

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Бібик Віталій Володимирович

УДК 535.24.2

**ФОРМУВАННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ Ni/Fe та Cr/Fe**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті
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
Равлік Анатолій Георгійович,
професор кафедри фізики металів та напів-
провідників Харківського національного тех-
нічного університету „ХПІ”;

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

Захист відбудеться «25» квітня 2008 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалі-
зованої вченої ради Д.55.051.02 у Сумському державному університеті за
адресою: 40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Сумського державного уні-
верситету.

Автореферат розісланий « __ » березня 2008 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.С.Опанасюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перспективи застосування тонких металевих плівок в ряді сучасних новітніх технологій зумовлено як вимогами мініатюризації, так і часто унікальними властивостями та ефектами, що в них спостерігаються. Впровадження новітньої магніто-плівкової головки корпорацією IBM на основі сплаву FeNi з її незаперечними перевагами, такими як надвисокою чутливістю до корисного сигналу і низькою до шуму, мініатюрністю і малою вагою, дозволяє фіксувати магнітні сигнали рівня недосяжного іншими технологіями. Водночас сучасні дослідження багат шарових плівкових систем типу Fe/Cr.../Fe/Cr/Π (Π-підкладка), в яких спостерігається ефект спін-залежного розсіювання електронів, дозволяють вважати їх одними із найбільш перспективних для практичного використання в пристроях надщільного магнітного запису (до 1 Тбіт/дюйм²), при створенні широко смугових ліній одночасної передачі двох сигналів у 3-5-сантиметровому діапазоні хвиль.

Поряд із незаперечними перспективами використання таких плівкових систем ряд їх фізичних властивостей і особливостей структурного стану залишаються маловивченими.

Однією із задач фізики тонких плівок, яка має як науковий так і безпосередньо практичний інтерес, є дослідження ролі дифузійних процесів і впливу фазоутворення на електрофізичні властивості мультишарів. Розуміння вищезазначених закономірностей відкриє можливість прогнозувати властивості тонкоплівкових систем в залежності від умов, їх формування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася у рамках держбюджетної теми №0100U003219 «Дифузійні процеси у багат шарових системах плівка/плівка і плівка/масивний матеріал» (2000-2002 рр.); спільного проекту науково-технічного співробітництва №М/18-2004 від 29 березня 2004 р. «Дифузійні процеси і транспортні властивості мультишарів і тонких плівок» між Сумським державним університетом і Інститутом ядерної фізики ПАН (м.Краків, Польща) (2004-2005 рр.).

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є встановлення закономірностей при формуванні структурно-фазового стану і електрофізичних властивостей двошарових плівок на основі Ni і Fe та Cr і Fe в умовах взаємної дифузії атомів і фазоутворення.

Відповідно до мети роботи вирішувалися такі задачі:

- здійснення аналізу літературних даних стосовно структурно-фазового стану і електрофізичних властивостей двошарових плівок Ni/Fe і Cr/Fe;
- проведення дослідження фазових перетворень при термоциклічній обробці двошарових плівкових систем в інтервалі температур 300–1200 К;

- експериментального дослідження особливостей конденсаційно-стимульованої і термодифузії у двошарових плівках, де можливе утворення проміжних фаз, твердих розчинів чи евтектик;
- проведення досліджень розмірних ефектів у електрофізичних властивостях;
- апробації теоретичних моделей розмірного ефекту в термічному коефіцієнті опору(ТКО) двошарових плівок;
- апробації теоретичних моделей тензочутливості в системах Ni/Fe та Cr/Fe.

Об'єкт дослідження – вплив дифузійних процесів, фазоутворення та розмірних ефектів на електрофізичні властивості плівкових систем.

Предмет досліджень– електрофізичні властивості двошарових плівок Ni/Fe і Cr/Fe в умовах проходження твердофазних реакцій та дифузійних процесів.

Відповідно до поставлених задач застосовувалися *методи досліджень*:

- електронна мікроскопія і електронографія;
- вторинно-іонна мас-спектрометрія;
- оже-електронна спектроскопія
- термо- і тензорезистометрія.

Наукова новизна одержаних результатів. Здійснене в роботі комплексне дослідження фазових перетворень, дифузійних процесів і електрофізичних властивостей дозволило встановити зв'язок між структурно-фазовим станом плівкових систем та електрофізичними властивостями і отримати такі нові результати:

1. Вперше встановлено закономірності процесів фазоутворення в двошарових плівках Ni/Fe і Cr/Fe і показана можливість формування заданого структурно-фазового складу шляхом зміни товщин шарів у двошаровій структурі та встановлення режимів термічної обробки;
2. Розраховані коефіцієнти взаємної дифузії атомів у процесі зерномежової конденсаційно-стимульованої дифузії та термодифузії за допомогою методів вторинно-іонної мас-спектрометрії та оже-електронної спектроскопії; визначені параметри дифузії та записані рівняння дифузії; встановлено переважний вплив на формування фазового складу дифузійних процесів, які протікають на стадії конденсації плівкових систем;
3. Вперше побудовані структурно-фазові схеми утворення твердих розчинів(т.р.) у двошарових плівкових системах Ni/Fe та Cr/Fe;
4. Встановлено вплив фазових перетворень і дифузійних процесів на температурні залежності опору і ТКО у двошарових плівкових системах на основі Ni і Fe та Cr і Fe;
5. Набула подальшого розвитку апробація теоретичних (макро- і напівфеноменологічної) моделей розмірного ефекту в ТКО двошарових плівок ; показано, що існує чітка кореляція між величиною ТКО та структурно-

фазовим станом досліджених плівкових систем; вперше здійснено прогнозування ТКО плівкових систем на основі Ni і Fe та Cr і Fe в залежності від товщин окремих шарів;

6. Вперше отримано експериментальні дані і проведено апробацію теоретичних моделей тензочутливості в системах Ni/Fe та Cr/Fe.

Практичне значення одержаних результатів. Фундаментальне значення отриманих результатів полягає у подальшому розширенні знань про електрофізичні властивості, тензочутливість та твердофазні реакції і дифузійні процеси в двошарових плівкових системах.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в плівковому матеріалознавстві, мікроелектроніці та приладобудуванні зокрема при розробці технологічних умов при створенні надчутливих датчиків, прогнозуванні їх надійності і стабільності параметрів.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальних досліджень та обробці і узагальненні отриманих результатів. Автор особисто виготовляв плівкові зразки, досліджував електрофізичні властивості, фазовий склад, кристалічної структуру та дифузійні процеси. Постановка завдання, вибір експериментальних методик, обговорення результатів досліджень та формулювання висновків проводилися спільно з науковим керівником проф. І.Ю. Проценком. Дослідження дифузійних процесів та елементного складу методом вторинно-іонної мас-спектрометрії проводилося спільно з доцентом А.І. Салтиковою (Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка). За участю кандидата фізикоматематичних наук Проценка С.І. проводилися дослідження методами оже-електронної спектроскопії. Особисто автором підготовлені статті [1, 5] і розділи 3 в [4, 6] та розділ 2 в [7], а також тези доповідей [9, 10, 12, 13, 15]. Статті [2-4, 6, 7] написано у співавторстві.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на таких наукових конференціях: Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету СумДУ (Суми, 2003, 2004, 2005, 2006 рр.); IX Міжнародній конференції „Фізика і технологія тонких плівок” (Івано-Франківськ, 2003 р.); Всеукраїнських конференціях молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЕВРИКА (Львів, 2003, 2004, 2006рр.); Науковій конференції з Міжнародною участю „Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології” (Кременчук, 2004 р.); V Міжнародній конференції „Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении (Воронеж, 2004 р.); 7-й Міжнародній конференції „Фізичні явища в твердих тілах” (Харків, 2005 р.); 18-му Міжнародному симпозиумі «Тонкие пленки в оптике и нанoeлектронике» (Харків, 2006 р.), на 19-му Міжнародному науково-технічному симпозиумі „ Тонкие пленки ” (Харків, 2007 р.).

Публікації. Основні матеріали дисертації відображені в 7 статтях, із них 5 опубліковані у фахових виданнях та в 8 тезах доповідей у матеріалах наукових конференцій.

