

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ КРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ
Центр заочної та дистанційної форми навчання

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ТЕНЗО- ТА ТЕРМОМЕТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ
ПЛІВОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛІВ**

Студент гр. ЕП₃-61_к

А.О. Фесенко

Науковий керівник,
к.ф.-м.н., ст. викл.

І.П.Бурик

Нормоконтроль,
к.т.н., ст. викл.

О.Д.Динник

Конотоп 2020 рік

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ПЛІВОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛІВ	5
1.1 Тензорезистивні властивості	5
1.2 Терморезистивні властивості	11
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	14
2.1 Обладнання для отримання та дослідження плівкових матеріалів..	14
2.2 Методика дослідження тензочутливості	18
2.3 Електронно-мікроскопічні методи дослідження	19
2.4 ІЧ-методи дослідження плівкових матеріалів	21
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	24
3.1 Тензо- та терморезистивні властивості гетерогенних плівкових матеріалів на основі α -Mo і Fe	24
3.2 ІЧ-спектрометрія фазового складу гетерогенних плівок.....	26
ВИСНОВОК	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31
ДОДАТОК А	35

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є тензорезистивні та термометричні властивості та структурно-фазовий склад гетерогенних плівок тугоплавких металів.

Мета роботи полягає у вивченні тензорезистивних та термометричних властивостей гетерогенних структур при різних температурах відпалювання, їх призначенні і області використання.

При виконанні роботи проведено аналіз існуючих приладів і методів отримання плівкових матеріалів, застосування гетерогенних плівок, їх електрофізичні властивості.

У результаті проведеного аналізу, встановлено, що кристалічна структура і фазовий склад двошарових систем Fe/a-Mo після відпалювання до 800 К показали, що відбувається утворення плівок гетерогенного складу ОЦК-Mo + Fe₃O₄ + Fe₂O₃. Встановлено, що найвище значення чутливості спостерігається у гетерогенних плівок, хоча їх великий питомий опір призводить до суттєвого зменшення величини коефіцієнта тензочутливості.

Робота складається із вступу, трьох розділів основної частини та висновків. В першому розділі наведено огляд основних електрофізичних характеристик та особливостей формування гетерогенних плівок тугоплавких металів. В другому розділі дається стислий аналіз методів отримання та дослідження таких матеріалів. В третьому розділі розглянуто структурно-фазовий склад та електрофізичні властивості гетерогенних плівкових структур на основі Fe і a-Mo. Робота викладена на 34 сторінках, у тому числі включає 15 рисунків, 5 таблиць, список цитованої літератури із 31 джерела.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГЕТЕРОГЕННІ ПЛІВКИ, ТУГОПЛАВКІ МЕТАЛИ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ, ПРОСВІЧУЮЧА ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ, ІЧ-СПЕКТРОСКОПІЯ.

ВСТУП

Широке практичне використання плівкових матеріалів з однієї сторони та інтерес з точки зору фундаментальної науки з іншої стимулює активні дослідження, один з напрямків якого пов'язаний з електронними процесами розсіювання на зовнішніх та внутрішніх межах. Незважаючи на великий обсяг проробленої у цьому напрямку роботи залишаються ряд проблем, які ще потребують або додаткових досліджень, або систематизації і узагальнення існуючих результатів. До таких питань можна віднести пов'язане з розмірними ефектами у електрофізичних властивостях (питомий опір температурний коефіцієнт опору (ТКО)) плівок Мо, вивченню яких присвячено ряд робіт [1-11]. Аналіз літературних даних показав, що завдяки високій температурній стійкості гетерогенні плівкові матеріали на основі тугоплавких металів можна використовувати для створення пасивних елементів інтегральних мікросхем (ІМС) на величину контактного опору та робочих характеристик приладу, а також в багатьох інших областях сучасного приладобудування. Одношарові гетерогенні плівки в багатьох випадках можуть замінити багатошарові системи, оскільки вони мають ряд особливостей: стабільність тензо- та терморезистивних робочих характеристик чутливих елементів сенсорів в умовах підвищених температур.

Сучасні світові тенденції досліджень структури та електрофізичних властивостей (ТКО, питомий опір, коефіцієнт тензочутливості (КТ)) плівкових зразків полягають у комплексному підході [1] до їх вивчення. У зв'язку з високою функціональністю вони широко застосовуються при створенні терморезисторів, тензодатчиків, надрешіток та ін. Плівкові матеріали повинні мати термічну стійкість структурно-фазового складу [1-5] та стабільні характеристики у робочому діапазоні температур, деформацій, тощо.

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ПЛІВОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛІВ

1.1. Тензорезистивні властивості

Тензорезистивний метод – встановлення залежності електричного опору від величини повздовжньої, поперечної та інших видів деформації – є одним з найбільш поширених для вимірювання напружено-деформованого стану твердих тіл [6]. Коли напрямок протікання електричного струму співпадає (протилежний) з напрямком деформації, кількісною характеристикою тензорезистивного ефекту є коефіцієнт повздовжньої тензочутливості (γ_l), величина якого залежить від зміни геометричних розмірів (довжини і поперечного перетину) і питомого опору чутливого елемента тензодатчика[1]:

$$R = \rho \frac{l}{ad}, \quad \ln R = \ln \rho + \ln l - \ln a - \ln d,$$

$$\gamma_l = \frac{d \ln R}{d \varepsilon_l} = \frac{d \ln \rho}{d \varepsilon_l} + 1 + 2\mu_f = \gamma_l^\rho + 1 + 2\mu_f, \quad (1.1)$$

де R, ρ, l, a – електроопір, питомий опір, довжина і ширина зразка;

$$d \varepsilon_l = d \ln l \cong \frac{dl}{l} \text{ – повздовжня деформація;}$$

$$\mu = -\frac{d \ln a}{d \ln l} \cong -\frac{d \ln d}{d \ln l} \text{ – коефіцієнт Пуассона;}$$

γ_l^ρ - КТ виражений через питомий опір.

В даному випадку, вектори густини електричного струму та розтягуючих (стискаючих) сил співпадають (протилежні) за напрямком. Якщо вони перпендикулярні, тоді кількісною характеристикою тензоефекту виступає

коефіцієнт поперечної тензочутливості (γ_t). Легко отримати, що величини γ_t і γ_c відрізняються з точністю до $(2\mu_f+1)$ і (-1) відповідно.

Електричні сенсори деформації, розроблені Є.Сіммонсом і Л.Руже (1938 р.), сьогодні технічно вдосконалені і доступні в різних варіантах виконання. Не дивлячись на розвинуту сучасною промисловістю (Vishay, НВМ, ZEMIC, Kyowa, Uticell і ін.) практику виготовлення тензодатчиків, актуальним залишається їх застосування при підвищених температурах [1]. У зв'язку з цим в полі зору дослідників постійно знаходиться тензочутливість плівок тугоплавких металів як компонент багат шарових структур, або їх оксидів, карбідів, нітридів та інших сполук. Як кандидати на високотемпературні тензорезистори розглядаються товсті плівки на основі Pt-W [2], Pd_{0,87}Cr_{0,13} [3], In, RuO₂ + скло і WO₃+RuO₂+скло [4], RuO₂, рутенитів (Bi₂Ru₂O₇ або Pb₂Ru₂O_{6,5}), або їх суміші [1], TiB₂, TiSi₂, TaSi₂, WSi₂ [1] та інші. Дослідження тензочутливості дисперсних плівок Мо [5] показало принципову можливість їх застосування як чутливих елементів термостабільних тензодатчиків.

Однак, згідно аналізу сучасних літературних даних [1-13], останніми роками спостерігається підвищення інтересу до гетерогенних плівок на основі тугоплавких металів як до термічно стійких нанокристалічних матеріалів. Як приклад розглянемо застосування гетерогенних плівок Мо. Відомо, що основним руйнівником інтерфейсів в багат шарових структурах є зерномежова дифузія, яка може бути зменшена або шляхом заповнення меж зерен домішковими атомами, або формуванням бар'єрів на основі аморфних фаз. [1-5],

Авторами [7] відзначено, що застосування нітридів, карбідів, оксидів і т.п. полікристалічних або аморфних плівок тугоплавких металів дозволяє збільшити термостабільність дифузійних бар'єрів, встановлено, що структура Cu(500)/Mo₂C(50)/P-Si є стійкою до 973 К і запобігає дифузії міді в кремнії. У своїй роботі авторами [8] розглянуте питання про створення дифузійних

бар'єрів на основі аморфних та квазіаморфних сплавів Ni-Mo-P (товщиною 15-20 нм), показано залежність опору і структури Cu/Ni-Mo-P/Si від рівня кислотності (рН) електроліту, та встановлено їх термостійкість до 923 К упродовж 1 години. Як кандидати для створення термостійких бар'єрів також розглядаються плівки MoSi₂/Ni [9].

На основі власних результатів досліджень оптичних властивостей мультишарів [Mo(d)/Si(5)]₄₀ (d – товщина плівкового шару) в своїй роботі автори [10] встановили, що товщина проміжного шару для невідпалених структур складає близько 0,8-0,9 нм, в межах експериментальної похибки ($\pm 0,2$ нм), а зміна показника заломлення для рентгенівських променів (0,154 нм) пов'язана з переходом плівок Мо від аморфної (d ≈ 2 нм) до кристалічної (d ≈ 3 нм) фази. Поряд з цим, ними відмічається ефективність даного методу для контролю стабільності інтерфейсів в багатошарових плівках в часі чи під дією температур. Після проведення досліджень мультишарів Mo/Si було встановлено сильну залежність стабільності їх будови від структурного стану Мо.

