

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Однодворець Лариса Валентинівна



УДК 621.793.8; 316.8

**ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ І МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ
БАГАТОШАРОВИХ ТА ГЕТЕРОГЕННИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ
СЕНСОРНОЇ ТЕХНІКИ**

01.04.01– фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – заслужений діяч науки і техніки України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Проценко Іван Юхимович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри прикладної фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, доцент
Семенько Михайло Петрович,
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка,
професор кафедри фізики металів;

доктор фізико-математичних наук, професор
Дехтярук Леонід Васильович,
Харківський національний університет
будівництва та архітектури,
професор кафедри фізики;

доктор фізико-математичних наук, професор
Татаренко Валентин Андрійович,
Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова
НАН України, заступник директора з наукової
роботи.

Захист відбудеться «27» лютого 2015 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розіслано «26» січня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І. В. Чешко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Широке використання плівкових матеріалів у мікроелектроніці, спінтроніці і сенсорній техніці постійно стимулює дослідження їх фізичних властивостей та вивчення температурних і концентраційних ефектів у електрофізичних та магніторезистивних властивостях, оскільки в таких системах можуть стабілізуватися гранульовані й упорядковані тверді розчини (т. р.) та інтерметалідні фази, формуватися магнітні інтерфейси. Під впливом температури, деформації і зовнішнього магнітного поля проявляються особливості взаємодії носіїв заряду із межами поділу, магнітними моментами атомів, гранул і доменів та фононами. Встановлення особливостей впливу різних факторів на фізичні властивості багатокомпонентних і гетерогенного складу плівкових матеріалів необхідне для створення чутливих елементів (ЧЕ) сенсорів різного функціонального призначення, приладів оптоелектроніки та спінтроніки.

На сьогодні накопичений великий обсяг експериментальних результатів щодо електрофізичних (температурний коефіцієнт опору – ТКО, коефіцієнт тензочутливості – КТ) і магніторезистивних (анізотропний магнітоопір – АМО, гігантський магнітоопір – ГМО, ефект Холла) властивостей мультишарів і багатокомпонентних плівкових матеріалів на основі металевих (магнітних, немагнітних, у т. ч. тугоплавких) або напівпровідникових компонент як елементів сенсорів температури, деформації, тиску, лінійних і кутових переміщень та магнітного поля. Але при цьому актуальними залишаються питання створення більш ефективних елементів сенсорних і мікроелектронних приладів та маловивченими – проблеми стосовно механізмів і умов утворення т. р., гранульованого стану та упорядкованих інтерметалідних фаз, формування гетерогенних матеріалів, а також концентраційної, температурної і деформаційної залежностей властивостей таких систем.

Цей комплекс невирішених питань визначив напрями досліджень дисертаційної роботи та обумовив актуальність її тематики. Таким чином, із точки зору отримання результатів фундаментального характеру із перспективою їх практичного застосування актуальним завданням є проведення комплексних досліджень властивостей багатошарових і гетерогенних матеріалів на основі металевих або напівпровідникових плівок та фізичних процесів у них з урахуванням температурних і концентраційних ефектів, що визначило мету цього дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету. Основні результати отримані у ході виконання завдань науково-дослідних робіт і спільних проєктів: держбюджетної теми «Електрофізичні властивості багатошарових плівок в умовах взаємної дифузії елементів» (1997–1999 рр.), № 197U016610, виконавець; держбюджетної теми «Вплив статичної деформації і температури на електрофізичні властивості багатошарових плівкових систем» (2003–2005 рр.), № 0103U000773, виконавець; спільного проєкту науково-технічного співробітництва «Дифузійні процеси і транспортні

властивості мультишарів і тонких плівок» (2004–2005 рр.) між Сумським державним університетом (СумДУ) та Інститутом ядерної фізики ПАН (м. Краків, Польща), договір № М/18-2004 від 29.03.2004 р., виконавець; спільного проекту науково-технічного співробітництва «Дифузійні процеси і стабільність інтерфейсів в металевих багатошарових системах» (2006–2007 рр.) між СумДУ та Інститутом фізики САН (м. Братислава, Словаччина), договір № М/148-2006 від 07.06.2006 р., виконавець; держбюджетної теми «Формування кристалічної структури і електрофізичних властивостей плівкових матеріалів на основі багатошарових металевих наносистем» (2006–2008 рр.), № 0106U001942, виконавець; спільного проекту науково-технічного співробітництва «Формування кристалічної структури і фізичних властивостей багатошарових плівкових систем із спін-залежним розсіюванням електронів» (2008–2009 рр.) між СумДУ та Інститутом фізики САН (м. Братислава, Словаччина), договір № М/38-2008 від 27.03.2008 р., відповідальний виконавець; спільного проекту науково-технічного співробітництва «Електрофізичні властивості (температурний коефіцієнт опору і тензочутливість) багатошарових плівкових систем Cr/Fe і Gd/Fe» (2008–2010 рр.) між СумДУ та Університетом Барода (м. Вадодара, Індія), договір № М/344–2008 від 23.05.2008 р., відповідальний виконавець; держбюджетної теми «Фазовий склад, електро- і магніторезистивні властивості плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів» (2009–2011 рр.), № 0109U001387, керівник групи виконавців; спільного проекту науково-технічного співробітництва «Кристалічна структура, електрофізичні і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових систем на основі Fe і Pt та Fe і Pd» (2009–2010 рр.) між СумДУ та Інститутом фізики при Університеті ім. Й. Гуттенберга (м. Майнц, Німеччина), договір № М/178-2009 від 08.04.2009 р., виконавець; держбюджетної теми «Фазовий склад, електро- і магніторезистивні властивості плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів» (2009–2011 рр.), № 01090U001387, керівник групи виконавців; держбюджетної теми «Електрофізичні властивості багатокомпонентних плівок на основі Fe і Pd, Ag, Au та Ge» (2011–2012 рр.), № 0111U006336, керівник; спільного проекту науково-технічного співробітництва «Фазові перетворення, дифузійні процеси і магніторезистивні властивості мультишарів на основі Fe і Pd, Pt або Ag» (2013–2014 рр.), № М/362–2012 від 20.05.2012 р. між СумДУ та Університетом Барода (м. Вадодара, Індія), відповідальний виконавець; держбюджетної теми «Електрофізичні і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів» (2012–2014 рр.), № 0112U001381, виконавець.

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи – експериментальне і теоретичне вивчення узагальнюючого характеру електрофізичних та магніторезистивних властивостей чутливих елементів плівкових сенсорів температури, деформації і магнітного поля та фізичних процесів у них; установлення кореляції між фізичними властивостями плівкових матеріалів та їх структурно-фазовим станом і особливостями процесів розсіювання електронів провідності на зовнішніх та внутрішніх межах поділу і фононах.