Структура і зміст роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Обсяг дисертації складає 123 сторінки, ілюстрована 30 рисунками і 12 таблицями. Список використаних джерел містить 136 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, задачі досліджень, визначена наукова новизна та практичне значення результатів, внесок здобувача та наведено структуру роботи.

Перший розділ " Фазоутворення і дифузійні процеси в двокомпонентних металевих плівкових системах " являє собою огляд літературних даних і складається із п'яти підрозділів. У першому і другому підрозділі дається загальна характеристика багат шарових плівкових систем на основі Ni і Fe та Cr і Fe та аналізуються дані про фазоутворення у масивних зразках сплавів Ni-Fe та Cr-Fe. У третьому підрозділі розглянуто експериментальні результати про фазоутворення у нанорозмірних плівкових системах на основі Ni і Fe та Cr і Fe. Четвертий підрозділ присвячений аналізу особливостей дифузійних процесів в нанокристалічних плівкових системах. У п'ятому підрозділі аналізуються електрофізичні властивості та теоретичні моделі провідності, ТКО і тензочутливості двошарових плівкових систем.

Другий розділ „Методика і техніка експерименту” присвячений методикам отримання та післяконденсаційної обробки зразків на основі Ni і Fe та Cr і Fe , методиці вивчення електрофізичних властивостей, методам досліджень фазового складу плівкових систем, особливостей кристалічної структури, дифузійних процесів у зразках за допомогою електронно-мікроскопічних та спектральних методів дослідження, зокрема електронної мікроскопії, електронографії, вторинно-іонної мас-спектрометрії та оже-електронної спектроскопії.

Отримання зразків здійснювалося при температурі підкладки 300 K за допомогою термічного випаровування з резистивним(Cr) або електронно-променевим (Fe та Ni) нагріванням. Конденсація, термообробка і дослідження електрофізичних властивостей проводилося в робочому об'ємі вакуумної установки ВУП-5М при залишковому тиску газів $\sim 10^{-4}$ Па. Швидкість конденсації компонентів у наших експериментальних умовах визначалась як за кінцевою товщиною шару та часом конденсації, так і за даними кварцового резонатора під час конденсації. В умовах досліду для Ni швидкість конденсації складала 0,5-1,5 нм/с, для Cr – 1-3 нм/с а для Fe – 2 нм/с.

Щойно напилені плівки витримувалися у вакуумі протягом 30 хв. при $T_{\text{п}} \cong 300 \text{ K}$ з метою стабілізації їх властивостей. Плівкові зразки відпалювались в інтервалі температур 300-900K протягом кількох циклів зі швидкістю нагрівання-охолодження 2 K/хв. Контроль температури забезпечувався цифровим вольтметром VT-70В за допомогою хромель-алюмелевих термопар. Точність вимірювання складала $\pm 5\text{K}$. Вимірювання опору при електрофізичних дослідженнях здійснювалося універсальним авометром АРРА-109 що дозволило автоматизувати процеси вимірювання і забезпечити точність $\pm 1\%$.

Електронно-мікроскопічні та електроннографічні дослідження фазового складу та кристалічної структури проводилися за допомогою просвічуючих електронних мікроскопів ПЕМ-125К та ЕММА-4. Вивчення дифузійних процесів методом ВІМС у тонкоплівкових системах виконано на мас-спектрометрі МС-7201М. Під час дослідження здійснювався неперервний запис мас-спектра вторинних іонів плівкового зразка при розпорошуванні його пучком іонів аргону (Ar^+) з енергією 10 кеВ. Плівкові системи Fe/Cr та Cr/Fe для оже-спектрометричних досліджень формувалися при залишковому тиску 10^{-5}Па у спеціальній установці з оже-електронним спектрометром. Оже-спектр фіксувався при збільшенні товщини дискретно через кожні 0,5 нм, а також при відпалюванні дифузійних пар від 300 до 700 K протягом 1-6 годин. Час конденсації окремого шару склав 50-100 с. Високоточне вимірювання товщини здійснювалося також методом кварцового резонатора з використанням трьох вимірювальних кварців.

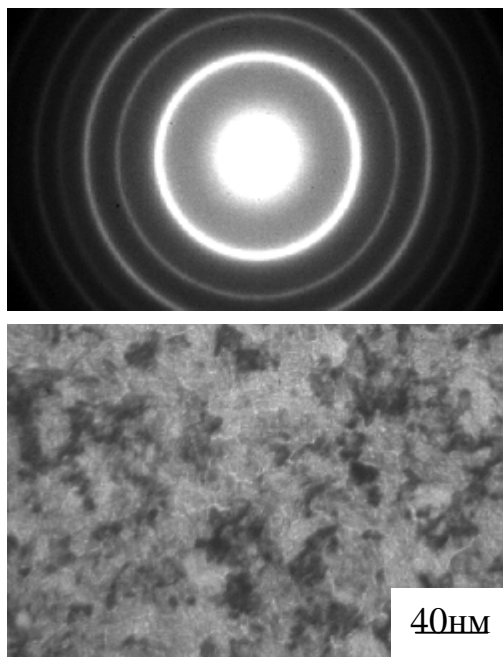
Третій розділ „Фазовий і елементний склад плівкових систем Ni/Fe і Cr/Fe”, в якому описано результати досліджень як фазового складу, так і дифузійних процесів, складається з двох підрозділів. У першому підрозділі наводяться результати вивчення фазового складу та кристалічної структури одно- та двошарових плівок на основі Ni і Fe та Cr і Fe, які пройшли термообробку в температурному інтервалі 300 – 1100 K та 300-700 K відповідно, що дозволило сформувати певний структурно-фазовий стан.

Дифракційні дослідження одношарових плівок Fe показали, що вони складаються із ОЦК $\alpha\text{-Fe}$ ($a = 0,288 \pm 0,001 \text{ нм}$) із слідами Fe_3O_4 . У невідпаленому стані при $T_{\text{п}} = 300\text{K}$ досліджені одношарові плівки Ni, Fe, Cr є дрібнодисперсними. Відпалювання прискорює рекристалізаційні процеси, активність яких залежить від матеріалу плівкових зразків. За даними електронно-мікроскопічних досліджень відпалювання до 800-900K призводить до збільшення середнього розміру зерна приблизно вдвічі для всіх досліджених плівок.

Таблиця 1
Розрахунок електронограми від відпаленої до 1173К плівки Ni/Fe

№	I, в.о.	d, нм	hkl	a, нм	Фазовий склад
1	сл.	0,298	220	0,842	Fe ₃ O ₄
2	д.сл.	0,254	331	0,842	Fe ₃ O ₄
3	д.сл.	0,222	-	-	Fe ₂ O ₃
4	д.сл.	0,217	-	-	FeO - ?
5	Д.С.	0,206	111	0,356	γ-(Fe,Ni)
6	сл.	0,201	110	0,284	α-Fe
7	д.сл.	0,182	-	-	Fe ₂ O ₃
8	ср.	0,177	220	0,354	γ-(Fe,Ni)
9	д.сл.	0,160	511	0,832	Fe ₃ O ₄
10	сл.	0,149	440	0,843	Fe ₃ O ₄
11	С.	0,126	220	0,356	γ-(Fe,Ni)
12	д.сл.	0,118	533	0,839	Fe ₃ O ₄
13	С.	0,108	311	0,358	γ-(Fe,Ni)
Д.С. - дуже сильна, С.- сильна, ср. - середня, сл. - слабка, д.сл. - дуже слабка				a=0,356 ± 0,002	γ-(Fe,Ni)

При відпалюванні зразків Ni/Fe до $T \cong 873$ К їх фазовий склад не змінюється: ГЦК-Ni + ОЦК-Fe + сліди Fe₃O₄. Суттєві зміни відбуваються при $T > 1000$ К (таблиця 1), коли починають утворюватися т.р.г-(Fe,Ni) з параметром решітки $a = 0,353-357$ нм і оксиди Fe₃O₄ і Fe₂O₃ у незначній кількості. Згідно цих даних у плівці Fe утворюється два із трьох оксидів, які мають місце у масивних зразках системи Fe-O: магнетит Fe₃O₄ та гематит Fe₂O₃, (утворюється при $T \approx 1730$ К у масивних зразках). Електронографічні дослідження (рис.1) двошарових плівок на основі Fe і Cr свідчать



