова:** металлические пленки, тонкое покрытие, температурный коэффициент сопротивления, внутренний и внешний размерные эффекты, параметр зеркальности, коэффициенты прохождения и рассеивания на границах зерен.

## SUMMARY

**Hovorun T.P. Size effect in electrophysical properties of the Cu, Ni and Co films with thin metal or dielectric overlayer. – Manuscript.**

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D.) in physics and mathematics on specialty 01.04.07 – State solid physics – Sumy State University, Sumy, 2009.

The dissertation work is devoted to theoretical and experimental research of size effects in electrophysical properties (resistivity, temperature coefficient of resistance) and parameters of electrical transfer (the specularity parameter, the reflection and transmission coefficients at the grain boundary), features of the structurally-phase state, diffusive processes in the Cu, Co (Ni) films with thin overlayer Ni (Cu) or SiO<sub>2</sub>.

It is set that due to causing of thin metallic overlayer and conducting thermal annealing, the size of temperature coefficient of resistance of tapes of bases diminishes to 20%, that is conditioned the change of terms of dispersion on external



and internal boundary. By treatment of experimental dependences of sizes on the basis of theoretical models of Tellier, Tosser and Pichard is shown, that the specularly parameter in all cases, except for Cu films with thin overlayer  $\text{SiO}_2$ , goes from bad to worse. In films of Cu and Ni due to grain-boundary diffusion of atoms Ni and Cu imperfectness of grains boundary is accordingly increased, that causes growth of their dispersive ability, unlike tapes Co, where the atoms of Ni heal imperfectness on the grains boundary, by a result what an improvement of their transparency for the electrons of conductivity is.

**Keywords:** metal film, overlayer, temperature coefficient of resistance, internal and external size effect, the specularly parameter, the reflection coefficients and the transmission coefficients of the grain boundary.

Підп. до друку 22.05.2009.

Обл.- вид. арк. 0,9.

Ум. друк. арк. 1,1.

Наклад 100 пр.

Замовлення № 716.

Формат 60×90/16.

Папір ксероксний.

Гарнітура Times New Roman Cyr.

Друк офсетний.

Видавництво СумДУ при Сумському державному університеті

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

Свідоцтво про внесення видавничої справи до Державного реєстру

ДК № 3062 від 17.12.2007 р.

Надруковано у друкарні СумДУ

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