Відповідно до поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- розробити методикку формування багат шарових плівкових систем на основі Fe і Pd, Pt, Ag, Gd або Ge; гетерогенних матеріалів на основі Ni, Mo, W, Re та їх хімічних сполук і плівкових т. р., у т. ч. гранульованих та впорядкованих;
- вивчити особливості структурно-фазового стану багат шарових плівкових матеріалів на основі магнітних і немагнітних компонент;
- розробити і провести апробацію напівфеноменологічної моделі тензорезистивних властивостей багат шарових плівкових систем в області пружної деформації із урахуванням деформаційної залежності не лише середньої довжини вільного пробігу (СДВП) електронів, а й коефіцієнтів, які визначають характер взаємодії носіїв заряду із зовнішніми поверхнями (p), інтерфейсами (Q) та межами зерен (r) плівок;
- узагальнити результати теоретичних і експериментальних досліджень особливостей тензорезистивного ефекту в багат шарових плівкових системах;
- провести комплексні дослідження електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей ЧЕ сенсорів в умовах дії розмірного, температурного та концентраційного ефектів із точки зору підвищення їх чутливості, стабільності параметрів та отримання оптимальних значень ТКО, КТ і МО;
- дослідити вплив розмірного фактора на високотемпературне електрон-фононне розсіювання в плівках Pd, Pt, Ag, Cr і Mo;
- проаналізувати вплив зовнішнього магнітного поля на ТКО гранульованих плівкових сплавів у рамках феноменологічного підходу.

Об'єкт дослідження – дифузія, фазоутворення й електронні процеси розсіювання в плівкових матеріалах, сформованих у вигляді багат шарових і гетерогенного складу систем, гранульованих і впорядкованих твердих розчинів, як чутливих елементів сенсорів температури, деформації і магнітного поля та їх взаємозв'язок із фізичними властивостями.

Предмет дослідження – електрофізичні, магніторезистивні та магнітооптичні властивості плівок на основі магнітних і немагнітних компонент та гетерогенних матеріалів в умовах прояву розмірних, температурних і концентраційних ефектів та процесів фазоутворення.

Методи досліджень. Для формування плівкових матеріалів та їх термообробки у вакуумі використовувалася пошарова та одночасна конденсація методом резистивного і електронно-променевого випаровування. Для дослідження розмірних і температурних залежностей ТКО, КТ і МО були застосовані автоматизовані комплекси, в т. ч. і у варіанті віддалено-контрольованої лабораторної установки. Дифракційні та структурні дослідження проводилися методами електроннографії, рентгенографії, електронної мікроскопії; дифузійні процеси вивчалися методами вторинно-іонної мас-спектрометрії (ВІМС) та енергодисперсійного аналізу (ЕДА); магнітооптичні властивості – методом магнітооптичного ефекту Керра (МОКЕ) та комп'ютерної обробки експериментальних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Уперше запропонована напівфеноменологічна модель для тензоефекту багат шарових плівкових матеріалів, у якій коректно враховується деформаційна залежність не лише СДВП електронів, а й коефіцієнтів дзеркальності зовнішніх поверхонь і проходження меж зерен та інтерфейсів, зміна яких впливає на величину КТ і опосередковано також на величину СДВП.

2. Установлено, що у багат шарових плівкових матеріалах і плівкових сплавах на основі Ni і Cr, Co і Cr та Fe і Pd або Pt при певній концентрації атомів магнітної компоненти спостерігаються підвищені значення величини КТ від 12 до 22 одиниць ($c_{Ni} \cong 80\text{--}85$ ат.%; $c_{Co} \cong 70$ ат.% і $c_{Fe} \cong 45\text{--}55$ ат. %).

3. Детально вивчені електрофізичні і магніторезистивні властивості, процеси твердофазного синтезу та упорядкування атомів у плівкових матеріалах на основі Fe і Pd або Pt, що дозволило установити умови формування т. р. і упорядкованих фаз та реалізації ефектів АМО і ГМО.

4. На прикладі багат шарових і двокомпонентних плівкових матеріалів на основі ГЦК-(Ni, Cu, Pd, Pt, Ag), ОЦК-(Fe, Cr, Mo, W) та гексагональних (Co, Gd, Re) металів експериментально вивчені розмірні (загальна товщина зразків від 5 до 120 нм), температурні (інтервал термовідпалювання $T_b = 300\text{--}900$ К) і концентраційні (загальна концентрація атомів магнітної компоненти від 15 до 85 ат.%) ефекти в тензочутливості різних видів плівкових матеріалів із урахуванням типу деформації, структурного стану і процесів фазоутворення; це може бути методологічною основою розроблення ЧЕ сенсорів деформації.

5. Уперше на феноменологічному рівні проаналізовано питання про чутливість ТКО до зовнішнього магнітного поля в гранульованих плівкових матеріалах і встановлено, що в розбавлених т. р. ТКО гранульованого сплаву визначається їх питомим опором, у той час як у перенасичених т. р. може реалізуватися система високоомного і низькоомного спінових каналів і внесок т. р. у загальну величину ТКО буде незначним; в області проміжних концентрацій магнітної компоненти чутливість ТКО до магнітного поля має сталу величину.

6. Установлена кореляція між електрофізичними властивостями плівкових конденсатів та їх електронним складом, яка свідчить, що величина ТКО суттєво залежить від концентрації (s + d) електронів і дорівнює $(1\text{--}2) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (магнітні метали); $(2\text{--}3,5) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (немагнітні метали) і $(3\text{--}4) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (благородні метали), у той час як величина КТ (від 2 до 3 од.) у рамках точності експерименту не залежить від вказаної концентрації електронів.

7. Уперше на прикладі плівок Pd, Pt, Ag, Cr і Mo розрахований ефективний параметр високотемпературної електрон-фононої взаємодії, і зроблено висновок, що підсилення цієї взаємодії при зменшенні товщини плівок є результатом конкуренції двох механізмів – деформації фононного спектра і прояву класичного розмірного ефекту (поверхневе розсіювання електронів).

8. Уперше показано, що у плівкових матеріалах на основі Fe і Ge, отриманих пошаровою конденсацією з подальшим відпалюванням від 300 до 1070 К, відбувається формування термостабільних (ТКО $\sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$) фаз германідів заліза FeGe_x ($1 \leq x < 2$) по всьому об'ємі зразка з амплітудою магнітоопору 0,35–0,44 %.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Реалізований комплексний підхід щодо вивчення взаємного зв'язку між фізичними процесами у багатошарових і гетерогенних плівкових матеріалах на основі магнітних, немагнітних, у т. ч. тугоплавких, металів і напівпровідникових компонент як чутливих елементів сенсорів, які отримані методом пошарової або одночасної конденсації, та їх електрофізичними, магніторезистивними і магнітооптичними властивостями, що дозволило установити умови формування матеріалів із високою чутливістю до деформації, температури або магнітного поля з високою температурною стабільністю.