Таблиця 2
Розшифровка дифракційної картини від плівкової системи Cr(30нм)/Fe(30нм)/П

№	I, в.о.	d, нм	hkl	a, нм	Фаза
1	Д.С.	0,205	110	0,289	т.р.(α-Fe,Cr)
2	ср.	0,145	200	0,290	-"
3	ср.	0,180	211	0,289	-"
4	д.сл.	0,102	220	0,288	-"
5	д.сл.	0,091	310	0,288	-"
6	д.сл.	0,077	321	0,289	-"
				a(α-Fe,Cr)=0,289 нм	

Рис.1 Електронограма та електронно-мікроскопічний знімок плівки Cr(30)/Fe(30)

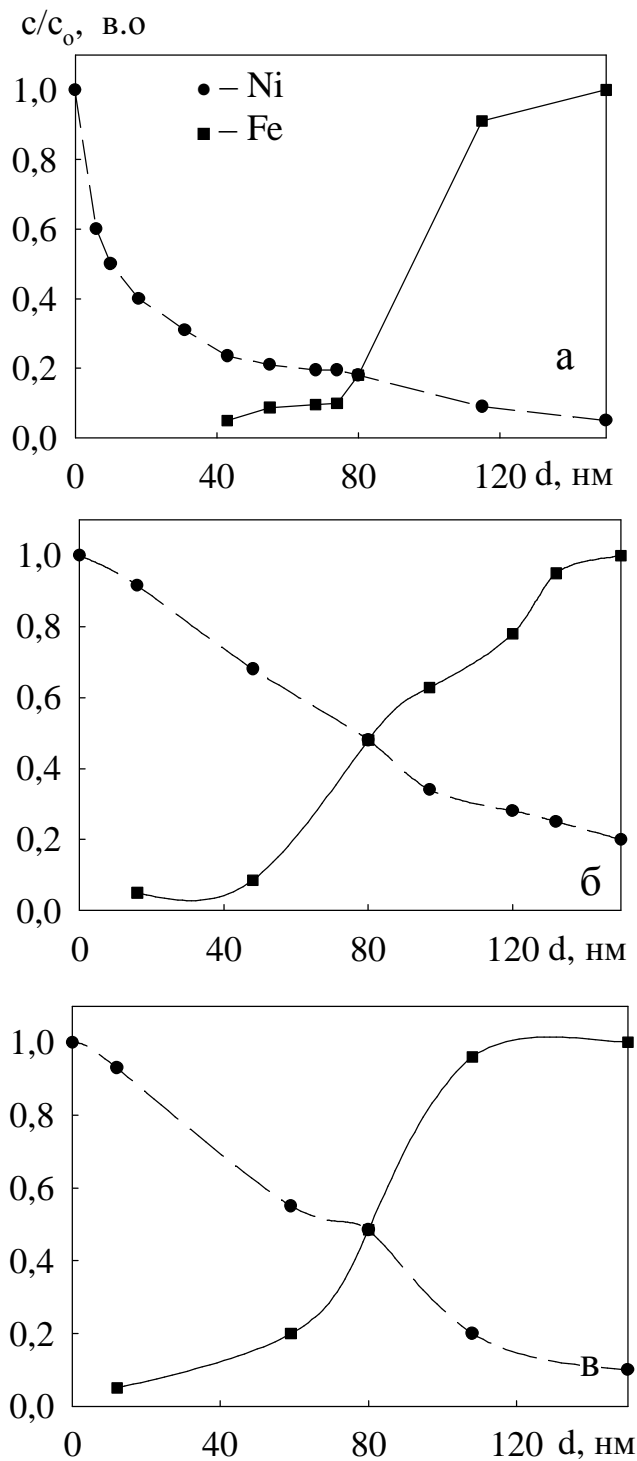


Рис.2 Дифузійні профілі плівкової системи Ni(80)/Fe(70)/П, відпаленої при температурах $T_{\text{в}}, \text{K}$: 300 (а); 573 (б); 1173 (в).

Результати дослідження дифузійних процесів плівкової системи Fe/Cr/П методом ВІМС показали, що у невідпаленому стані має місце досить значне взаємне проникнення атомів компонентів. Серед факторів, що призводять до такого результату, можна вказати конденсаційно-стимульовану дифузію (КСД) атомів Fe та підвищену дифузійну рухливість Cr по межах зерен. Тому взаємне проникнення атомів компонентів вже на стадії конденсації верхнього ша-

про формування ОЦК-структури (таблиця 2), хоча згідно діаграми стану Fe-Cr, концентраційно-температурні інтервали відповідають евтектичному стану. Причину утворення т.р. (α -Fe,Cr) ми пов'язуємо не з термодинамічними факторами (фазовий розмірний ефект), а з кінетичними умовами конденсації, коли осадження верхнього шару призводить до перегрівання плівкової системи і спричиняє утворення т.р. (α -Fe,Cr), який стабілізується навіть при кімнатній температурі.

Дослідження дифузійних процесів методом ВІМС у плівковій системі Ni/Fe/П дозволило отримати серію дифузійних профілів, від зразків відпалених при різних температурах. При збільшенні температури відпалювання взаємного проникнення атомів матеріалів окремих шарів і подальшого накопичення чужорідних атомів на зовнішніх поверхнях плівки не спостерігається, оскільки активність дифузійного перенесення атомів блокується через насиченість меж зерен при температурах вище 570K. Блокування масоперенесення призводить до того, що в плівках Ni/Fe частково зберігається індивідуальність шарів, оскільки основний об'єм двошарової плівкової системи має фазовий склад, який відповідає ГЦК т.р.(Ni,Fe).

ру призводить до утворення т.р. (α -Fe,Cr) в об'ємі двошарової плівки, що і підтверджують результати електронографічних досліджень фазового стану. Факторами, що сприяють утворенню т.р. при таких умовах являються дрібнодисперсність кристалітів, значна поверхня меж зерен та високі розтягуючі макронапруження.

Відпалювання даної системи при температурі $T_b=700\text{K}$ не призводить до подальшого проникнення атомів компонентів. Навпаки спостерігається деякий відтік атомів дифузанта в оберненому напрямку. Водночас може розпадатися частина т.р. що пояснено нами в рамках вакансійного механізму.

Отримані дані дозволяють побудувати схематично структуру двошарової плівки Ni/Fe/П і Cr/Fe/П із виділенням інтерфейсного прошарку(рис.3).