Не менш цікавим є застосування тензодатчиків в умовах накладання зовнішніх магнітних полів [11], або в області пластичних деформацій [12,13].

Відомо, що завдяки високій тензочутливості більшу кількість чутливих елементів тензодатчиків виготовляють на основі напівпровідників [13-18]. Проте, на чутливість останніх сильно впливає температурний режим роботи тензодатчика. Для реалізації схемних методів термокомпенсації дрейфу нуля або чутливості [13] необхідне використання додаткових електронних елементів, що значно збільшує габарити сенсора. З такої точки зору чутливі елементи тензодатчиків на основі плівок тугоплавких металів та їх оксидів, карбідів, нітридів [19] мають беззаперечну перевагу.

Проаналізуємо деформаційні залежності електроопору для плівок Мо та Fe на тефлоні в інтервалі відносних деформацій $\Delta\varepsilon_1 = (0-1)\%$, приклади яких наведені на рис.1.1.

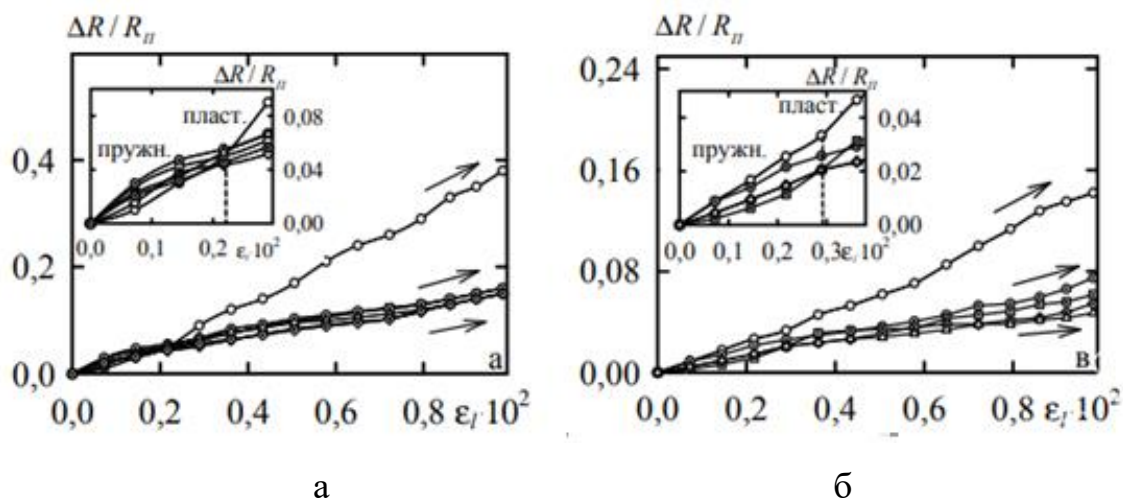


Рис.1.1. Деформаційні залежності для однокомпонентних плівок Мо (а), Fe (б) товщиною $d \cong 20$ нм [1]. Номер деформаційного циклу: \circ - I, \odot - II, \square - III, \diamond - IV, \triangle - V

Характерними їх особливостями є те, що переходи пружна-пластична деформація супроводжуються зміною кута нахилу залежностей при I деформаційному циклі. Відмітимо, що при наступних деформаційних циклах зразок перебуває у пластичному стані. При цьому, відхилення від лінійності залежностей $\Delta R/R(\epsilon_l)$ обумовлено, на погляд автора [1], різними механізмами пластичної деформації [20-22], а саме, перегрупуванням дефектів, збільшенням лінійних розмірів зерен у напрямі поздовжньої деформації, зменшенням їх товщини, рухом дислокацій із об'єму кристалітів до їх межі та інших змін у структурі плівок.

Таким чином, для коректного обговорення і узагальнення результатів досліджень розмірних ефектів у тензорезистивних властивостях нанокристалічних плівкових систем, які характеризуються різним типом взаємної розчинності елементів, існує необхідність у вивченні їх структурних характеристик, процесів взаємної дифузії і фазоутворення, встановленню відповідної кореляції між ними.

Автором роботи [1] проведено аналіз розмірних ефектів у механічних властивостях мікро- та нанокристалів, що пластично деформуються. Було встановлено, що генерація дислокацій дислокаційними джерелами

призводить до сильного деформаційного зміцнення кристалітів, а вихід дислокацій з кристалу через його поверхню – до швидкого досягнення рівноваги між цими двома кінетичними процесами. Зроблено висновок про те, що в тонких кристалітах вже на ранній стадії їх пластичної деформації спостерігається сильне “виснаження” деформаційного зміцнення.

Для більшості випадків характер деформаційних залежностей опору плівок зберігається на всьому досліджуваному інтервалі товщин. На основі експериментальних даних автором роботи [1] були розраховані усереднені по деформаційному інтервалу значення γ_1 в залежності від номера деформаційного циклу для плівок Мо та Fe (табл. 1.1). Дані показують, що при VI – V деформаційних циклах тензочутливість однокомпонентних плівок практично не змінюється.

Таблиця 1.1

Залежність КТ від номера деформаційного циклу для плівок Мо та Fe різної товщини (в інтервалі $\Delta\epsilon_1 \cong 0-1\%$) [1]

Нанокристал плівки (товщина, нм)	Коефіцієнт тензочутливості γ_1					Нанокристал плівки (товщина, нм)	Коефіцієнт тензочутливості γ_1				
	I	II	III	IV	V		I	II	III	IV	V
Мо(20)/П	38,2	14,5	13,9	13,6	13,7	Fe (20)/П	14,4	7,6	6,2	5,2	4,6
Мо(40)/П	32,3	13,6	9,8	9,4	8,9	Fe (50)/П	9,8	5,2	4,2	3,6	3,2
Мо(60)/П	30,8	12,8	7,6	7,3	7,4	Fe (65)/П	8,7	6,1	5,6	3,4	3,1
Мо(90)/П	29,2	12,3	7,2	6,8	6,5	Fe (80)/П	7,9	4,2	3,2	3,1	3,0
Мо(100)/П	28,9	11,2	6,6	6,4	6,3	Fe (100)/П	8,6	4,1	3,6	2,9	2,7

Дослідження тензорезистивних властивостей двокомпонентних систем Мо і Fe, з методичної точки зору, є продовженням пошуків шляхів підвищення КТ, а застосування термостійких компонентів сприяє збільшенню інтервалу робочих температур. [1] На рисунку 1.2 наведені типові деформаційні залежності для двошарових плівок Fe/Мо. В даному випадку результати роботи автора [1], в значній мірі носять аналогічний

характер стосовно одношарових. Результати, які представлені на рисунку 1.2 та в таблиці 1.2 вказують на те, що в дво- та тришарових системах величина КТ стабілізується практично вже при II-III деформаційних циклах. [1]

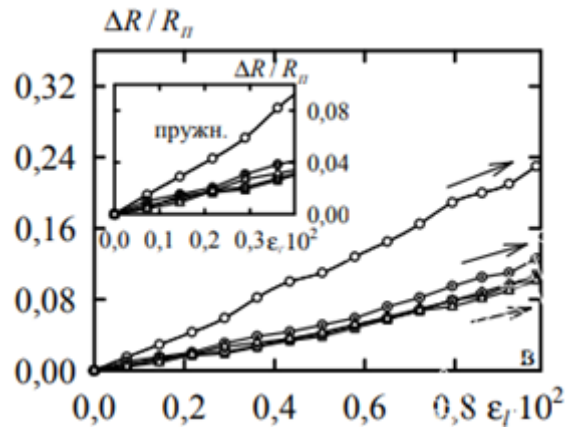


Рис.1.2. Деформаційні залежності для систем Mo(20)/Fe(20)/П. Номер деформаційного циклу: \circ – I, \odot - II, \square - III, \diamond - IV, \triangle - V [1]

Таблиця 1.2

Порівняння КТ для плівкової системи Fe/Mo та її одношарового компонента (в інтервалі $\Delta\epsilon_1 \cong 0-1\%$) [1]

Плівкова система (Me ₁ / Me ₂ /П)	Загальна товщина, нм	Коефіцієнт тензочутливості γ_1					γ_1^{Me} / γ_1	
		I	II	III	IV	V	Me ₁	Me ₂
Mo(20)/ Fe(20)	40	23,4	12,4	9,8	9,7	9,6	1,43	0,48
Fe(20)/Mo(20)/Fe(20)	60	27,3	14,6	11,7	11,6	11,5	0,42	1,19

Вона може збільшуватись або зменшуватись у порівнянні з величиною КТ для одношарових плівок тих самих компонентів. Це пов'язано з тим, що між окремими механізмами розсіюванням електронів провідності завжди існує певна конкуренція щодо загального внеску у формування тензорезистивних властивостей плівок. Відмітимо, що збільшення величини КТ для плівкових систем свідчить про перевагу інтерфейсного розсіювання, у той час коли зменшення – зерномежевого та поверхневого. плівок. [1]

1.2. Терморезистивні властивості

При вивченні робочих характеристик плівкових тензорезисторів, поряд з іншими, проводять дослідження і їх терморезистивних властивостей [1].