2. Сукупність експериментальних результатів стосовно фізичних процесів (дифузія, фазоутворення, механізми розсіювання електронів та ін.), факторів (тиск газів залишкової атмосфери, температура, деформація) і параметрів (коефіцієнти тензочутливості, чутливість до деформації) різних типів плівкових матеріалів, які визначають характер розмірної, температурної і концентраційної залежностей КТ у максимально широких робочих діапазонах температури, концентрації та деформації, має характер завершеності досліджень тензоефекту в тонких плівках.

3. Базова ідея про деформаційну залежність параметрів електроперенесення в теоретичній моделі тензоефекту була успішно використана іншими авторами при розробці концептуально подібної моделі для термічного коефіцієнта опору багатошарових плівкових систем, що має фундаментальне значення для розвитку фізики тонких плівок.

4. Результати досліджень фазового складу та магніторезистивних властивостей плівок метал/напівпровідник як матеріалів сенсорних і контактних структур дозволяють установити, при застосованих методах конденсації, умови формування стабільних магнітних фаз германідів металів, які можуть бути застосовані як елементи сенсорів магнітного поля і омичні контакти інтегральних мікросхем.

5. Проведений аналітичний аналіз впливу зовнішнього магнітного поля на ТКО дозволяє прогнозувати електрофізичні властивості гранульованих плівкових матеріалів у широкому діапазоні концентрації магнітної компоненти (від розбавлених до перенасичених гранульованих т. р.).

6. Здійснена класифікація плівкових матеріалів з точки зору їх практичного застосування в сенсорній техніці та встановлено, що високу температурну стабільність і підвищені значення коефіцієнта тензочутливості мають двошарові плівки на основі Fe, Ni, Cr і Mo, плівки гетерогенного складу на основі Fe або Re та германідів Fe і плівкові матеріали на основі Co і Ag (термостійкі елементи сенсорів різного функціонального призначення), у той час як висока чутливість до температури і магнітного поля має місце в мультишарах на основі Fe і Pd або Pt, двошарових плівках на основі Ni і Cr та плівках гетерогенного складу на основі Mo або W (терморезистори, високочутливі елементи сенсорів температури і магнітного поля).

Особистий внесок здобувача полягає в ініціюванні проведення досліджень електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей, дифузійних процесів та структурно-фазового стану матеріалів сенсорів. У всіх роботах автор запропонувала методики досліджень і вибрала методи вирішення поставлених завдань. Отримані результати обговорювалися і узагальнювалися разом із науковим консультантом – проф. Проценком І. Ю. Наведені у роботі результати отримані як особисто автором, так і при співпраці з колегами (проф. Черноус А. М., проф. Проценко С. І., проф. Непійко С. О., доц. Великодний Д. В.) та аспірантами (Бурик І. П., Ткач О. П., Власенко О. В., Пилипенко О. В.) під її керівництвом. Особисто автором підготовлені статті [3, 5, 10, 21, 23, 27, 59]; підрозділи 2.1, 2.2 і 3.3 в [1]; підрозділи 1.2, 3.3, 5.1, 5.3–5.5 в [53]; підрозділ в [2]; розділи 2 і 6 в [54]; підрозділи 1.1, 1.5 і 2.5 в [55], окремі розділи у статтях [4, 6–9, 11–20, 22, 24, 28, 56–58, 60] і тези доповідей [25, 26, 29, 30, 32, 34, 39, 43, 47, 49, 52]. Усі наукові положення і висновки, винесені на захист, належать автору дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи були представлені на конференціях, симпозіумах, асамблеях і семінарах, зокрема: Міжнародному симпозіумі «Diffusion and diffusional phase transformation in alloys» (м. Черкаси, 1998 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Україна наукова» (м. Дніпропетровськ, 2003 р.); Міжнародній конференції з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (м. Львів, 2004, 2009, 2011, 2014 рр.); Міжнародних конференціях «Фізика і технології тонких плівок і наносистем» (м. Івано-Франківськ, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013 рр.); 7-й, 8-й Міжнародних конференціях «Фізичні явища в твердих тілах» (м. Харків, 2005, 2007, 2011, 2013 рр.); Міжнародній конференції «Сучасні проблеми фізики твердого тіла» (м. Київ, 2007, 2008 рр.); XIX Міжнародному симпозіумі «Тонкие пленки в оптике, нанофотонике и наноэлектронике» (м. Харків, 2007 р.); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (м. Одеса, 2008 р.); Харківській нанотехнологічній Асамблеї (м. Харків, 2007, 2008 р.); Workshop on «Smoothing & Characterization of Magnetic Films for Advanced Devices» (м. Краків, Польща, 2007 р.); XLII, XLVI Zakopane School of Physics (м. Краків, Польща, 2008, 2011 рр.); Міжнародних конференціях «Werhandlungen Ф» (м. Дрезден, Німеччина, 2009, 2013 рр.); Міжнародній конференції «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- і наноструктур» (м. Харків, 2009, 2010, 2012 рр.); International Workshop «Magnetic phenomena in micro- and nanostructures» (м. Донецьк, 2010 р.); II Міжнародній конференції «Сучасні проблеми фізики конденсованого стану» (м. Київ, 2010 р.); Міжнародній конференції «Nanomaterials: Applications & Properties» (м. Алушта, 2011–2013 рр.; м. Львів, 2014 р.); Науково-технічних конференціях «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2011–2014 рр.); Міжнародній конференції «Clusters and Nanostructured Materials CNM-3'2012» (м. Ужгород, 2012 р.); 47-й

Міжнародній конференції Асоціації мікроскопії (м. Сафед, Ізраїль, 2013 р.) і 6-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології» (м. Одеса, 2014 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображені у 60 публікаціях: 26 статтях у провідних фахових журналах і збірниках наукових праць, у т. ч. 4 оглядах і 14 працях у виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus; главі у книзі видавництва «Springer»; колективній монографії; 4 статтях у матеріалах конференцій; 3 навчальних посібниках і 25 тезах доповідей на конференціях, більшість з яких були представлені автором особисто.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається із вступу, шести розділів оригінальних досліджень, висновків та списку використаних джерел. Вона містить 347 сторінок, із них 212 сторінок основного тексту, 135 рис. і 38 табл., у тому числі 95 рис. і 33 табл. на окремих 74 аркушах, список використаних джерел із 485 найменувань на 55 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні завдання досліджень, визначені новизна і практичне значення отриманих результатів, вказаний зв'язок роботи з науково-дослідними роботами і міжнародними проектами науково-технічного співробітництва, наведені відомості про апробацію отриманих результатів, визначені методи досліджень, особистий внесок здобувача та структура роботи.