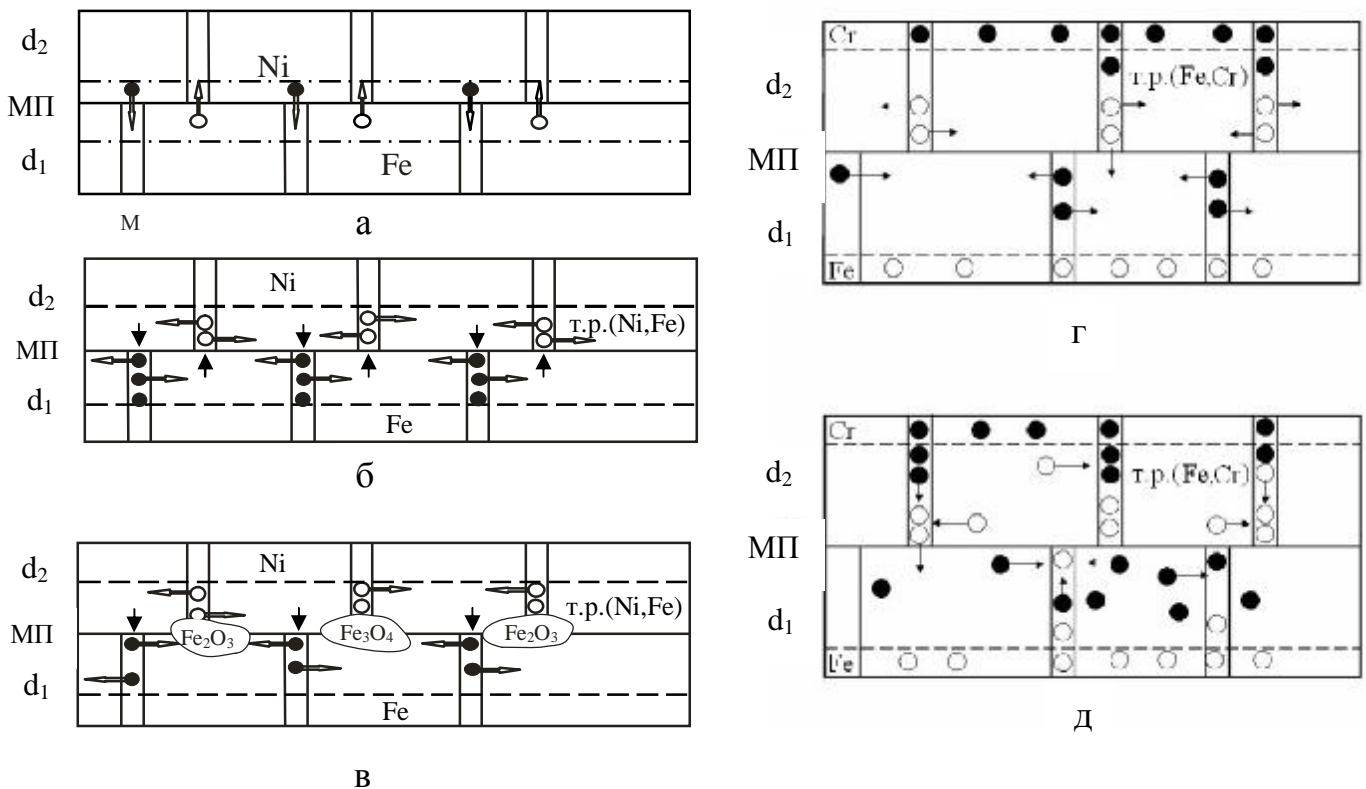


Рис.3. Схематичне зображення структури двошарової плівки Ni/Fe/Π при конденсації (а), при відпалюванні $T_b < 700\text{K}$ (б) і $T_b > 1000\text{K}$ (в) та Cr/Fe/Π при конденсації (г) ($T_n=400\text{K}$), відпалі до ($T_b=700\text{K}$) (д). МП- межа поділу шарів. Штрихпунктирною лінією показана зона проникнення при конденсації, штриховою – зона утворення твердих розчинів.

Експериментально отримані дифузійні профілі та розраховані залежності ефективних коефіцієнтів дифузії від температури дозволили записати рівняння дифузії для плівкової системи Ni/Fe:

$$D_{Ni \rightarrow Fe}(T) = (1,12 \pm 0,20) \cdot 10^{-19} \exp\left(-\frac{9531}{RT}\right)$$

$$D_{Fe \rightarrow Ni}(T) = (0,62 \pm 0,20) \cdot 10^{-19} \exp\left(-\frac{10432}{RT}\right),$$

де енергія активації дифузії вимірюється в Дж/моль.

Розрахункові значення ефективного коефіцієнта дифузії за співвідношенням Уіппла і даними ВІМС для системи Fe/Cr мають величину:

$$D_{Fe \rightarrow Cr} = 6,5 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}, \quad D_{Cr \rightarrow Fe} = 2,0 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Дані по глибині проникнення атомів при конденсації чи термодифузії не вільні від внеску пов'язаного з застосуванням методу ВІМС а саме іонно-стимульованої дифузії. Тому було проведено дослідження за допомогою неруйнівного методу. При цьому встановлено, що дифузійний пробіг l атомів нижнього шару плівки у верхній, або товщина при якій зникає оже-сигнал від атомів нижнього шару при нарощуванні верхнього має для дифузії Fe→Cr значення $l < 2,5$ нм, для Cr→Fe $l < 3$ нм при конденсаційно-стимульованій дифузії та для Fe→Cr $l > 1$ нм, Cr→Fe $l \sim 5$ нм при термостимульованій дифузії ($T_B = 673\text{K}$).

Ці дані дали можливість розрахувати коефіцієнти термодифузії у двошаровій плівковій системі на основі Fe і Cr:

$$D_{Cr \rightarrow Fe} > 0,004 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}, \quad D_{Fe \rightarrow Cr} > 0,02 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$$

та зробити порівняння внеску термодифузії, конденсаційно-стимульованої та іонно-стимульованої дифузії.

Дифузійні процеси, перебіг яких визначається структурою плівок і фазовим складом компонентів в умовах термічної обробки виступають вагомим фактором формування фазового складу як плівкових зразків, так і їх інтерфейсів і при відповідному підборі складових шарів плівкових систем можуть слугувати активними чинниками формування їх наперед заданих властивостей.

У четвертому розділі „Електрофізичні властивості плівкових систем на основі Ni, Cr та Fe” наводяться результати досліджень концентраційних, температурних та розмірних ефектів у питомому опорі та ТКО.

У першому підрозділі описано експериментальні результати про температурну залежність питомого опору і ТКО одношарових і двошарових плівок. На рис.4 представлена серія залежностей питомого опору від температури для двошарових плівок Ni/Fe. Характерною їх особливістю є на-

явність мінімумів при $T_1 \cong 600-620$ К (I термостабілізаційний цикл) або при $T_2 = 500-520$ К (II цикл). Встановлено, що перший мінімум спостерігається лише в тому випадку, коли $d_{Ni} < d_{Fe}$. Якщо товщини шарів приблизно однаков $d_{Ni} \cong d_{Fe}$, то спостерігається другий мінімум. У всіх випадках при третьому термостабілізаційному циклі мінімуми не спостерігаються а характерними на графіках є дві лінійних ділянки при $\Delta T_1 = 300-490$ К і $\Delta T_2 = 500-680$ К. Усі вказані особливості можуть бути пояснені проце-

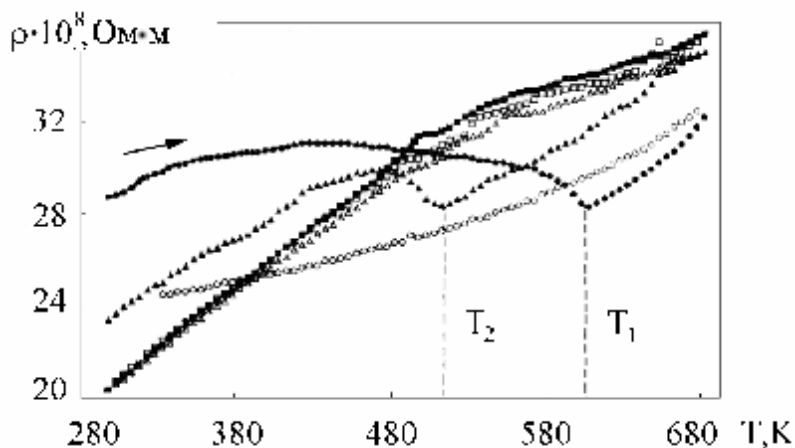


Рис.4. Температурні залежності ρ плівкової системи Ni(30)/Fe(30) при відпалі: ●, ○ - I цикл нагрівання та охолодження; ▲, Δ - II цикл нагрівання та охолодження; ■, □ - III цикл нагрівання та охолодження

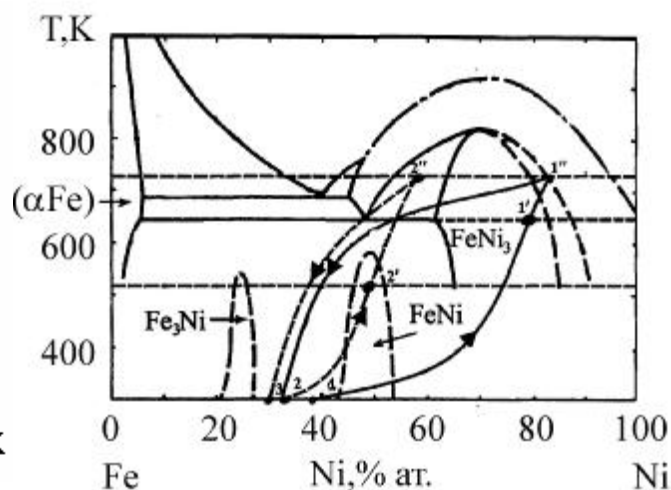


Рис.5. Схематичне зображення можливих температурно-концентраційних змін фазового складу двошарових плівок Ni/Fe/II: 1-1'-1''-2 і 2-2'-2''-2 – режими термообробки, при яких відбувається локальне утворення і розпад фаз FeNi₃ та FeNi

сами фазоутворення в плівковій системі. Так, в інтервалі температур поблизу T_1 в деяких локальних областях проміжного шару поблизу інтерфейсу реалізується в результаті дифузійних процесів таке співвідношення концентрацій атомів Ni та Fe, яке буде відповідати фазі FeNi₃, а при температурах близьких до T_2 - фазі FeNi (рис.5). У цьому випадку отримані результати можуть слугувати свідченням утворення і розпаду в результаті дифузійної активності впорядкованих фаз в системі Ni-Fe.