Широкого застосування знайшли термічностійкі металеві сплави [1,20]. Як приклад на рисунку 1.3 приведено експериментальні залежності отримані для двошарових плівок Mo/Fe при загальній товщині 70, 60 та 55 нм відповідно. Відмітимо, що вони мають типовий для металевих плівок вигляд, оскільки для них фіксується збільшення питомого опору та зменшення ТКО при зростанні температури, а також термостабілізація після другого або третього циклу термообробки. Відмітимо, що залежності для I термостабілізаційного циклу при нагріванні мають різний вигляд. Дослідження терморезистивних властивостей плівок показують, що дисперсність структури, домішкові фази і твердофазні реакції впливають на характер температурної залежності питомого опору та ТКО. Розрахунок термічного коефіцієнту опору β здійснювався на основі відповідних експериментальних залежностей електроопору або питомого опору від температури відповідно за співвідношеннями:

$$\beta = 1/R (\Delta R / \Delta T) \text{ або } \beta = 1/\rho (\Delta \rho / \Delta T), \quad (1.2)$$

де інтервал $\Delta T \cong 10$ К витримувався постійним. Величину ТКО автор роботи [1] розраховував за кривою охолодження другого або третього циклу термостабілізації. Далі для одношарових плівок – складових двошарової плівкової структури – автор у роботі [1] побудував експериментальну залежність ТКО від товщини для недеформованих ($\epsilon_1 = 0$) та статично zdeформованих ($\epsilon_1 = 1\%$) плівок. Відпалювання плівок у вакуумі автор у роботі [1] проводив за допомогою галогенної лампи в інтервалі температур 300÷550 К.

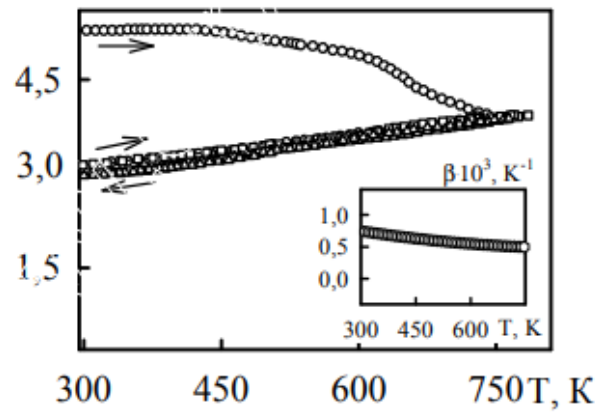


Рис.1.3. Температурні залежності питомого опору і ТКО (вставка) плівкових систем Mo(25)/Fe(30)/П [1]

Як приклад на рисунку 1.4 приведено залежності $\beta(d)$, $\beta \cdot d(d)$ та $\beta^{-1} \cdot d(d)$ для недеформованих та статично здеформованих плівок Мо.

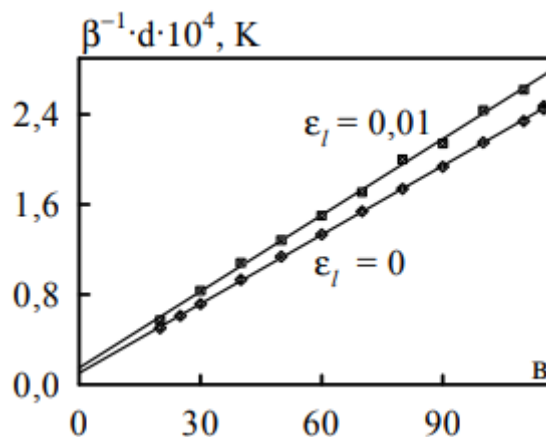


Рис.1.4. Залежність термічного коефіцієнта опору від товщини у різних координатах для недеформованих та здеформованих плівок Мо [1]

Такі дані автору роботи [1] у сукупності з експериментальною залежністю [1] середнього розміру кристалітів від товщини $L(d)$ дозволили провести розрахунок деформаційних коефіцієнтів. На рисунку 1.5 наведені залежності, отримані при охолодженні для III термостабілізаційного циклу. Вони мають типовий як для металевих плівок вигляд. Характерною ознакою цього є збільшення величини ТКО та зменшення величини питомого опору при охолодженні. [1]

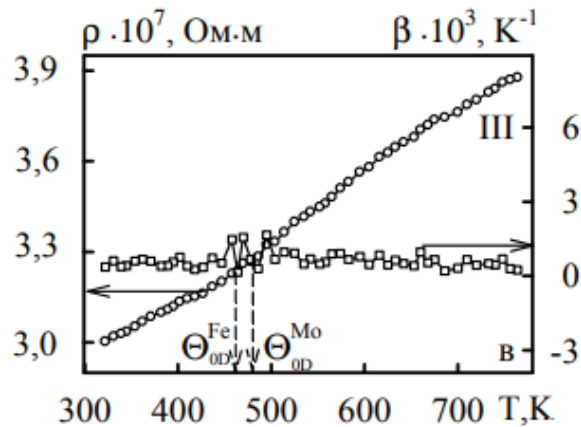


Рис.1.5. Температурні залежності питомого опору і ТКО для двошарових плівок Mo(20)/Fe(30)/П [1]

При температурі за більшу від температури Кюрі Mo/Fe спостерігається заломлення залежностей, що пов'язано з руйнуванням магнітних неоднорідностей та, як наслідок [18], зменшенням кількості центрів розсіювання носіїв електричного заряду. Така поведінка температурної залежності опору спостерігається і у інших випадках, коли товщина шару Mo є рівною або меншою за товщину шару Fe [1].

Звертають на себе увагу у роботі [1] такі особливості отриманих експериментальних результатів для ТКО плівок d-металів. Вони мають у декілька разів меншу величину ТКО порівняно з масивними зразками. Це пояснюється відносно великим питомим опором плівок. Дослідження у роботах [13,14]) показали, що дрібнодисперсна структура, утворення домішок внаслідок взаємодії з атомами залишкової атмосфери і процеси фазоутворення в умовах взаємної дифузії атомів компонент, впливають на характер температурних залежностей питомого опору та ТКО металевих плівок. [1]

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Обладнання для отримання та дослідження плівкових матеріалів

Для вирішення поставлених задач були проведені дослідження автором в роботі [1] з використанням наступних експериментальних методів: вакуумна конденсація нанокристалічних одно-, дво- та тритишарових зразків в інтервалі товщин до 100 нм; методика вимірювання коефіцієнта тензочутливості; вакуумна термообробка з вивченням електрофізичних властивостей та структурно-фазового складу отриманих зразків; просвічуюча електронна мікроскопія (ПЕМ) та електронографія (ЕГ) для вивчення фазових перетворень і еволюції кристалічної структури в плівкових структурах мікроприладів; метод кварцового резонатора контролю товщини плівок.

Плівки на основі Fe, Mo отримували [1] методом термічного випарування відповідних металів (чистота 99,99 %) та послідовного осадження шарів без орієнтуючого магнітного поля у високому вакуумі ($p = 10^{-4}$ Па). Для цього використовувалося спеціальне експериментальне обладнання [1], основним складовим елементом якого є вакуумна установка типу ВУП-5М. Попередній вакуум створювався механічним форвакуумним насосом 2НВР-5ДМ. Для отримання високого вакууму використовувався дифузійний насос НДВМ-160, що давав змогу підтримувати мінімальний тиск газів залишкової атмосфери $\sim 10^{-4}$ Па. Основні елементи установки, а також пристроїв отримання і дослідження плівкових зразків, виконані із нержавіючої сталі Х18Н10Т з незначним газовиділенням. Контроль вакууму здійснювався вакууметром безпосередньо вмонтованим в установку ВУП-5М та термопарними і іонізаційними манометричними перетворювачами типу ПМТ-2 та ПМІ-2, відповідно. [1] Пристрої для отримання плівкових зразків

та подальшого їх дослідження розміщувались в корпусі робочої камери. За допомогою цифрових мультиметрів типу UT70D та UT70B контролювалися відповідно електричний опір (точність $\pm 0,05\%$) плівок та температура (точність $\pm 1\text{K}$) підкладки, при використанні хромель – алюмелевої термопари. Експериментальні дані з мультиметрів за допомогою інтерфейсу RS232 передавалися на комп'ютер. Товщини плівок контролювалися *in situ* методом кварцового резонатора (точність 10 %). Для технічного забезпечення цього методу використовувалися промисловий кварцевий резонатор типу РГ-08 з частотою 10 МГц, генератор електричних коливань та частотомір ЧЗ-54. Цей метод дає достовірні результати в робочому інтервалі температур 230-310 К у випадку коли маса плівки не перевищує 1% від маси пластини резонатора [16].

Робоча камера (рис. 2.1 а) має вигляд ковпака, виготовленого із нержавіючої сталі, який разом з гумовими ущільнювачами забезпечує вакуумну герметизацію. Необхідне для проведення експериментів улаштування розміщується на спеціальних штативах. Для візуального спостереження в ковпак вмонтовано скляні ілюмінатори.

Плівкові зразки отримували [30] електронно-променевим методом за допомогою випаровувача діодного типу, який, при необхідності, замінювали або доповнювали резистивними випаровувачами виготовленими з Мо. Під випаровувачами розміщувався деформаційний пристрій, датчик товщини, термопара, монокристали NaCl, плівки вуглецю та інше. Відстань між підкладкою та закріпленою на випаровувачі металеву наважкою підтримувалась постійною та складала близько 70 мм. Для запобігання забруднення підкладки на початку конденсації вона закривалася механічною заслінкою. Термічну обробку плівок в інтервалі температур 300 - 850 К проводили за допомогою нагрівача, схематично зображеного на рис. 2.1,б. [1]

Електронно-променевий метод є одним з найпоширеніших методів отримання плівок тугоплавких металів [1]. Для цього застосовуються

електронно-променеві гармати (ЕПГ) різних конструкцій. Найбільш простою є ЕПГ діодного типу, схема якої приведена на рис.2.2.