У **першому розділі** «Властивості плівкових матеріалів сенсорної техніки та фізичні процеси в них (літературний огляд)» представлений огляд літературних даних стосовно електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей багатокомпонентних і гетерогенних плівкових матеріалів. Зокрема, у *першому підрозділі* розглянуті питання щодо кристалічної структури і фазового складу мультишарів і двокомпонентних плівкових матеріалів на основі феромагнітних (Co, Fe, Ni, Gd), антиферомагнітних (Cr), немагнітних (Mo, W і Re) або напівпровідникових (Ge) компонент. Підкреслено, що маловивченими залишаються механізми і умови утворення т. р. і гранульованих плівкових сплавів та плівок гетерогенного складу. Розглянуті температурні і концентраційні залежності електрофізичних властивостей гетерогенних плівкових матеріалів на основі металів (нітриди, карбіди, оксиди і т. п.), які завдяки високій температурній стійкості можна використовувати для формування елементів інтегральних мікросхем з можливістю прогнозування робочих характеристик приладу. Представлені експериментальні температурні залежності питомого опору і коефіцієнта тензочутливості для плівок при різних концентраціях атомів феромагнітного металу. Значна увага приділяється аналізу циклу наукових праць Хровата М. та ін., що містять результати рентгеноструктурних і електронно-мікроскопічних досліджень та дозволяють узагальнити інформацію про термо- і тензорезистивні властивості гетерогенних матеріалів резисторів, та результатів робіт наукової групи Татаренка В. А., в яких розроблено загальну концепцію механізмів упорядкування в термостабільних бінарних

нанокристалічних сплавах і теоретично доведено, що їх фізико-механічні властивості істотно залежать від концентрації атомів окремих компонент і режимів термічної обробки.

У другому підрозділі систематизовані та узагальнені результати робіт останніх років стосовно величини тензометричних і механічних параметрів одно- і багат шарових плівкових матеріалів на основі перехідних металів. Вказано, що додаткове збільшення КТ у багат шарових системах можна отримати за рахунок застосування компонент із тугоплавких металів. Проведено аналіз теоретичних моделей для ТКО, запропонованих Тельє К., Тоссе А. і Пішар К. (лінеаризована та ізотропного розсіювання) та Дімміхом Р. (модель для ТКО двошарових плівок з урахуванням зерномежового і поверхневого розсіювання електронів), які, в принципі, дозволяють прогнозувати електрофізичні властивості плівкових матеріалів.

У третьому підрозділі розглянуті магніторезистивні та гальваномагнітні властивості двокомпонентних і гетерогенних плівок. Розглянуті можливі варіанти плівкових матеріалів, у яких виникає ефект ГМО, а саме: мультишарів, гранульованих плівкових матеріалів, спін-вентильних структур, упорядкованих плівок типу феромагнетик/благородний метал та відповідні польові, розмірні і концентраційні залежності МО. Крім того, розглянуті результати циклу робіт Захаренка М. І. і Семеняка М. П. стосовно закономірностей змін електроопору, магнітоопору і тензочутливості бінарних і багатокомпонентних систем на основі 3d-металів; конкретизації фізичних механізмів розсіювання носіїв заряду і розроблення фізичних моделей, що описують транспортні параметри невпорядкованих металевих систем різної природи; вивчення впливу складу, умов отримання і впливу зовнішніх факторів на кінетику електронів провідності. Наведені основні співвідношення моделі Тельє К. і Тоссе А. для розмірного ефекту в МО полікристалічних плівок. Розглянуті варіанти конструкцій чутливих елементів сенсорів деформації і магнітного поля на основі плівок і наночастинок. Здійснено стислий аналіз можливості застосування методики МОКЕ при вивченні структурних і функціональних особливостей плівкових матеріалів.

Грунтуючись на результатах аналізу літературних даних, відзначені маловивчені проблеми у напрямі досліджень термо-, тензо- і магніторезистивних властивостей сенсорних плівкових матеріалів.

У другому розділі «Методика формування чутливих елементів плівкових сенсорів та дослідження їх властивостей і характеристик» сформульовані етапи та основні завдання досліджень, описані методи і методики, що використовувалися в роботі. Основна увага приділена методикам отримання одно- і багат шарових, гетерогенних матеріалів та мультишарів у високому та надвисокому вакуумі для вивчення їх електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей.

Плівкові матеріали формувалися методами пошарової та одночасної з двох джерел конденсації шляхом варіювання її швидкості, температури підкладки і температури відпалювання. Випаровування проводилося електронно-променевим (Co, W, Mo, Re) та терморезистивним (Fe, Ni, Cr, Ag, Pd, Pt, Gd,

Ge) методами. Товщина окремих шарів (d) варіювалась від 10 до 100 нм (для одно- і багат шарових та гетерогенного складу плівок) та від 1 до 10 нм (для мультишарів).

Описані автоматизовані комплекси для дослідження термо- і магніторезистивних властивостей у вакуумі та вивчення тензоефекту в області пружної і пластичної деформації; метод електронно-мікроскопічного аналізу для вивчення структури і процесів фазоутворення (просвітлювальний електронний мікроскоп ПЕМ-125К, рентгенівський дифрактометр PANalytical X'Pert Powder); методи ВІМС і ЕДА для дослідження дифузійних процесів і визначення концентрації окремих компонент системи (прилади МС-7201М і РЕММА-102); методики вимірювання МО, ефекту Холла і МОКЕ на базі СумДУ та Інституту фізики Університету ім. Й. Гуттенберга (м. Майнц, Німеччина).

Для ілюстрації можливостей методів і методик досліджень наведені приклади найбільш характерних температурних та деформаційних залежностей опору, на основі яких проводився розрахунок ТКО і КТ; мікрознімків, отриманих методом ПЕМ, електронограм і рентгенівських дифрактограм.

Третій розділ «Узагальнення експериментальних і теоретичних результатів досліджень тензорезистивного ефекту в плівкових матеріалах» складається із трьох підрозділів. У цьому розділі узагальнені результати теоретичних і експериментальних досліджень тензорезистивного ефекту в області пружної і пластичної деформацій для різних типів металевих чутливих елементів, що дало можливість установити практично всі фізичні процеси і фактори, які обумовлюють розмірну, температурну і концентраційну залежності КТ, впливу на їх величину структурно-фазового стану і дифузійних процесів, типу та інтервалу деформацій, і, значною мірою, говорити про завершеність жлсліджень у цій проблемі фізики та технології тонких плівок.

У *першому підрозділі* проаналізовані особливості тензорезистивних властивостей металевих плівкових матеріалів в області пружної і пластичної деформації. У зв'язку з відсутністю коректних та послідовних напівкласичних моделей для розмірного ефекту тензочутливості було запропоновано ряд макроскопічних і напівфеноменологічних моделей для інтерпретації експериментальних результатів.

На рис. 1 наведені приклади типових розмірних залежностей середньої величини КТ (γ_l) для одношарових металевих плівок Мо, W, Re, Fe, Ni і Cr. При зростанні товщини величина КТ поступово зменшується і асимптотично виходить на значення КТ для масивних полікристалічних зразків $\gamma_{gl} = \lim_{d \rightarrow \infty} \gamma_l$.