Типові розмірні залежності питомого опору і ТКО для двошарових плівкових систем Ni/Fe/II наведені на рисунку 6.

Відсутність аномалій на цих залежностях свідчить про те, що в наших умовах термостабілізації зразки за своєю структурою відповідають двошаровій системі, хоча згідно електронграфічних досліджень в них вже починає відбуватися перемішування. Таблиця 3 містить аналогічні експериме-

нтальні та розрахункові дані отримані для двошарової плівки Cr/Fe/П.

Характер розмірних залежностей ТКО досліджених систем при різних температурах вимірювання повністю відповідає сучасним уявленням про розмірні ефекти.

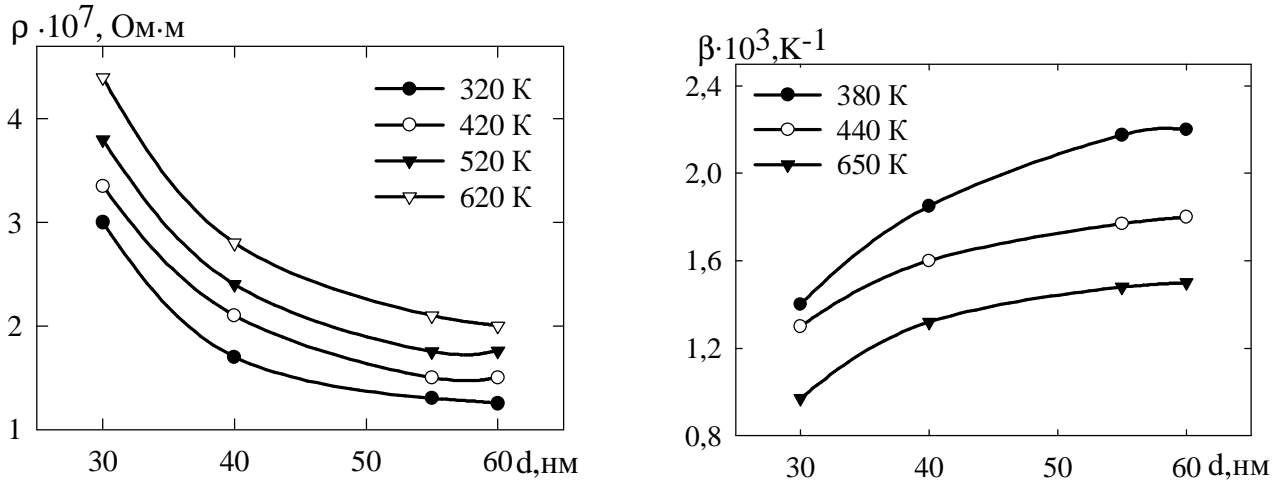


Рис.6. Розмірні залежності питомого опору (а) та термічного коефіцієнту пору (б) двошарової плівкової системи Ni/Fe(120) для різних температур нагріву

Таблиця 3

Електрофізичні властивості двошарових плівкових систем Cr/Fe

Зразок (нм)	Температура, К					
	300		400		700	
	$\rho \cdot 10^7$, Ом·м	$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹	$\rho \cdot 10^7$, Ом·м	$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹	$\rho \cdot 10^7$, Ом·м	$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹
Cr(10)/Fe(30)	4,33	0,40	4,48	0,35	4,98	0,33
Cr(30)/Fe(30)	4,30	0,42	4,44	0,30	4,83	0,21
Cr(60)/Fe(30)	2,45	0,24	2,56	0,26	2,76	0,26

У другому підрозділі наведено порівняння експериментальних та теоретичних співвідношень ТКО. Для систем в яких зберігається індивідуальність окремих шарів використано макроскопічну модель:

$$b \cong b_1 + b_2 - \frac{d_1 b_2 r_2 + d_2 b_1 r_1}{d_1 r_2 + d_2 r_1}. \quad (1)$$

Макроскопічна модель для випадку сплавоутворення дає такий вираз для ТКО:

$$b \cong \frac{b_1}{1 + \frac{c_2 r_2}{c_1 r_1}} + \frac{b_2}{1 + \frac{c_1 r_1}{c_2 r_2}}. \quad (2)$$

Скористаємсь також співвідношенням теорії Дімміха:

$$b = A_1 b_{\infty 1} \left(1 - \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln k_1} - \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln m_1} \right) + A_2 b_{\infty 2} \left(1 - \frac{\partial \ln F_2}{\partial \ln k_2} - \frac{\partial \ln F_2}{\partial \ln m_2} \right) \quad (3)$$

Про ступінь узгодження експериментальних та розрахункових даних можна робити висновок із таблиці 4.

Таблиця 4

Експериментальні та розрахункові значення ТКО для двошарових плівок на основі Ni і Fe та Cr і Fe

Зразок	$\beta_{\text{експ}} \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$	$\beta_{\text{розра}} \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$			$\frac{\beta_{\text{експ}} - \beta_{\text{розра}}}{\beta_{\text{експ}}}, \%$		
		Співвідношення					
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Ni(30)/Fe(120)/П	1,40	0,93	0,73	0,71	+34	+47	+49
Ni(40)/Fe(120)/П	1,51	1,05	0,83	0,77	+30	+45	+49
Ni(45)/Fe(120)/П	1,63	1,27	1,10	0,92	+21	+32	+44
Ni(55)/Fe(120)/П	1,81	1,36	1,18	1,12	+25	+35	+38
Cr(10)/Fe(30)/П	0,40	0,24	0,33	0,19	+40	+18	+52
Cr(30)/Fe(30)/П	0,42	0,35	0,39	0,51	+16	+7	-21
Cr(60)/Fe(30)/П	0,54	0,38	0,64	0,69	-29	+18	-28
Cr(70)/Fe(30)/П	0,56	0,68	0,40	0,72	-28	+20	-30

У третьому підрозділі встановлено межі застосування макроскопічної моделі та формули ТКО для сплавів для прогнозування властивостей плівкових систем, зокрема:

- для двошарових систем Ni/Fe у інтервалі температур 300-800К макроскопічна модель краще описує експериментальні результати (точність до 30%);
- у плівкових системах Cr/Fe краща відповідність встановлена для моделі сплавоутворення (точність до 20%).

Задовільна відповідність макроскопічній моделі системи Ni/Fe дозволяє не лише розрахувати залежність ТКО, а і прогнозувати фізичні властивості плівкових систем в залежності від товщини плівкових шарів (рис.7). Цей факт зумовлюють як відносно невеликий вплив межового шару, в якому утворюються тверді розчини на стадії конденсації, так і мала дифузійна активність шарів компонентів двошарової плівки Ni/Fe при термообробці.

У четвертому підрозділі наведено експериментальні результати опору в залежності від деформації $R(\varepsilon_i)$ та отримані розрахункові залежності $\Delta R/R$ та коефіцієнта поздовжньої тензочутливості g_l для двошарових плівок Cr/Fe(рис.8) та Ni/Fe .