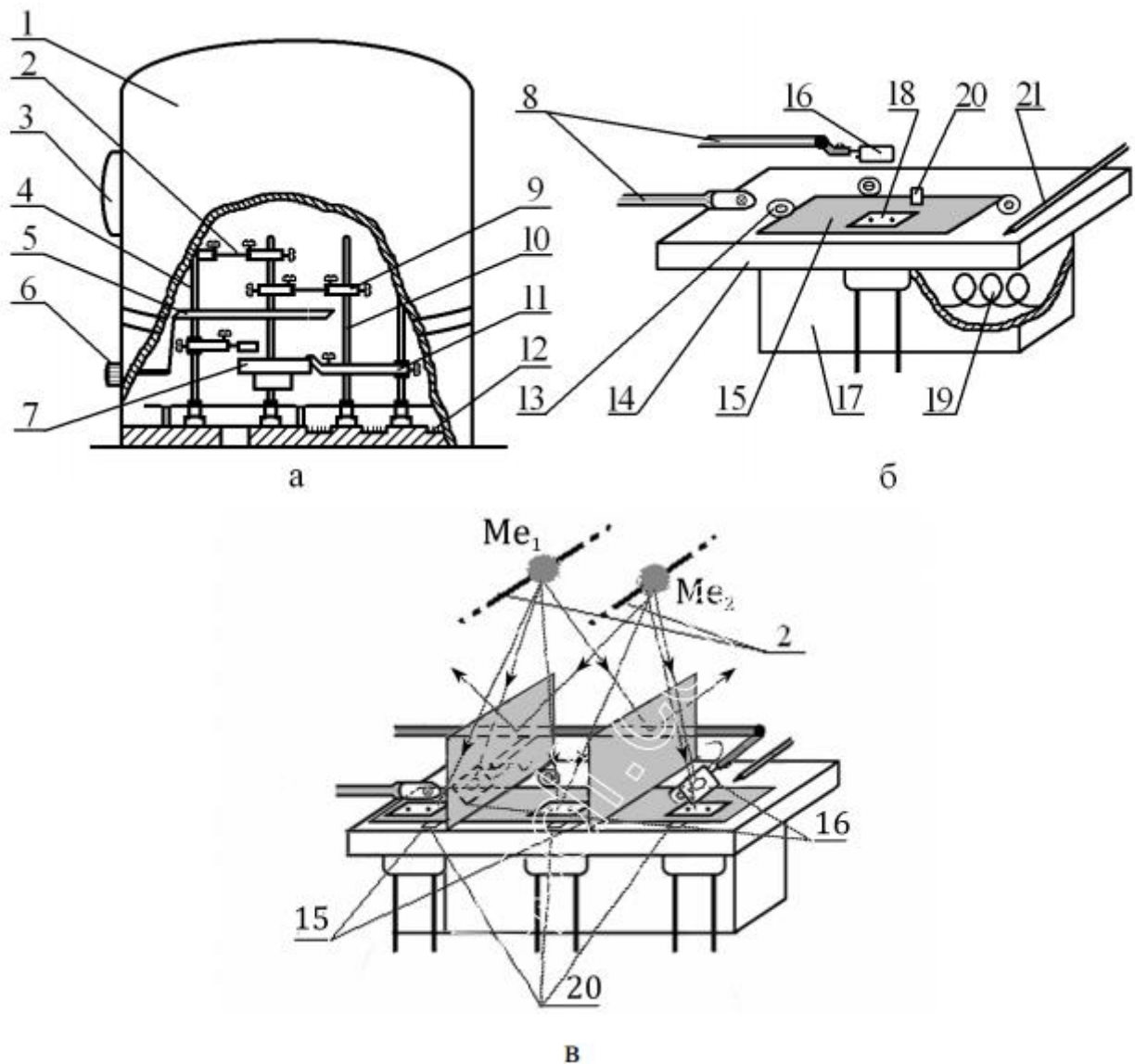


Рис.2.1. Схема робочої камери ВУП-5М (а) та пристрій для термовідпалювання зразків у вакуумі (б) [1]: 1 – корпус робочої камери; 2 – терморезистивні випаровувачі; 3 – спостережувальне віконце; 4, 10 – стійки; 5 – заслінка; 6 – обертова ручка заслінки; 7 – столик для відпалювання зразків; 8, 9, 11 – тримачі; 12 – роз’єм; 13 – підкладкотримач; 14 – мідний столик; 15 – маска; 16 – п’езорезонатор для контролю товщини плівки; 17 – піч для відпалювання; 18 – підкладка з молібденовими електродами; 19 – вольфрамова спіраль; 20 – пластини NaCl; 21 – термопара

Поряд з цим, постійно проводяться спроби модифікації існуючих випаровувачів або створення нових [2-8]. Однією з яких є застосування в звичайній ЕПГ вольфрамового анода спеціальної форми. Не зважаючи на простоту конструкції, це дозволило отримувати максимальну швидкість конденсації $\omega \cong 2 \text{ нм/с}$ парів атомів Мо та Ре. Складність юстування анода в площині кільця катода обумовлювала величину швидкості конденсації в межах $0,3 - 1,6 \text{ нм/с}$.

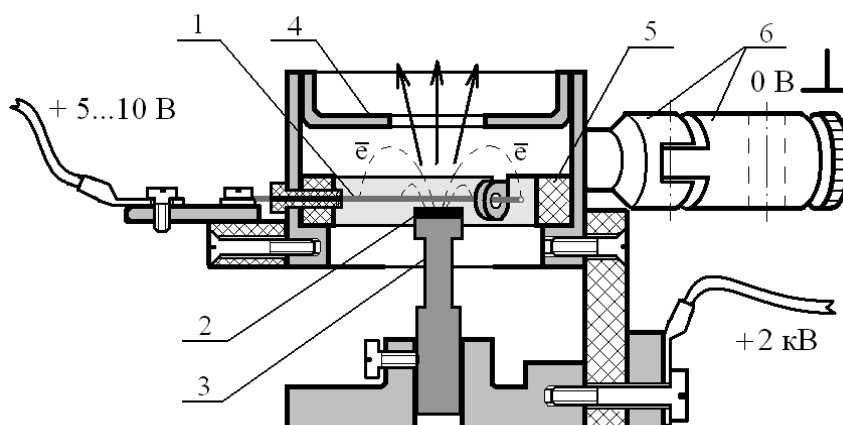


Рис.2.2.Схема електронно-променевої гармати діодного типу [1]: 1 – вольфрамовий катод; 2 – наважка з випаровуємого матеріалу; 3 – анод; 4 – фокусуєчий електрод; 5 – діелектричне кільце; 6 – кронштейн для кріплення

Для випарування Fe використовувалися [1] резистивні випаровувачі у вигляді двох вольфрамових дротин діаметром близько 0,8 мм. Вони дозволяли регулювати ω в межах від 0,1 до 5 нм/с за рахунок зміни струму нагрівача.

Відомо, що для отримання структурованих плівкових зразків для кожного металу існує оптимальна температура підкладки T_n . Але у роботі [1] вона обмежена термостійкістю політетрафторетілену (тефлон, фторопласт-4), яка становить близько 550 К. Відпалювання деформованих та недеформованих плівок проводили [1] методом фотонного опромінення за допомогою галогенної лампи потужністю 100 Вт.

2.2. Методика дослідження тензочутливості

Для визначення електроопору плівок (R), величина якого в експериментах роботи [1] складала ~ 10 Ом, використовували двохточкову схему вимірювання. Вимірювальні дроти припаювалися до масивних контактів. У процесі деформування опір реєструвався через проміжок часу $\Delta t = 1$ с. Величина опору плівкових та масивних контактних майданчиків, вимірювальних проводів разом становила $\sim 0,1$ Ом. [12] Для запобігання впливу оточуючого середовища всі експерименти проводилися методом *in situ* безпосередньо в робочому об'ємі вакуумної камери не порушуючи вакууму після конденсації та стабілізації досліджуваних плівок. [13]

Тензорезистивні властивості плівкових матеріалів досліджували за допомогою деформаційного пристрою, сконструйованого на базі мікрометра (рис. 2.3). Деформацію типу поздовжній розтяг в інтервалі до 1 % з кроком 0,05% проводили за схемою "навантаження \leftrightarrow зняття навантаження". Зміна температурного режиму в інтервалі 300-550 К проводилася за допомогою нагрівача.