Експериментальні дослідження свідчать про те, що, починаючи із III–V деформаційних циклів, ці процеси завершуються, і γ_l залежить лише від товщини незалежно від номера деформаційного циклу.

Кількісною характеристикою впливу релаксаційних процесів на величину КТ може бути відношення γ_l^I / γ_l^V , яке для $d \cong 50$ нм має такі значення: $\gamma_l^I / \gamma_l^V = 4,2$ (Мо); 3,3 (W); 4,3 (Re); 3,2 (Ni); 3,6 (Cr) і 2,8 (Fe).

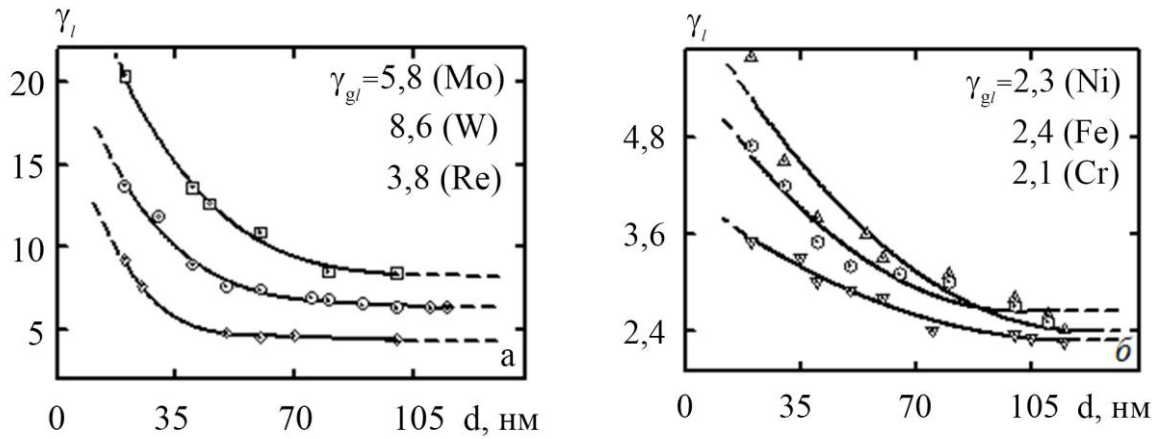


Рис.1. Розмірні залежності середнього коефіцієнта поздовжньої тензочутливості для плівок: \circ – Mo, \square – W, \diamond – Re (a); ∇ – Cr, \triangle – Ni, \odot – Fe (б)

Для розглянутих одношарових плівок γ_l^I / γ_l^V монотонно зменшується при збільшенні товщини. Деяке відхилення від цього правила пов'язане з тією обставиною, що в широкому інтервалі товщин зразки із відносно малою товщиною деформувалися пружно, а з відносно великою – досліджувалися в області квазіпружної або пластичної деформації.

Для визначення можливості застосування плівок як чутливих елементів сенсорів була визначена чутливість питомого опору плівок до деформації – робочий параметр сенсорів деформації і тензорезисторів. Середня величина γ_l^ρ визначалася початковим питомим опором $\rho(0)$ та чутливістю до деформації (S_ρ): $\gamma_l^\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta\varepsilon_l} = \frac{S_\rho}{\rho}$, де $\Delta\rho = \rho(\varepsilon_l) - \rho(0)$, а $\rho(0)$ і $\rho(\varepsilon_l)$ – питомий опір плівки за відсутності та наявності деформації ε_l відповідно.

Вираз для чутливості питомого опору плівок до деформації має такий вигляд:

$$S_\rho = S_0^\rho + S_d^\rho + S_{gb}^\rho, \quad (1)$$

де S_0^ρ , $S_d^\rho = \gamma_l^\rho \rho - \gamma_{gl}^\rho \rho_g$ і $S_{gb}^\rho = \gamma_{gl}^\rho \rho_g - \gamma_{l0}^\rho \rho_0$ – внесок у чутливість до деформації об'ємного фонованого, поверхневого і зерномежового розсіювання електронів відповідно.

Результати розрахунків γ_l^ρ і S_ρ для одношарових металевих плівок (табл. 1) для області пружної деформації свідчать на те, що їх деформаційна чутливість визначається в основному доданком, пов'язаним із зерномежовим розсіюванням електронів. Установлено, що чутливість до деформації плівок тугоплавких металів (Mo, W та Re) в 6–10 разів більша, ніж плівок Ni, Fe та Cr, та має значення $6,3 \cdot 10^{-7}$; $11,5 \cdot 10^{-7}$ і $12,4 \cdot 10^{-7}$ Ом·м/% відповідно.

На рис. 2 наведені серії типових деформаційних залежностей $\Delta R/R$ від ε_l , де $\frac{\Delta R}{R} \equiv \frac{R(\varepsilon_l) - R(0)}{R(0)}$, для плівок Cr і Pd у двох деформаційних інтервалах

Порівняння чутливостей плівок при пружній та пластичній деформації

Плівка (товщина, нм)	$\varepsilon_{Inep}, \%$	$S^p \cdot 10^7, \text{ Ом} \cdot \text{м}/\%$		$\frac{S_{пл}^p}{S_{пр}^p}$
		пружна деф.	пластич. деф.	
Mo(20)/П	0,22	33,8	60,8	1,8
Mo(60)/П	0,15	21,2	27,6	1,3
Ni(20)/П	0,29	17,5	22,8	1,3
Ni(50)/П	0,15	4,5	5,4	1,2
Cr(20)/П	0,15	12,1	19,4	1,6
Cr(50)/П	0,15	6,3	13,7	2,2
Pd(18)/П	0,52	10,2	16,4	1,6
Pd(30)/П	0,30	4,1	5,0	1,2
Pd(5)/Fe(5)/П	0,28	3,6	7,6	2,1
Pd(10)/Fe(20)/П	0,48	2,8	5,0	1,8
Ni(20)/Mo(20)/Ni(20)/П	0,15	23,6	54,3	2,3
Mo(20)/Ni(20)/П	0,22	22,3	46,8	2,1
Mo(20)/Ni(30)/П	0,22	17,9	41,2	2,3