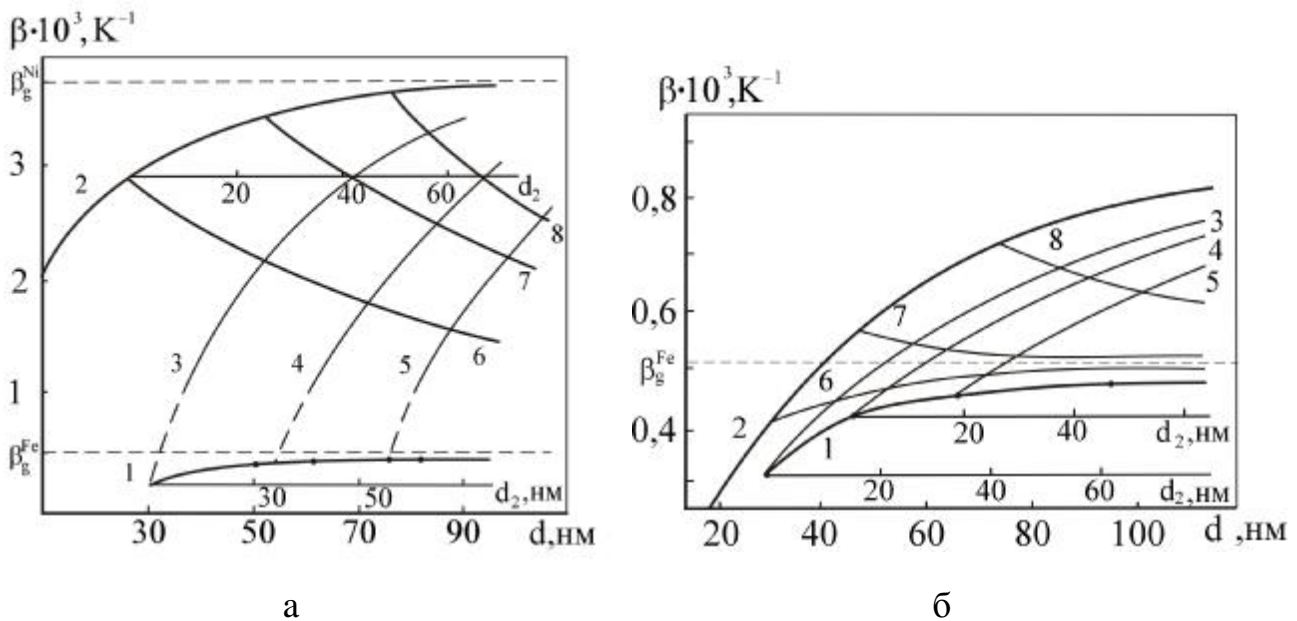


Рис.7. Залежність ТКО від товщини двошарових плівкових систем Ni/Fe/П (а) та Cr/Fe/П (б): 1,2 – експериментальні залежності $\beta(d)$ для одношарових плівок як складових системи; 3-8 – розрахункові залежності $\beta(d_2)$ при фіксованій товщині першого шару d

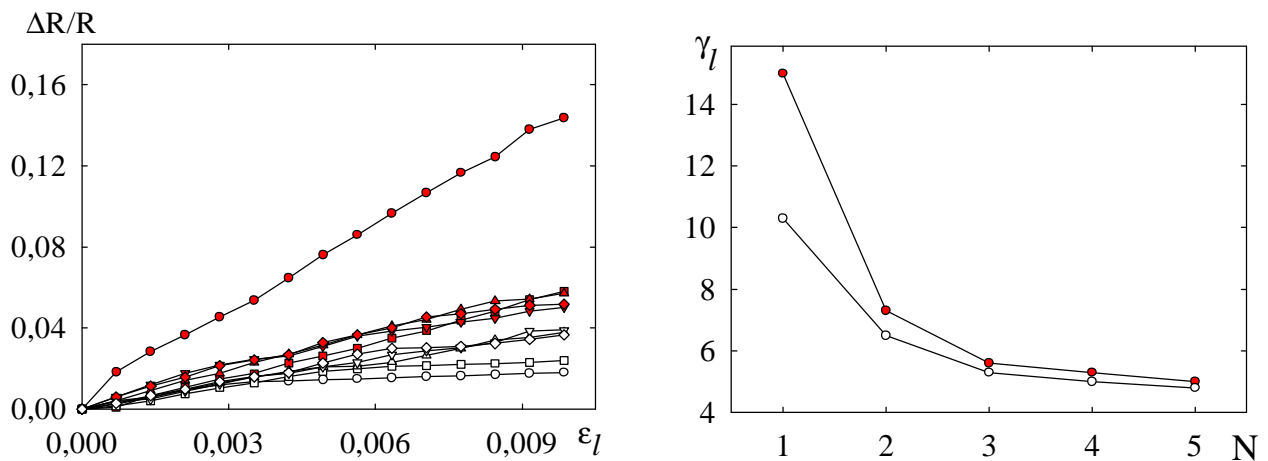


Рис.8. Розрахункові залежності $\Delta R/R$ та g_l (N -кількість деформаційних циклів) для двошарової плівки Cr(50)/Fe(50)

При апробації моделей тензочутливості встановлено, що макроскопічна модель:

$$g_l^r = \sum_{i=1}^n g_{li}^r - \frac{\sum_{i=1}^n d_i (g_{lk}^r + g_{lm}^r + \dots - m_{fi}) r_k r_m}{\sum_{i=1}^n d_i r_k r_m \dots} - \frac{\sum_{i=1}^n m_{fi} d_i}{\sum_{i=1}^n d_i}, \quad (4)$$

де g_l^r - коефіцієнт повздовжньої тензочутливості плівкової системи виражений через питомий опір,

g_{lk}^r - відповідні коефіцієнти складових плівкової системи.

яка ефективна для плівкових систем в яких зберігається шаруватість, відповідає експериментальним результатам для системи Ni/Fe з точністю 10% (таблиця 5).

Отримане нами співвідношення для коефіцієнта тензочутливості плівкового сплаву:

$$g_l^r \cong \frac{g_{l_1}^r}{1 + \frac{c_2 r_2}{c_1 r_1}} + \frac{g_{l_2}^r}{1 + \frac{c_1 r_1}{c_2 r_2}}, \quad (5)$$

де $c_{1,2}$ - концентрації складових;

задовільно кількісно відповідає експериментальним даним для всіх досліджених плівкових систем.. Для системи Cr/Fe розрахунок за моделлю сплавоутворення дає більш ефективний прогноз (з точністю до 17%), причому точність збільшується при зростанні товщини плівкової системи.

Таблиця 5

Порівняння експериментальних та розрахункових значень коефіцієнта повздовжньої тензочутливості для двошарових плівок

Плівка (d, нм)	$g_{\text{експ.}}$	Розрахункові значення g_l			
		співвідн. (4)	$\frac{g_{\text{експ}} - g_{\text{розн}}}{g_{\text{експ}}}, \%$	співвідн. (5)	$\frac{g_{\text{експ}} - g_{\text{розн}}}{g_{\text{експ}}}, \%$
Ni (55)/ Fe (20)	5,1	5,4	+6	3,0	-41
Ni (30)/ Fe (50)	4,0	4,4	+10	2,9	-26
Cr (20)/ Fe (50)	5,0	3,5	+31	4,1	-17
Cr (50)/ Fe (50)	4,5	2,9	-36	3,8	-15
Cr (70)/ Fe (50)	4,3	2,6	-41	3,6	-14

У висновках подано перелік та стислу характеристику основних результатів роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі проведених досліджень кристалічної структури і дифузійних процесів методами електронної мікроскопії, вто-

ринно-іонної мас-спектрометрії та оже-спектрометрії і досліджень електрофізичних властивостей встановлена можливість формування заданого фазового складу, а також залежність між структурно-фазовим складом двошарових плівкових систем на основі Fe та Ni і Cr та їх електрофізичними характеристиками.

Результати досліджень формулюються таким чином:

1. Формування заданого структурно-фазового складу в двошарових плівках Ni/Fe та Cr/Fe можливе шляхом зміни режимів термічної обробки та варіації товщин складових двошарової плівкової системи:

- плівкова система Ni/Fe при температурі відпалювання $T_B < 1000\text{K}$ має такий фазовий склад ГЦК-Ni + ОЦК-Fe+Fe₂O₃;

- при $T_B > 1000\text{K}$ зафіксовано утворення т.р. γ -(α -Fe,Ni) і встановлено, що плівкова система Ni/Fe може бути представлена у вигляді тришарового зразка із шарів ГЦК-Ni, проміжного шару твердого розчину γ -(α -Fe,Ni), утвореного за рахунок дифузії та шару ОЦК-Fe; високотемпературне відпалювання не руйнує шаруватість системи через утворення на межі поділу оксидних бар'єрів Fe₂O₃ та Fe₃O₄;

- фазоутворення у плівковій системі Ni/Fe відбувається не в повній відповідності з діаграмою стану; концентраційна неоднорідність у інтерфейсному шарі двошарової плівкової системи і умови термічного впливу створюють передумови для утворення і розпаду фаз FeNi₃ та FeNi, наявність яких підтверджується електрофізичними дослідженнями;

- двошарова плівкова система Cr/Fe при відпалі ($T_B < 700\text{K}$) зберігає незмінним фазовий склад (т.р. γ -(α -Fe,Cr), який утворюється в інтерфейсному шарі вже на стадії конденсації.