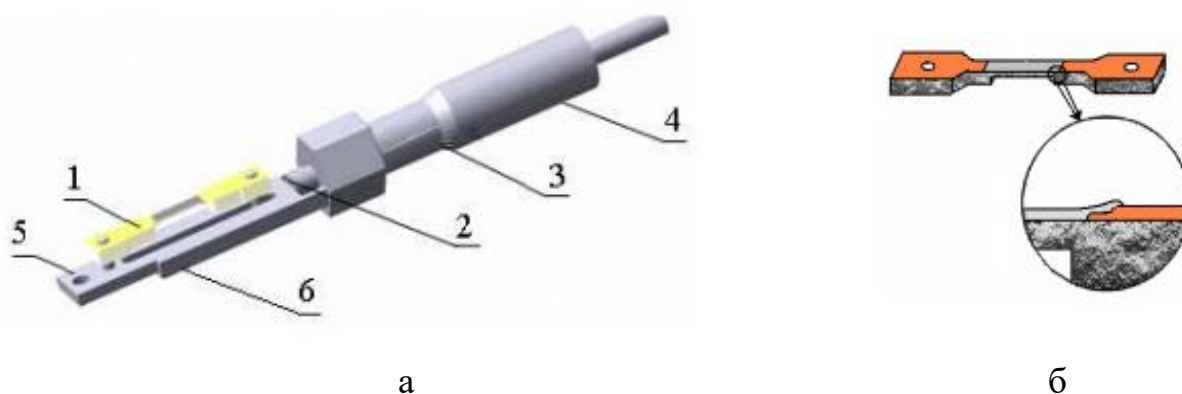


Рис. 2.3. Схема деформаційного пристрою (а) та підкладки (б) [1] : 1 – закріплена підкладка; 2 – рухомий шток; 3 – мікрометрична шкала; 4 – мікрогвинт; 5 – повзун; 6 – поздовжня напрямна повзуна

Плівкові зразки осаджувалися [1] на попередньо відполіровані тефлонові підкладки спеціальної форми з контактними. Спочатку на розігрітій до

температури близько 450 К підкладці, за допомогою масок формувалася сходинкоподібна геометрія контактів – плівок на основі Cu. Це дозволило отримати надійне електричне з'єднання з низьким електричним опором. Після осадження контакти витримувалися при зазначеній температурі ще протягом 15 хв. Після охолодження до кімнатної температури та стабілізації протягом 30 хв. [16] До них щільно притискалися відполіровані масивні контакти виготовлені з фольгованого міддю текстоліту. Відстань між контактами складала 15 мм та була на 2мм більшою за довжину деформованої ділянки, ширина якої – 5 мм). Геометрія підкладки та відстань між контактами, за якою визначалась початкова довжина плівкового зразка, витримувались постійними при проведенні тензорезистивних досліджень. [1]

Відмітимо, що характерне розтріскування плівок Fe, внаслідок дії макронапружень структурного та термічного походження, певною мірою ускладнює отримання достовірних результатів. [1] Позбутися цього негативного явища можна за рахунок нагрівання підкладки до температур $T_p = 400 - 450$ К перед осадженням плівок. [29-31]

2.3. Електронно-мікроскопічні методи дослідження

З метою вивчення фазового складу та структури плівкових зразків в роботі [1] проводились електроннографічні та електронно-мікроскопічні дослідження за допомогою просвічуючих електронних мікроскопів ПЕМ-125К. Методика розшифровки електроннограм детально описана в роботі [25]. Згідно [25] квадратичні формули для кристалітів кубічної та гексагональної сингонії мають такий вигляд:

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a_{hkl}^2}, \quad a_{hkl} = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}, \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \frac{h^2 + k^2 + kh}{a_{hkl}^2} + \frac{l^2}{c_{hkl}^2}, \quad a_{hk0} = \frac{2}{\sqrt{3}} d_{hk0} \sqrt{h^2 + kh + k^2}, \quad c_{00l} = l d_{00l}, \quad (2.2)$$

В співвідношеннях (2.1) та (2.2) використані наступні позначення: d_{hkl} – міжплощинна відстань; h, k, l – індекси Міллера; a_{hkl} і c_{hkl} – параметри ґраток в межах відповідних сингоній. Як еталон використовували відпалену плівку Al товщиною $d=30-40$ нм, що забезпечувало точність вимірювання міжплощинних відстаней $\Delta d_{hkl} = \pm 0,002$ нм та відповідних параметрів ґраток $\Delta a_{hkl} = \pm 0,001$ нм і $\Delta c_{hkl} = \pm 0,001$ нм. Технічні характеристики мікроскопа ПЕМ-125К наведені в таблиці 2.1 [29]

Таблиця 2.1

Технічні характеристики мікроскопа ПЕМ-125К [25]

Параметр	Величина
Роздільна здатність по кристалічній решітці по точках	0,2 нм; 0,3 нм
Діапазон збільшень	100 ... 850000
Прискорююча напруга	25; 50; 75; 100; 125 кВ
Нестабільність прискорюючої напруги	$2 \cdot 10^{-6}$ хВ ⁻¹
Нестабільність струму об'єктивної лінзи	$1 \cdot 10^{-6}$ хВ ⁻¹
Швидкість забруднення об'єкта	$2 \cdot 10^{-4}$ нм/с
Кут нахилу пучка	$\pm 3^\circ$
Вакуум в області гармати та камери об'єкта	$1,3 \cdot 10^{-4}$ Па
Кут нахилу об'єкта	$\pm 60^\circ$
Потужність	4,5 кВт
Загальна маса мікроскопа	1,7 т

Електронні мікроскопи можуть збільшувати зображення у 2 млн разів. Висока роздільна здатність електронних мікроскопів досягається за рахунок малої довжини хвилі електрона [25]. В той час, як довжина хвилі видимого світла лежить в діапазоні від 400 до 800 нм, довжина хвилі електрона, прискореного у потенціалі 150 В, становить 0,1 нм. Таким чином, в

електронні мікроскопи можна теоретично розглядати об'єкти розміром з атом, хоча практично здійснити це важко [25,29].

2.4. ІЧ-методи дослідження плівкових матеріалів

На сьогодні дослідження характеристик магнітних наночастинок (НЧ) представляє великий інтерес для багатьох дослідників різних наукових галузей. У той же час формування наноструктур, що самоорганізуються на основі оксидів заліза представляє інтерес у зв'язку з можливим їх застосуванням у системах зберігання даних високої щільності, спінтронічних, фотонних та інших пристроях [1-6]. Останнім часом активно використовуються магнітні НЧ для нанокаталізу [3-8], які застосовують як каталізатори для дослідження НЧ-оксиду, де застосовується металоорганічне з'єднання молібдену.

ІЧ - спектроскопія дозволяє проводити не тільки якісний, але і кількісний аналіз. Для оптичних спектрів є загальні закони поглинання, випромінювання, що дають співвідношення між величиною поглинання і кількістю поглинає речовини. Залежність коефіцієнта поглинання від хвильового числа можна використовувати для оцінки концентрації зв'язків різних речовин, тому що площа смуги поглинання пропорційна концентрації зв'язків. Маючи еталонний спектр, можна отримати кількісне значення концентрації зв'язків досліджуваного зразка. Сучасний двопробеневий ІЧ-спектрофотометр (рис. 2.4) складається із п'яти основних елементів: джерела випромінювання, кюветного відділення, фотометра, монохроматора і приймача [17].

Фур'є-спектрометр побудований за класичною схемою інтерферометра Майкельсона. Принципова оптична схема Фур'є-спектрометра IFS 66V приведена на рис.2.5. Прилад має дві фіксовані позиції для джерел випромінювання S1 і S2.



Рис. 2.4. Загальний вигляд сучасного приладу для ІЧ-спектроскопії [17]

Набір діафрагм (апертур) обмежує розбіжність пучка. Діаметр світлової плями на зразку, встановленому в стандартній позиції в області перетяжки пучка в відділенні для зразків дорівнює 1,2 діаметра апертури.

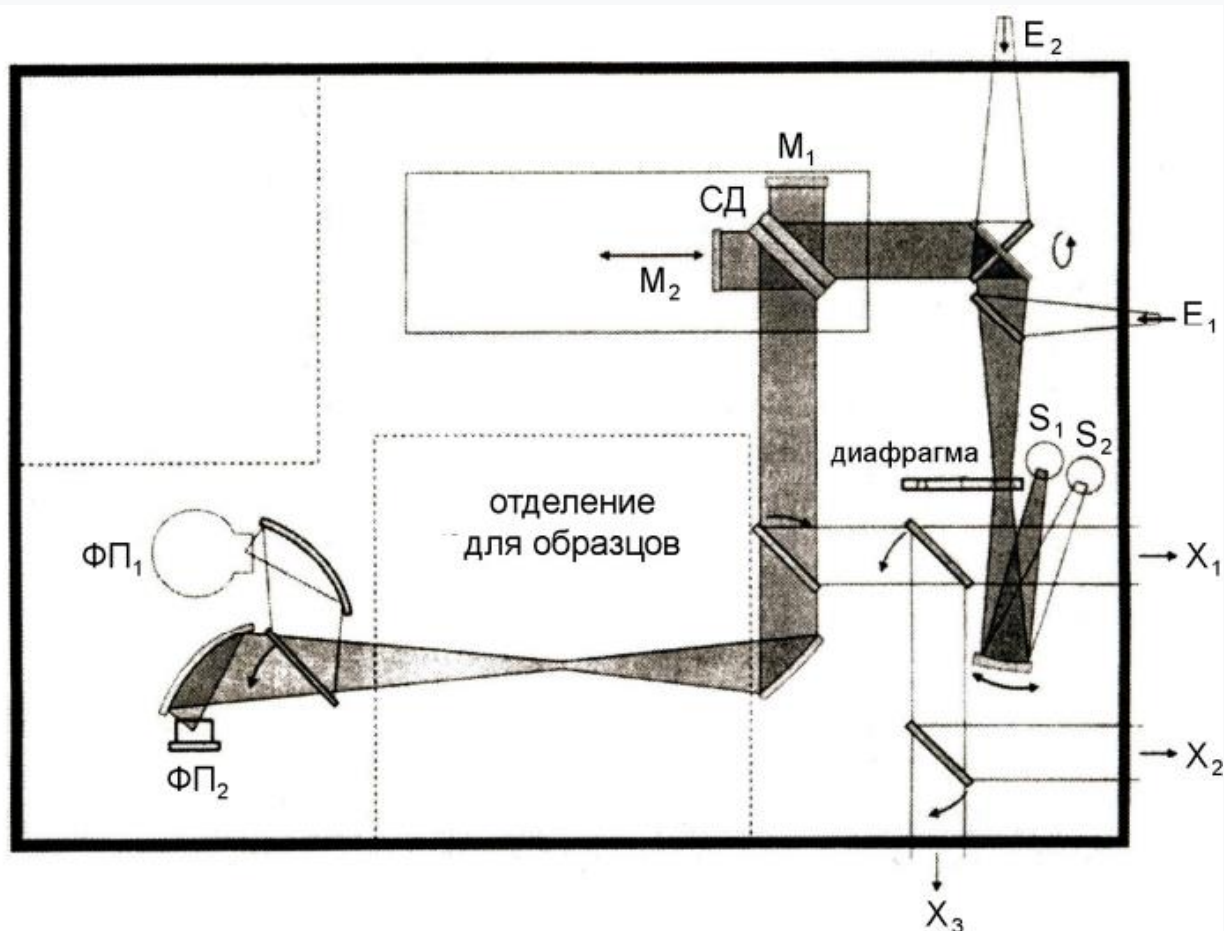


Рис.2.5. Принципова оптична схема Фур'є-спектрометра IFS 66V[17]