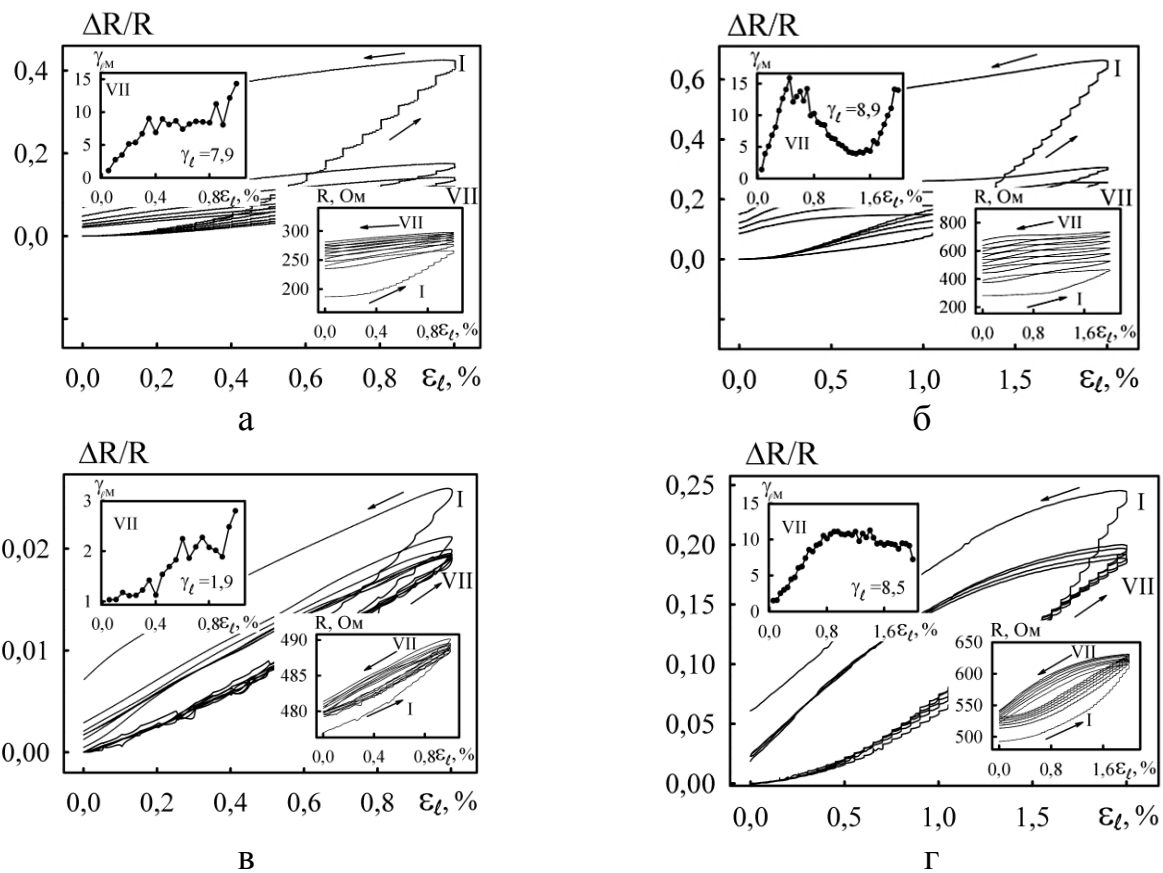


Рис.2. Залежності $\Delta R/R$, γ_i і R від ε_i для $\Delta\varepsilon_{i1} = 0 - 1 \%$ (а, в) і $\Delta\varepsilon_{i2} = 0 - 2 \%$ (б, г) для плівок Cr(30)/П (а, б) і Pd(30)/П (в, г). П – підкладка. Тут і далі в дужках вказана товщина в нм

$\Delta\varepsilon_{l1} = 0-1\%$ і $\Delta\varepsilon_{l2} = 0-2\%$. На вставках таких рисунків тут і далі представлені залежності миттєвого значення γ_{lm} і R від ε_l та середня величина γ_l , яка отримана шляхом усереднення залежності γ_{lm} від ε_l .

Зазначено, що певні труднощі при інтерпретації отриманих результатів пов'язані з тим, що на величину γ_l починає впливати перехід плівки до стану квазіпружної чи пластичної деформації. Більш коректним було б порівняння γ_l для областей пружної деформації, а також γ_l при загальній деформації $\Delta\varepsilon_{l1} = 0-1\%$ та $\Delta\varepsilon_{l2} = 0-2\%$, що дозволило б дати повну характеристику досліджуваних процесів. Перехід від пружної до пластичної в плівках Mo і Fe фіксується при $\varepsilon_{lпер} \cong 0,22$ і $0,30\%$ відповідно. У той самий час в одношарових плівках W і Re деформація переходу лежить за межами $\varepsilon_l \cong 1\%$. Для більшості випадків характер деформаційних залежностей опору плівок зберігається на всьому досліджуваному інтервалі товщин.

Наведені нові результати, пов'язані з дослідженням тензорезистивних властивостей багатошарових плівок на основі металів в області пластичної деформації ($\varepsilon_l > 1\%$). Їх актуальність випливає безпосередньо із аналізу літературних джерел останніх років, присвячених різним ефектам пружної і пластичної деформації нанокристалічних плівкових матеріалів: мікроструктурні, поверхневі, геометричні, зерномежові та споріднені ефекти; розмірні ефекти при пружній або пластичній деформації матеріалів; механічні властивості тонких плівок.

У багатошарових плівкових системах величини КТ визначаються кількістю шарів, загальною товщиною системи і величиною КТ окремих шарів. Крім того, при певній концентрації магнітної компоненти фіксуються максимальні значення КТ (від 10 до 20 одиниць). Дослідження тензорезистивних властивостей двокомпонентних систем на основі Mo і Ni, Mo і Fe та Ni і Cr у вигляді дво- або тришарових плівок і плівкових сплавів із методологічної точки зору стали продовженням пошуків шляхів підвищення КТ, а застосування термостійких компонентів – збільшення інтервалу робочих температур.

При переході від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації, який спостерігається при $0,15-0,30\%$, фіксується збільшення деформаційної чутливості питомого опору до 2-3 разів, що показано на прикладі одно- і багатошарових плівок (табл. 1). На рис. 3 наведені приклади деформаційних залежностей для плівок Fe і Gd/Fe/П, що ілюструють пружну або квазіпружну (рис. 3 а, б) і пластичну (рис. 3 в) деформацію. Під час дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів гетерогенного складу отримано, що величина КТ дорівнює близько 8 одиниць для плівок $Re(N,O)_x$ і 4 одиниць – для $Mo(C,N)_x$, де $x \cong 1$ для обох фаз. У випадку систем ОЦК-Fe/a-Mo і ОЦК-Fe/a-Mo/ОЦК-Fe (a – аморфна фаза) при загальній товщині зразків 40 і 60 нм величина КТ дорівнює 10 одиниць (двошарові системи) і 12 одиниць (тришарові системи). Результати наших досліджень тензоефекту в плівкових матеріалах можна узагальнити таким чином. По-перше, в усіх випадках величина КТ для багатошарової системи має більшу величину, ніж КТ для одношарової плівки тих металів, які є компонентами багатошарової такої ж