2. Проведено порівняння внесків конденсаційно-стимульованої дифузії, іонно-стимульованої (викликаної первинними іонами при застосуванні методу ВІМС) а також термостимульованої дифузії при відпалі та встановлено, що конденсаційно-стимульована дифузія має визначальний вплив у порівнянні із термостимульованою дифузією в системах Ni/Fe і особливо Cr/Fe. Відмінність коефіцієнта дифузії сягає порядку. Визначено дифузійний пробіг атомів при конденсаційно-стимульованій дифузії $l_{\text{Fe} \rightarrow \text{Cr}} = 2,5$ нм і $l_{\text{Cr} \rightarrow \text{Fe}} = 3$ нм та $l_{\text{Fe} \rightarrow \text{Cr}} = 1$ нм і $l_{\text{Cr} \rightarrow \text{Fe}} = 5$ нм при термодифузії ($T_B = 673\text{K}$).

3. Вперше розраховані параметри дифузії та записані рівняння дифузії для двошарової тонкоплівкової системи Ni/Fe :

$$D_{\text{Ni} \rightarrow \text{Fe}}(T) = (1,12 \pm 0,20) \cdot 10^{-19} \exp(-9531/RT),$$

$$D_{\text{Fe} \rightarrow \text{Ni}}(T) = (0,62 \pm 0,20) \cdot 10^{-19} \exp(-10432/RT)$$

та визначені ефективні коефіцієнти дифузії для двошарової системи Cr/Fe:

$$D_{\text{Fe} \rightarrow \text{Cr}} = 6,5 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}, \quad D_{\text{Cr} \rightarrow \text{Fe}} = 2,0 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}.$$

4. Установлені зв'язки між впливом температури на ρ і ТКО з одного боку та фазовими перетвореннями в плівкових системах на основі Ni, Cr та Fe з іншого боку.

5. Встановлено, що застосування макроскопічної моделі і моделі плівкових сплавів ТКО у певних діапазонах товщин плівкової системи задовільно описує отримані на основі експериментальних результатів розмірні залежності ТКО. Це може бути пояснено такими особливостями структурно-фазового стану:

- для плівок Ni/Fe більш ефективна макроскопічна модель завдяки вираженій шаруватості структури;

- для плівкової системи Cr/Fe співвідношення для ТКО плівкових сплавів краще відповідає експериментальним результатам оскільки т.р. займає майже весь об'єм тонкої плівки.

6. Розраховані залежності для прогнозування ТКО двошарових плівкових систем на основі Ni/Fe, Cr/Fe.

7. Вперше вивчено тензорезистивний ефект у двошарових плівках Ni/Fe і Cr/Fe, апробовано теоретичні моделі тензочутливості та встановлено, що задовільна ефективність прогнозу зумовлена вибором моделі, яка відповідає реальному структурно-фазовому складу плівкової системи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фазоутворення та дифузійні процеси у плівковій системі на основі Ni та Fe/ В.В.Бібік, С.І.Проценко, А.І.Салтикова, В.О.Яременко//Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка.-2002.-№5(38)-6(39).-С.66-71.
2. Бібік В.В., Гричановська Т.М., Проценко І.Ю. Електрофізичні властивості плівкових систем на основі Ni та Fe// *Металлофиз. новейшие технол.*-2005.- Т.27, № 6.- С.775-784.
3. Дифузійні процеси в нанокристалічних двошарових плівкових системах на основі металів / В.В.Бібік, Т.М.Гричановська, М.Маршалек, О.Б.Проценко, С.І.Проценко// *Металлофиз. новейшие технол.* – 2006. – Т.28, №6. – С.707 - 715.
- 4.Магнітотранспортні терморезистивні властивості багатошарових плівкових матеріалів на основі Fe і Cr (огляд)/ В.В.Бібік, Л.І.Однорець, Н.І.Шумакова, С.І.Проценко // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка.-2006.-№6.-С.47-56.
5. Бібік В.В., Однорець Л.В., Шпетний І.О. Дослідження методом ВІМС взаємної дифузії атомів у тонкоплівковій системі Cr/Fe // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка.-2006.-№9.-С.91-95.
6. Фазообразование и электрофизические свойства двух- и трехслойных пленок на основе переходных и благородных металлов / В.В.Бибик,

- Т.М.Гричановская, Л.В.Одноворец, И.В.Чешко, И.Е.Проценко//Тонкие пленки в оптике и нанoeлектронике.- Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006.-Т.2.- С.95-106.
7. Тензорезистивні властивості багатошарових плівок Ni/V, Ni/Ti та Cr/Fe / В.В.Бібик, Т.М.Гричановська, Д.П.Дудецький, Л.В.Одноворець, І.Ю.Проценко // Тонкие пленки.- Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007.- Т.2. – С.108-119.
 8. Особливості дифузійних процесів в двошарових плівкових системах / В.В.Бібик, С.І.Проценко, А.М.Чорноус, І.О.Шпетний // Матеріали ІХ Міжнародної конференції "Фізика і технологія тонких плівок".- Івано-Франківськ: ПрУ, 2003.- С.153.
 9. Бібик В., Проценко С., Шпетний І. Особливості температурної залежності опору двошарових плівкових систем // Збірник тез Всеукраїнської конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "ЕВРИКА-2003".- ЛНУ, Львів, 2003.- С.17.
 10. Бібик В., Дехтярук А., Проценко С. Конденсаційно-стимульована і термодифузія в наноплівкових системах на основі Cr і Cu та Cr і Fe // Збірник тез Міжнародної конференції "ЕВРИКА-2004".- ЛНУ, Львів, 2004.- С.265.
 11. Фазоутворення і дифузійні процеси у плівкових матеріалах на основі Ni і Fe, Cu і Co та Cr і Fe / В.В.Бібик, С.І.Проценко, І.В.Чешко, Н.І.Шумакова // Тези доповідей на першій науковій конференції з міжнародною участю "Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології".- Кременчук: ІЕНТ, 2004.- С.100-101.
 12. Диффузионные процессы в нанопленочных системах на основе Cr и Cu и Cr и Fe / В.В.Бибик, Л.В.Дехтярук, С.И.Проценко, А.Н.Чорноус // Материалы V Международной конференции "Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении".- Воронеж: ВПУ, 2004.- Т.1.- С.163-164.
 13. Особенности диффузионных процессов в нанокристаллических пленочных системах / В.В.Бибик, М.Маршалек, Е.Б.Проценко, С.И.Проценко// Матеріали 7-ої Міжнародної конференції "Фізичні явища в твердих тілах".- Харків: ХНУ ім.В.Н.Каразіна, 2005.- С.62.
 14. Бібик В.В., Маршалек М., Проценко С.І. Магніторезистивні і електрофізичні властивості багатошарових плівкових систем Fe/Cr// Збірник тез Міжнародної конференції "ЕВРИКА-2006" .- ЛНУ, Львів, 2006.- С.А40.
 15. Бібик В.В., Проценко С.І. Електрофізичні і магнітотранспортні властивості плівкових систем на основі Fe і Cr // Тези науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фізико-технічного факультету, присвяченої Дню науки в Україні.- Суми: СумДУ, 2006.- С.17.

АНОТАЦІЯ

Бібік В.В. Формування фазового складу та електрофізичних властивостей плівкових систем Ni/Fe та Cr/Fe.-Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізикоматематичних наук за спеціальністю 01.04.07-фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2008.

Дисертація присвячена встановленню закономірностей формування структурно-фазового складу і електрофізичних властивостей двошарових плівок Ni/Fe та Cr/Fe. Комплексне дослідження фазового складу, кристалічної структури і дифузійних процесів показало, що фазовий склад шарів плівкової системи та інтерфейсного шару, який утворюється при формуванні плівкової системи, має визначальне значення у формуванні електрофізичних властивостей зразка.