Сколліміроване випромінювання потрапляє на розташовану під кутом до оптичної осі приладу напівпрозору плоску паралельну пластинку СД, що називається світлодільник. Світлодільник поділяє паралельний світловий промінь на два: один з них відбивається від нерухомого плоского дзеркала М1, в той час як інший - надходить до рухомого плоского дзеркала М2. [17].

Після відбиття від дзеркал кожен з пучків повертається до світлодільника, на якому знову ділиться на дві частини, одна з яких спрямовується на фотоприймач ФП1 або ФП2 в залежності від обраного робочого спектрального діапазону. Плавність переміщення дзеркала забезпечується повітряними підшипниками, що працюють від системи подачі стисненого повітря. Сигнал, який реєструється фотоприймачем, є функцією, породженою інтерференцією двох променів в повітряному проміжку між поверхнями дзеркала М2 і зображення першого дзеркала М1, який формується світлодільником.

ІК-спектроскопія є неруйнівним безконтактним способом отримання інформації про хімічний склад і структуру гранично малих кількостей речовини в будь-яких його агрегатних станах (аж до атомних кластерів і мономолекулярних шарів, адсорбованих на поверхні твердого тіла). ІК-спектроскопія дозволяє досліджувати фононну і електронну підсистеми обсягу і поверхні твердих тіл, оптичні властивості тонких плівок і наноструктур, а також молекулярних систем. Резонансне поглинання інфрачервоного випромінювання відбувається на індукованих пучком коливаннях або обертальних рухах, в процесі яких змінюється дипольний момент структури. Крім цього в інфрачервоному діапазоні реалізується поглинання на вільних носіях заряду в напівпровідникових структурах. У разі тонких плівок інтерференційні ІЧ-спектри несуть в собі інформацію про анізотропії матеріалу та дозволяють визначити показник заломлення. Тому даний метод використовували при дослідженні плівкових систем на основі Мо і Fe.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Тензо- та терморезистивні властивості гетерогенних плівкових матеріалів на основі α -Mo і Fe

У випадку плівкових систем на основі Mo і Fe автори [31] сформували два типи зразків: ОЦК-Fe/ α -Mo і ОЦК-Fe/ α -Mo/ОЦК-Fe, і ГЦК-FeO+ α -Mo. Результати мікроскопічного та дифракційного досліджень двошарових ОЦК-Fe/ α -Mo систем та гетерогенних плівок представлені на рис. 3.1 та в таблиці 3.1 [31]

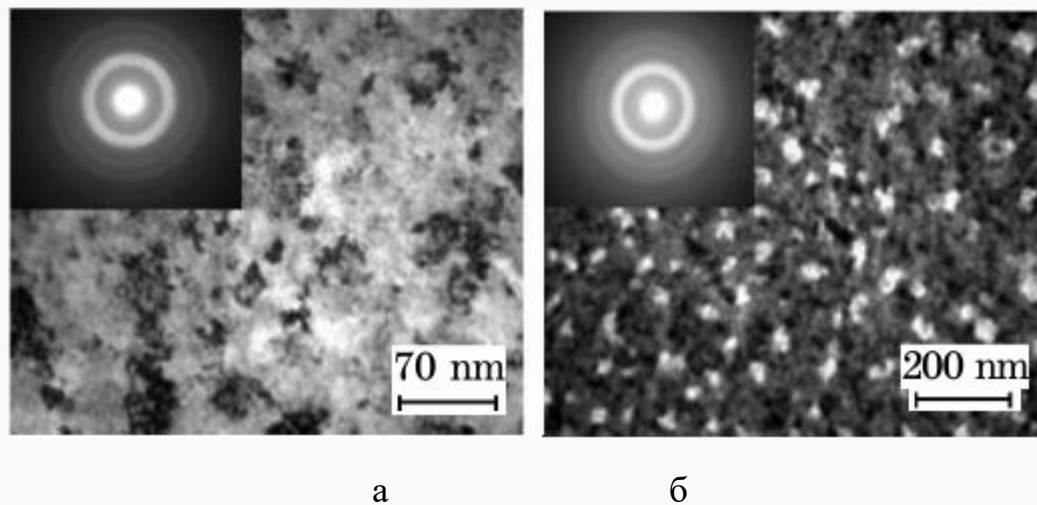


Рис. 3.1. Мікроструктура та відповідні дифрактограми невідпаленої плівки Fe(30)/ α -Mo (20) (а) та відпаленої при 800 К Fe(40)/ α -Mo(30) (б) [31]. Товщина (в нм) вказана в дужках

Під час досліджень тензорезистивних властивостей авторами [31] було побудовано графік залежності $\Delta R/R$ при поздовжній деформації ϵ_1 , де $\Delta R = R(\epsilon_1) - R$ (R - початковий опір) протягом перших п'яти циклів

деформації «навантаження – без навантаження». На рис. 3.2 представлені типові деформаційні залежності для двошарової плівки Fe(30)/a-Mo(20).

Таблиця 3.1

Розшифрування дифракції від плівкових систем Fe/Mo/П [31]

№	<i>hkl</i>	<i>I</i> , в.о.	d_{hkl} , нм	<i>a</i> , нм	Фаза	\bar{a} , нм
Fe(30)/Mo(20) (невідпалений зразок)						
1	-	ср	0,225	-	a-Mo	\bar{a} (ОЦК-Fe) = = 0,287 ± 0,001 нм
2	110	С	0,202	0,286	ОЦК-Fe	
3	200	ср	0,144	0,288	ОЦК-Fe	
4	-	Д.сл	0,129	-	a-Mo	
5	211	ср	0,117	0,287	ОЦК-Fe	
Fe(40)/Mo(30) (відпалений до 800 К зразок)						
1	111	Д.С	0,252	0,436	FeO	\bar{a} (ОЦК-Mo) = = 0,315 ± 0,001 нм \bar{a} (FeO) = = 0,435 ± 0,003 нм
1'	110	розмита	0,224	0,317	ОЦК-Mo	
2	200	ср	0,216	0,432	FeO	
3	220	сл	0,154	0,436	FeO	
4	311	сл	0,132	0,438	FeO	
5	211	розмита	0,128	0,314	ОЦК-Mo	
6	222	сл	0,125	0,433	FeO	

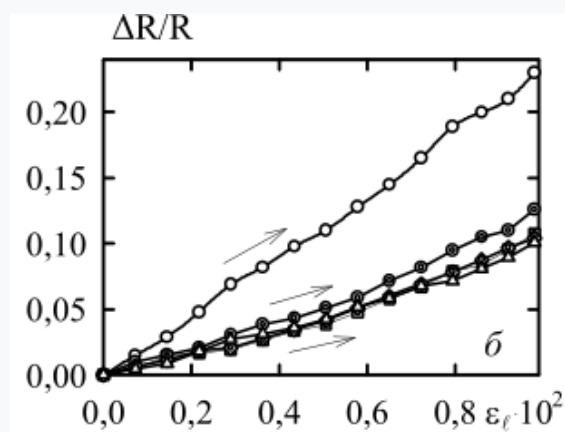


Рис. 3.2. Дифракційна залежність двошарової плівки ОЦК-Fe(20)/a-Mo(20) [31]. Номер дифракційного циклу:

○ – I, ⊙ – II, □ – III, ◇ – IV, △ – V

У системі Fe/a-Mo після відпалювання до 800 К відбувається утворення плівок гетерогенного складу ОЦК-Mo + Fe₃O₄ + Fe₂O₃ (рис. 3.3).