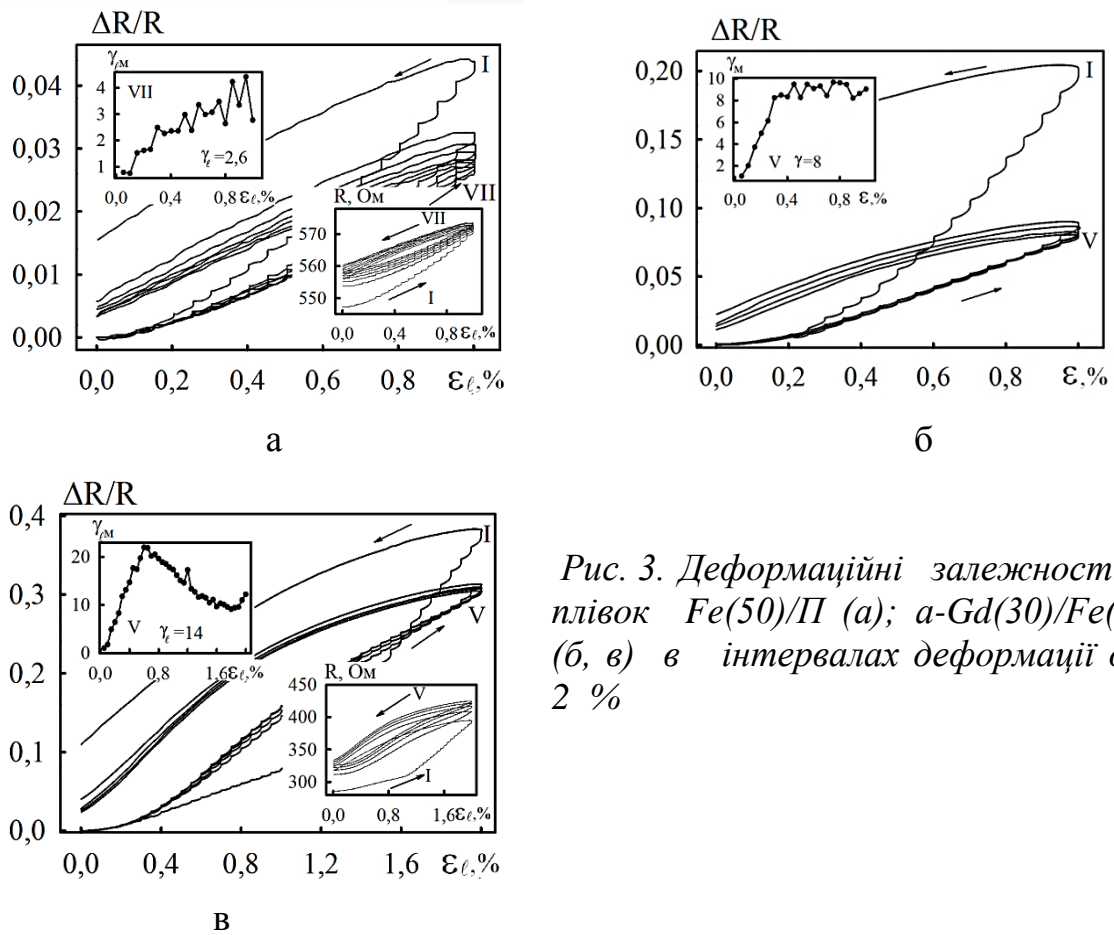


Рис. 3. Деформаційні залежності для плівок Fe(50)/П (а); a-Gd(30)/Fe(50)/П (б, в) в інтервалах деформації до 1 і 2 %

товщини, як і загальна товщина плівки. По-друге, плівкові системи, в яких утворюється т. р. по всьому об'єму (наприклад, системи на основі Fe і Pd, Pt, Ag або Cr) можуть бути використані як високотемпературні чутливі елементи сенсорів деформації, оскільки розшарування їх компонент відбувається при відносно високих температурах. По-третє, плівкові системи, в яких зберігається індивідуальність окремих шарів, можуть бути використані як чутливі елементи в інтервалі проміжних або високих температур, оскільки вони мають підвищені значення КТ порівняно з одношаровими плівками, і водночас – обмежений ресурс роботи при підвищених температурах у результаті протікання дифузійних процесів. І на завершення, плівкові системи, в яких біля інтерфейсів локалізуються т. р. або інтерметаліди, не можуть бути ефективними чутливими елементами, оскільки подальші процеси дифузії або фазоутворення будуть спричиняти нестабільність їх робочих характеристик.

У другому підрозділі розглянуті особливості фазового складу і дифузійних процесів двокомпонентних матеріалів на основі металів (двошарових плівок і плівкових сплавів).

На рис. 4 наведені мікроструктура і відповідні електронограми від плівкових систем Ni(20)/a-Mo(20) і Fe(30)/a-Mo(30)/П, а в табл. 2 – розшифрування електронограми від плівки Ni(20)/Cr(20)/П. Установлено, що фазовий склад плівок на основі ГЦК-Ni і ОЦК-Cr або аморфного a-Mo та ОЦК-Fe і a-Mo, отриманих методом пошарової конденсації з подальшим відпалюванням до $T_b \cong 750$ К, відповідає т.р. (Ni, Cr) + ОЦК-Cr (при відносно великих товщинах

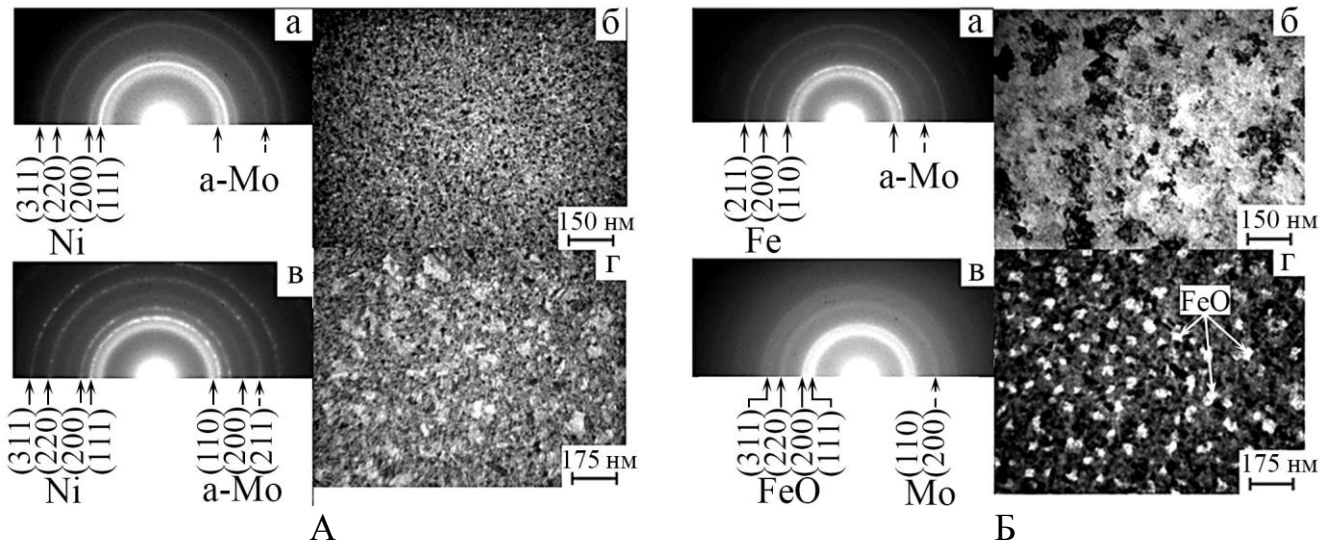


Рис.4. Електронограми і кристалічна структура від плівок Ni(20)/a-Mo(20)/П (А) і Fe(30)/a-Mo(30)/П (Б): а, б - після конденсації; в, г - відпалених до 750 К