Встановлено, що фазоутворення у плівковій системі Ni/Fe відбувається не в повній відповідності з діаграмою стану. Концентраційна неоднорідність двошарової плівкової системи і термічний вплив спричиняють створюють формування і розпад фаз FeNi₃ та FeNi, наявність яких підтверджується електрофізичними дослідженнями.

Отримано рівняння дифузії для двошарової плівкової системи Ni/Fe та розраховано ефективні коефіцієнти взаємної дифузії для системи Cr/Fe у процесі зерномежової конденсаційно-стимульованої і термодифузії.

Проведено порівняння внеску конденсаційно-стимульованої дифузії, іонно-стимульованої, викликаного первинними іонами, та термостимульованої дифузії при відпалі та встановлено, що конденсаційно-стимульована дифузія має на порядок більший вплив у порівнянні із термостимульованою дифузією в системах Ni/Fe і особливо Cr/Fe.

Проведено апробацію теоретичних моделей термічного коефіцієнта опору та коефіцієнта поздовжньої тензочутливості двошарових плівок. Порівняння експериментальних значень із розрахунковими в рамках теоретичних моделей для двошарових плівок, в яких зберігається індивідуальність шарів та співвідношення для сплавів показало, що існує зв'язок як величини ТКО, так і коефіцієнтів тензочутливості зі структурно-фазовим складом плівкових систем.

Отримані дані дали можливість розрахувати залежності для прогнозування ТКО двошарових плівкових систем на основі Ni, Cr і Fe.

Ключові слова: фазоутворення, двошарові плівки, дифузійні процеси, електрофізичні властивості, температурний коефіцієнт опору, коефіцієнт поздовжньої тензочутливості.

АННОТАЦИЯ

Бибик В.В. Формирование фазового состава и электрофизических свойств пленочных систем Ni/Fe и Cr/Fe.-Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07-физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2008.

Диссертация посвящена определению закономерностей формирования структурно-фазового состава и электрофизических свойств двухслойных пленок Ni/Fe и Cr/Fe . Комплексное исследование фазового состава, кристаллической структуры и диффузионных процессов показало, что фазовый состав слоев пленочной системы и интерфейсного слоя, который образуется при формировании пленочной системы, имеет определяющее значение в формировании электрофизических свойств образца.

Формирование структурно-фазового состава в двухслойных пленках Ni/Fe и Cr/Fe возможно путем изменения режимов термической обработки и вариации толщин компонент двухслойной пленочной системы:

- пленочная система Ni/Fe при $T_{отж} < 1000\text{K}$ состоит из ГЦК-Ni + ОЦК-Fe+Fe₂O₃;
- при $T_{отж} > 1000\text{K}$ зафиксировано образование т.р. γ -(α -Fe,Ni) и установлено, что пленочная система Ni/Fe может быть представлена в виде трехслойного образца из слоев ГЦК-Ni, промежуточного слоя твердого раствора γ -(α -Fe,Ni), образованного за счет диффузии и слоя ОЦК-Fe; высокотемпературный отжиг не разрушает слоистость системы из-за образования на межслойной границе барьеров из оксидов Fe₂O₃ и Fe₃O₄;
- в двухслойной пленочной системе Cr/Fe при $T_{отж} < 700\text{K}$ сохраняется неизменным фазовый состав (т.р. γ -(α -Fe,Cr), который образуется в интерфейсном слое уже на стадии конденсации.

Установлено также, что фазообразование в пленочной системе Ni/Fe происходит не в полном соответствии с диаграммой состояния. Концентрационная неоднородность двухслойной пленочной системы и условия термического воздействия создают условия для локального образования и распада фаз FeNi₃ или FeNi, наличие которых подтверждается электрофизическими исследованиями.

Экспериментальные данные, полученные методом вторично-ионной масс-спектрометрии, позволили рассчитать на основе соотношения Уиппла и записать уравнения диффузии для двухслойной системы Ni/Fe :

$$D_{\text{Ni} \rightarrow \text{Fe}}(T) = (1,12 \pm 0,20) \cdot 10^{-19} \exp(-9531/RT),$$

$$D_{\text{Fe} \rightarrow \text{Ni}}(T) = (0,62 \pm 0,20) \cdot 10^{-19} \exp(-10432/RT)$$

а также определить эффективные коэффициенты взаимной диффузии для системы Cr/Fe:

$$D_{\text{Fe} \rightarrow \text{Cr}} = 6,5 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}, \quad D_{\text{Cr} \rightarrow \text{Fe}} = 2,0 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Использование данных полученных методом оже-спектрометрии позволило провести сравнение вклада конденсационно-стимулированной диффузии, ионно-стимулированной (вызванной используемым методом ВИМС) и термостимулированной диффузии при отжиге и установить, что конденсационно-стимулированная диффузия имеет на порядок большее влияние в сравнении с термодиффузией в системах Ni/Fe и особенно Cr/Fe.

Полученное нами соотношение для коэффициента тензочувствительности пленочного сплава и апробация теоретических моделей термического коэффициента сопротивления и коэффициента продольной тензочувствительности двухслойных пленок позволили провести сравнение экспериментальных значений с расчетными в рамках теоретических моделей как для двухслойных пленок в которых сохраняется индивидуальность слоев, так и для соотношения для сплавов. Показано, что структурно-фазовый состав пленочных систем является определяющим для выбора модели, позволяющей рассчитать как величины ТКО так и коэффициенты продольной тензочувствительности.

На основе полученных данных рассчитана зависимость для прогнозирования ТКО двухслойных пленочных систем на основе Ni, Cr и Fe.

Ключевые слова: фазообразование, двухслойные пленки, диффузионные процессы, электрофизические свойства, температурный коэффициент сопротивления, коэффициент продольной тензочувствительности.

THE SUMMARY

Bibyk V.V. Formation of phase structure and electro-physical properties of film systems Ni/Fe and Cr/Fe. - Manuscript.

Thesis for the scientific degree of a candidate of physical and mathematical science by specialty 01.04.07 – physics of solid state.

Sumy State University, Sumy, 2008.

The thesis is devoted to ascertaining /establishing/ regularity of phase structure and electro-physical properties of double-layer films Ni/Fe and Cr/Fe. Complex researches of phase composition, crystalline structure and diffusion processes have shown that the phase structure of film system components and the interface layer obtained during the film system formation is of dominant significance in the formation of electro-physical properties of the sample.

It is obtained that the phase formation in the film system Ni/Fe doesn't occur in the complete accordance with the state diagram. Concentration /non-uniformity/ irregularity of the two-layer film system and the thermal influence result in conditions for phases FeNi_3 and FeNi the presence of which is corroborated by electro-physical research to form and to disintegrate. Equation of the diffusion for the double-layer system Ni/Fe is written and calculations of effective factors of interdiffusion for the system Cr/Fe in the process of grain borderland condensation stimulated and thermal diffusion on the basis of Whipple ratio and according to the Auger spectrometry are carried out.

Comparison of contribution of condensation stimulated diffusion and ion stimulated and thermo-stimulated diffusion through annealing is carried out, and it is ascertained that the condensation- stimulated diffusion has dominant effect in comparison with the thermo-stimulated diffusion in the systems Ni/Fe and especially Cr/Fe. The difference is about one dimension.

Approbation of theoretical samples of thermal coefficient of resistance and coefficient of longitudinal gauge of two-layer films is carried out.

Comparison of experimental values with the calculated ones in the frame of theoretical samples for the double-layer films maintaining individuality of layers and the correlations for alloys has shown that there is correlation of both TCR datum and gauge factor and phase structure of film systems.

On the basis of the obtained results calculations of correlations /relations/ for forecasting electro-physical properties of two-layer film systems on the basis Ni, Cr and Fe are carried out.

Key words: phase formation, two-layer, diffusion processes, electro-physical properties, thermal coefficient of resistance, longitudinal strain coefficient.

Підп. до друку __.__.200_.
Наклад 100 прим.

Формат 60×84/16
Замовлення №

Ум. друк. арк. 0,7
Обл. - вид. арк. 0,6

Вид-во СумДУ. Свідоцтво ДК № 2365 від 08.12.2005р.
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

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