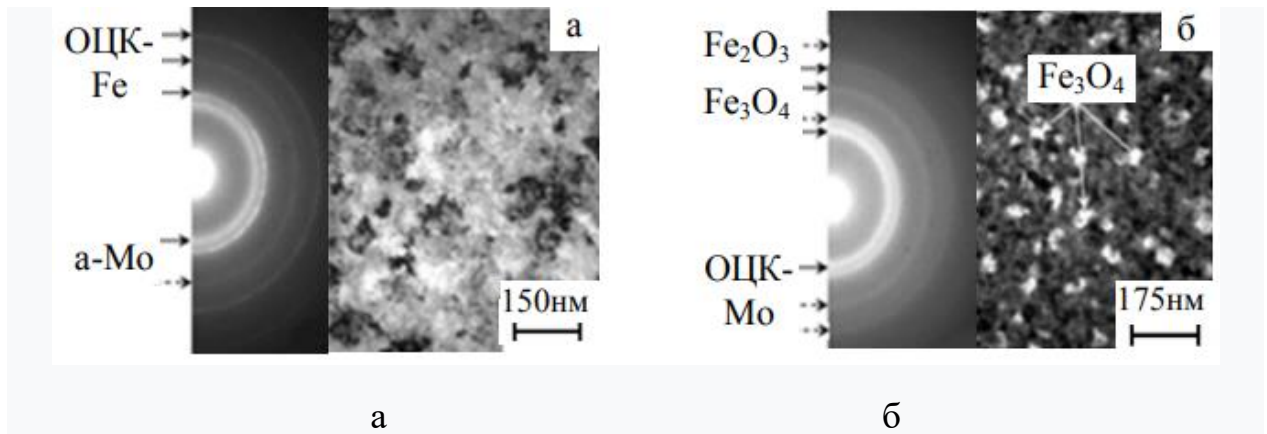
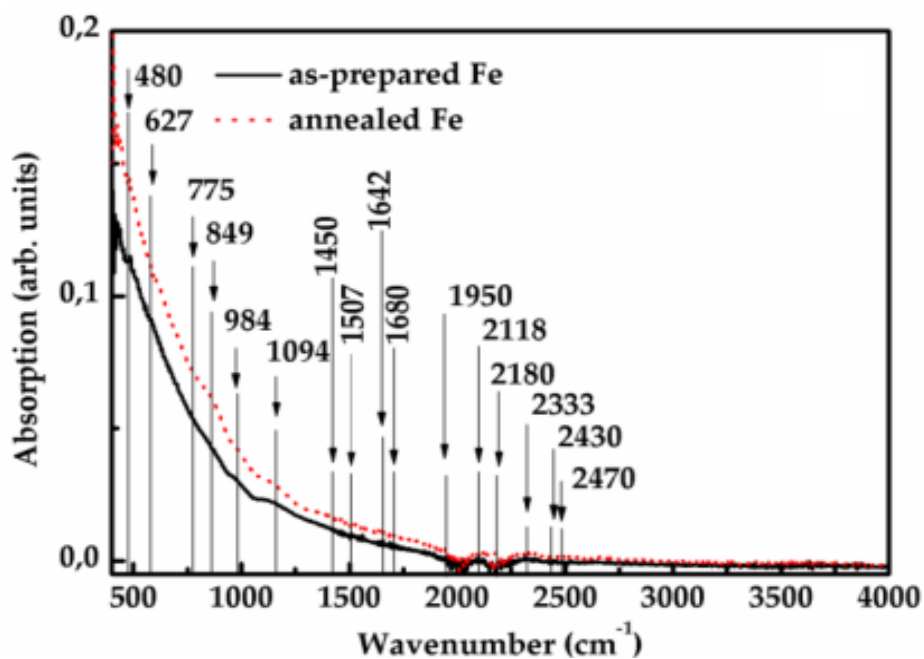


Рис. 3.3. Мікрокристалічна структура і відповідна електронограма від плівкової системи Fe(30)/а-Мо(30) після конденсації (а) та відпаленої при 800 К (б) [31]

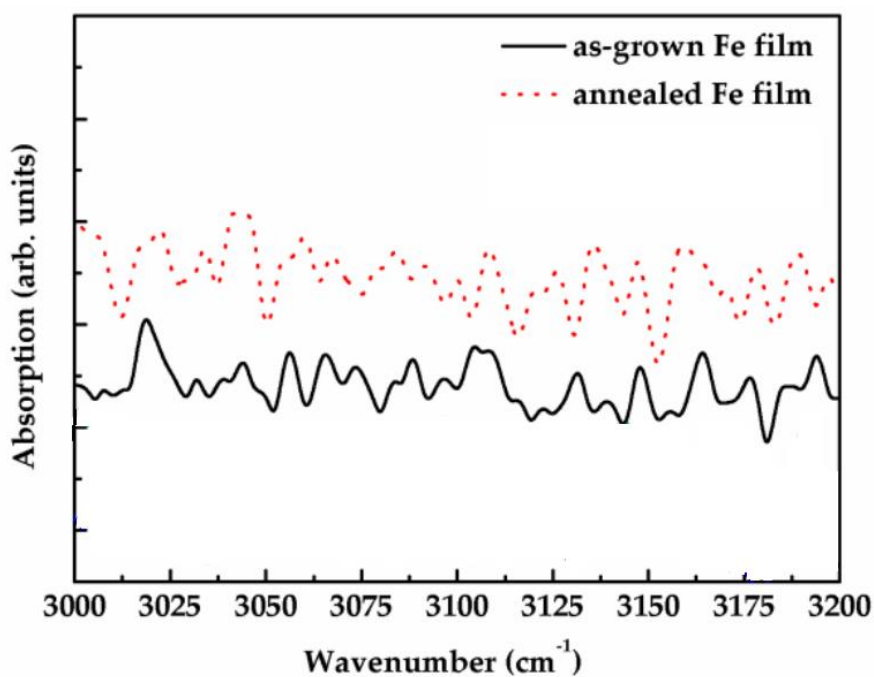
У плівках ОЦК-FeO + а-Мо значення КТ близьке до 8. У двошарових та тришарових системах плівок ОЦК-Fe/a-Мо та ОЦК -Fe/a-Мо/ОЦК -Fe при загальній товщині зразка від 40 нм до 60 нм значення КТ становить приблизно 10 (двошарові системи) або 12,4 (тришарові системи). Виходячи зі значення КТ можна констатувати, що неоднорідні двошарові і тришарові плівкові матеріали можуть бути використані як чутливі елементи резистивних- датчиків деформації [1, 30-31].

3.2. ІЧ-спектроскопія фазового складу гетерогенних плівок

Для підтвердження наявності оксидної фази в системі гетерогенних плівках Fe та а-Мо було обрано ІЧ-спектроскопічний аналіз (FTIR). Цей метод дозволяє визначити наявність домішок у тонких плівках з високим значенням точності (рис.3.4). ІЧ-спектри плівок Fe_xO були отримані в режимі повної рефракції (прилад Diamand ATR). Діапазон частот в режимі поглинання варіювався від 400 до 4000 см⁻¹ [30].



а



б

Рис. 3.4. ІЧ-спектри нарощених та відпалених тонких плівок Fe (а) та визначення товщини плівок Fe (б) [30]

ІЧ-спектри відпаленої системи а-Mo/Fe представлені на рис.3.5. Аналіз ІЧ-спектрів (табл. 3.2) показав, що в обох випадках підготовлених та відпалених плівок спостерігаються піки 434 cm^{-1} та 536 cm^{-1} або 428 cm^{-1} та

540 cm^{-1} утворені валентними коливанням Fe–O, що фіксуються для невідпалених та відпалених плівок.

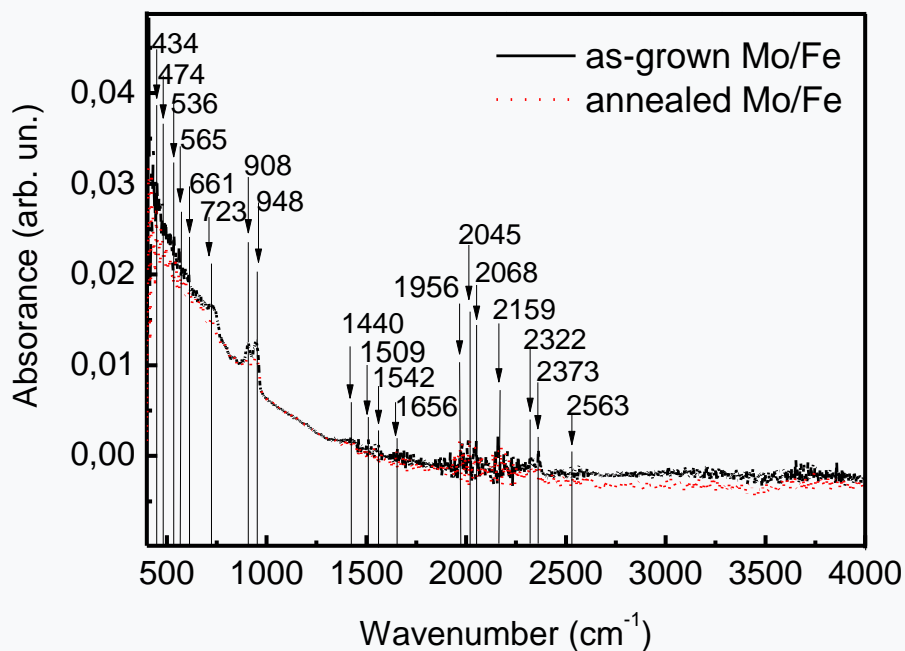


Рис.3.5. ІЧ-спектри нарощених і відпалених тонких плівок при температурі 750 К Mo(20)/Fe(20)/П

Таблиця 3.2

Визначення ІЧ-спектрів а-Mo(20)/Fe(20)/П у вигляді осадженої та відпаленої систем тонких плівок

Частота, cm^{-1}		Склад
Невідпалені	Відпалені	
434	428	Fe–O
474	500	Mo=O
536	540	Fe–O
565	-	Mo ₃ –O Fe–O
-	600	Mo=O Fe–O
616	-	Fe–O
-	661	Mo ₂ –O Fe–O
723	-	Mo ₂ –O Fe–OH
908	902	Mo=O
948	946	Mo=O

Для невідпалених або відпалених плівкових сплавів відповідно фіксуються піки 565 см^{-1} або 600 см^{-1} , які можуть утворені за рахунок валентних коливань Fe–O у оксиді Fe_3O_4 . Поряд з цим пік 661 см^{-1} може бути інтерпретований як такий, що утворений валентним коливанням Fe–O так і валентним коливанням $\text{Mo}_2\text{–O}$, пік 565 см^{-1} утворений валентним коливанням $\text{Mo}_3\text{–O}$ фіксується тільки для невідпалених плівок. Піки 474 см^{-1} , 908 см^{-1} та 948 см^{-1} або 500 см^{-1} , 902 см^{-1} та 946 см^{-1} утворені валентними коливаннями Mo=O у оксидах MoO_x , що фіксуються для невідпалених та відпалених плівкових сплавах.

Осадження плівок заліза на поверхні гетерогенних плівок молібдену призводить до утворення оксиду заліза фази ГЦК. Результати електронно-дифракційних досліджень свідчать про те, що спостережувані фази належать до ГЦК $\text{-Fe}_x\text{O}$ (параметр решітки - $0,427\text{ нм}$), які залишаються стабільними при відпалі до температури 700 К . При температурі відпалу 800 К масиву Fe_3O_4 (параметр решітки - $0,417\text{ нм}$) наночастинки утворюються у вигляді легких кристалітів на поверхні плівкової системи [29].

Зазначимо, що плівки a-Mo і Fe після термічного відпалу продемонстрували наявність оксидних фаз. Цей факт підтверджений дослідженнями ПЕМ, та ІЧ-спектроскопією (FTIR). Дослідження ПЕМ показало, що у разі відпалу проб спостерігали яскраві зрізи, що відповідає наявності оксидної фази. Дослідження за допомогою ІЧ-спектроскопії показали, що присутність оксидної фази спостерігається також у осаджених плівках Fe, але їх напруженість значно слабша.

На наш погляд, це може бути викликано окисненням спонтанних плівок з атмосфери. Аналіз ІЧ-спектрів також показав, що при частотах понад 2600 см^{-1} не спостерігалися додаткові піки поглинання, що може бути викликано відсутністю домішок у вакуумній камері під час процесу випаровування.

Товщину плівок визначали за методикою, заснованою на ІЧ-спектрах FTIR, що добре корелюється зі значеннями, отриманими за допомогою кварцового резонатора [31].

ВИСНОВКИ

1. Тонкі плівки d-металів із великою температурою плавлення можуть бути ефективно використані як чутливі елементи тензо- і терморезисторів, датчиків деформації і тиску з високостабільними робочими характеристиками в області пластичної деформації та підвищених температур.

2. Проаналізували склад двокомпонентних систем Fe/Mo і Mo/Fe. Провели аналіз апробацій феноменологічних теоретичних моделей для КТ та ТКО, напівфеноменологічної моделі для КТ з урахуванням деформаційних ефектів у параметрах електроперенесення. У відповідності із задачами досліджень були проаналізовані методи вимірювання тензо- і терморезистивних властивостей.

3. Результати досліджень кристалічної структури і фазового складу двошарових систем Fe/a-Mo після відпалювання до 800 К показали, що відбувається утворення плівок гетерогенного складу ОЦК-Mo + Fe₃O₄ + Fe₂O₃. Аналіз досліджень тензочутливості в області пружної і пластичної деформації дозволили встановити таке: величина КТ у дво- та тришарових системах має значення 4,8 - 9,8 (Fe/Mo), що узгоджується з уявленнями про розмірний ефект в КТ; у плівкових сплавах, близьких до складу Fe₆₅Mo₃₅, дорівнює 4,7 одиниць, при пружній або пластичній деформації плівок основний внесок у чутливість питомого опору до деформації дають процеси зерномежового розсіювання електронів, у той час як поверхнєве розсіювання - помітний внесок лише при малій товщині зразків; величина чутливості питомого опору при пластичній деформації має більше значення, ніж при пружній, що пов'язано із певним збільшенням ефективності зерномежового розсіювання електронів, оскільки величина R збільшується від 0,22 - 0,24 до 0,27 - 0,30; межа переходу від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації плівок становить величину $\varepsilon_{\text{пер}} \cong 0,15 - 0,30 \%$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бурик І.П. Електрофізичні властивості двокомпонентних та гетерогенних плівкових матеріалів на основі перехідних d-металів кандидата. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук: 01.04.07/ Бурик Іван Петрович .- Суми, 2011. – 155с.
2. Structure and stressed state of molybdenum layers in Mo/Si multilayers / V. I. Pinegyn, E. N. Zubarev, V. V. Kondratenko et al. // *Thin Solid Films*. – 2008. – V. 516. – P. 2973–2980.
3. Tripathi C. C. Atom beam sputtered Mo₂C films as a diffusion barrier for copper metallization / C. C. Tripathi, M. Kumar, D. Kumar // *Appl. Surf. Sci.* – 2009. – V. 225. – P. 3518–3522.
4. Amorphous Ni–Mo–P diffusion barrier deposited by non-isothermal deposition / Y.H. Chou, Y. Sung, Y.-M. Liu et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2009. – V. 203. – P. 1020–1026. 139
5. Карпенков С. Х. Материалы для магниторезистивных преобразователей / С.Х. Карпенков // *Электроника: наука, технология и бизнес*. – №2. – 2002. – С. 66–67.
6. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии : учебное пособие / Н. А. Азаренков, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк и др. – Х. : ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. – 209 с.
7. Atom beam sputtered Mo₂C films as a diffusion barrier for copper metallization / C.C. Tripathi, M. Kumar, D. Kumar // *Appl. Surf. Sci.* – 2009. – V.225. – P. 3518 – 3522.
8. Amorphous Ni–Mo–P diffusion barrier deposited by non-isothermal deposition / Chou Y.H., Sung Y., Liu Y.-M. et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2009. – V. 203. – P. 1020 – 1026.
9. Analysis of periodic Mo/Si multilayers: Influence of the Mo thickness/ Maury H., Andre J.-M., Guen K. Le et al. // *Surf. Sci.*–2009. –V.603.– P.407– 411.
10. Structure and stressed state of molybdenum layers in Mo/Si multilayers /

Pinegyn V.I., Zubarev E.N., Kondratenko V.V. et al. // *Thin Solid Films*. – 2008. – V516. – P.2973 – 2980.

11. Влияние магнитного поля на тензорезистивный эффект в аморфных сплавах на основе железа / Захаренко Н.И., Семенько М.П. // *Физика металлов и металловедение*. – 2007. – Т.104, №2. – С.150 – 154.

12. Особливості тензочутливості в плівкових матеріалах при великих статичних і динамічних деформаціях/ Забіла Є.О., Коплик І.В., Проценко І.Ю. // *Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка*. – 2003. – №10(56). – С. 63–70.

13. Методика вивчення тензорезистивних властивостей плівок Cr при відносно малих і великих деформаціях / Забіла Є.О., Проценко І.Ю. // *УФЖ* - 2005. – Т.50, №7. – С.729-736.

14. Клокова Н.П. Тензорезисторы. – М.: Машиностроение, 1990. – 222 с.

15. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / Під ред. З.Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2003. – Т.2. – 595 с.

16. Вагонов В.И. Интегральные тензопреобразователи / В.И.Вагонов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.

17. Литвин Б.Л. Фізичні методи дослідження будови органічних речовин: методичний посібник/ Литвин Б.Л. – Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет ім. В.Стефаника, 2009. – 134 с. –

18. ГОСТ 21616 – 91. Тензорезисторы. Общие технические указания. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 47с.

19. Characterization of tantalum oxynitride thin films as high-temperature strain gauge / Ayerdi I., Castano E., Garcia-Alonso A. // *Sens. Actuat.A*. – 1995. – V.46 – 47. – P. 218 – 221.

20. Ni-Ag thin films as strain-sensitive materials for piezoresistive sensors / H.Chiriac, M.Urse, F.Rusu et al. // *Sens. Actuat. A*. – 1999. – V.76. – P.376 – 380.

21. Charactericterization of sputtered nichrome (80/20 wt.%) films for strain guage applications / Kazi I.H., Wild P.M., Moore T.N. // *Thin Solid Films*. – 2006.

– V. 515. – P. 2602 - 2606.

22. The electromechanical behavior of nichrome (80/20 wt.%) film / Kazi I.H., Wild P.M., Moore T.N. // *Thin Solid Films.* – 2003. – V. 433. – P. 337 - 343.

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

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

25. Проценко І.Ю. Прилади і методи дослідження плівкових матеріалів: навчальний посібник/ Проценко І.Ю., Черноус А.М., Проценко С.І.- Суми: Вид-во СумДУ, 2007.- 264с.

26. 1.720.091. РЭ. Руководство по эксплуатации. Микроскоп электронный просвечивающий ПЕМ-125К.

27. Синдо Д.А. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия/ Д.А.Синдо, Т.В. Октава – М.: Техносфера, 2006. -256с.

28. Фелдман Л. Основы анализа поверхности и тонких пленок/ Л.Фелдман, Д. Майер– Москва: Высшая школа, 1989. – 261с.

29. Пазуха І.М. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Електронна та іонна оптика»/ І.М. Пазуха, А.О.Степаненко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2012. – 31с.

30. Structural Properties and IR-spectroscopy of Ni- and Fe-based Heterogenous Metal Films / Ivashchenko M.M., Buryk I.P., Khudenko V.M.// NAP-2016, 6 th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP)

31. Tensoresistive properties of heterogeneous film materials based on refractory metals / I.P. Buryk, L.V. Odnodvoretts // *J. Nano- Electron. Phys.* – 2009. –V. 1. – №3. – P. 20-24.

ДОДАТОК А