Таблиця 2

Розшифрування електронограм від плівкової системи Ni(20)/Cr(20)/П

№	I, в.о.	d_{hkl} , нм	hkl	a, нм	Фаза	\bar{a} , нм
невідпалений зразок						
1	Д.С.	0,205	110 111	0,289 0,355	ОЦК-Cr ГЦК-Ni	Фазовий склад: двошарова система на основі ГЦК-Ni і ОЦК-Cr \bar{a} (Ni) = (0,354 ± 0,002) нм, \bar{a} (Cr) = (0,289 ± 0,001) нм
2	сер.	0,176	200	0,352	ГЦК-Ni	
3	д.сл.	0,145	200	0,290	ОЦК-Cr	
4	сер.	0,126	220	0,356	ГЦК-Ni	
5	сер.	0,107	311	0,355	ГЦК-Ni	
відпалений зразок						
1	д.сл.	0,248	110	0,496	Cr ₂ O ₃ (?)	Фазовий склад: евтектика на основі ГЦК(Ni) і ОЦК(Cr) \bar{a} (Ni) = (0,356 ± 0,001) нм, \bar{a} (Cr) = (0,289 ± 0,001) нм a_0 (Cr ₂ O ₃) = 0,494 нм
2	Д.С.	0,205	110 111	0,289 0,355	(Cr) (Ni)	
3	сер.	0,178	200	0,356	(Ni)	
4	сл	0,145	200	0,290	(Cr)	
5	сер.	0,126	220	0,356	(Ni)	
6	сер.	0,107	311	0,355	(Ni)	

Д.С. – дуже сильна; сер. – середня; сл. – слабка; д.сл. – дуже слабка

Cr) + сліди Cr₂O₃; ГЦК-Ni + ОЦК-Mo і ОЦК-Fe + ОЦК-Mo + ГЦК-FeO відповідно. При конденсації плівок Re із швидкістю, меншою за 0,1 нм/с, і температурою підкладки до 400 К стабілізується домішкова фаза, хімічний склад якої відповідає ГЦК оксинітриду Re(O,N)_x. При відпалюванні цих плівок до 800 К особливих структурних змін не відбувається, хоча параметр ГЦК-решітки зменшується від 0,407 до 0,404 нм. Таке зменшення пояснюється частковим збідненням окремих кристалітів Re(O,N)_x на атоми азоту (на рис. 5 ці

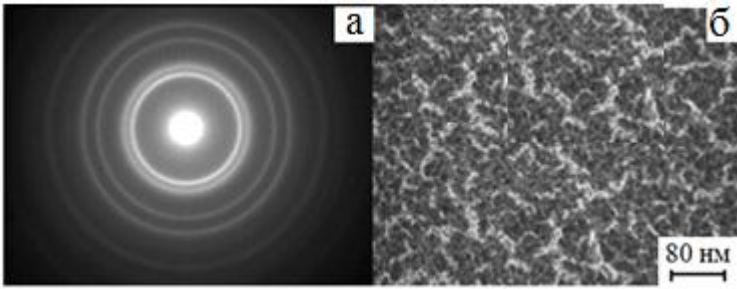


Рис. 5. Електронограма (а) і відповідна мікроструктура (б) від плівки $Re(N,O)_x$ після відпалювання до $T_e \cong 800$ К

кристаліти мають сірий контраст). При збільшенні швидкості конденсації плівки Re мають аморфну структуру (a-Re), оскільки концентрація домішкових атомів недостатня для утворення оксинітриду. Деяким підтвердженням цього висновку може бути те, що на електронограмах від таких зразків фіксується одне розмите кільце з ефективною міжплощинною відстанню $\lambda/2\sin\theta \cong 0,212$ нм (θ – кут дифракції), що дуже близьке до міжплощинної відстані (10.1) чистого Re. У процесі кристалізації a-Re при відпалюванні до 800 К відбувається взаємодія з атомами залишкової атмосфери з утворенням гексагональної Re_3O або кубічної ReO_3 фаз. Як і випадку плівок Re, змінюючи технологічні параметри конденсації, можна сформувати плівкові матеріали гетерогенного складу на основі аморфних фаз Mo і W, їх оксидів, карбідів і карбонітридів.

При формуванні плівкових матеріалів сенсорної техніки на основі металів важливим є питання дослідження процесів фазоутворення в них, зокрема, виникнення аномальних фаз таких як: метастабільні аморфні, що утворюються через низьку дифузійну рухливість атомів конденсованої речовини на підкладці; високотемпературні модифікації в масивних зразках, які стабілізуються в тонких плівках при відносно низьких температурах; домішкові фази, що утворюються в результаті взаємодії атомарного пучка з атомами залишкової атмосфери.

Окремою групою є плівкові матеріали Fe/Pd і Fe/Pt, в яких відбуваються процеси атомного упорядкування. Електронографічними дослідженнями показано (рис. 6), що в таких системах уже в процесі конденсації при температурі підкладки $T_n \cong 300$ – 350 К утворюються неупорядковані ГЦК т. р. (Fe, Pd) або т. р. (Fe, Pt). Рис. 7 ілюструє схему термообробки мультишару, при якій відбувається перехід від неупорядкованого ГЦК т. р. (Fe, Pt) до упорядкованої фази $L1_0$ із ГЦТ-решіткою.

Установлено, що перехід неупорядкована \rightarrow впорядкована фаза спостерігається при $T_b \cong 630$ – 670 К (мультишари із фрагментом Fe/Pt), 780 К (мультишари із фрагментом Fe/Pd) та близько 820 К (двошарові плівки Fe/Pd і Fe/Pt). Відмітимо, що тетрагональні викривлення кубічних решіток FePd і FePt дуже незначні (0,97–0,99).

Важливою структурною характеристикою фази $L1_0$ є параметр порядку (S), який може бути розрахований за співвідношенням

$$S^2 = \frac{1 - (c/a)}{1 - (c_{уп}/a_{уп})}, \quad (2)$$

де a , c , $a_{уп}$ і $c_{уп}$ – параметри неупорядкованої і впорядкованої кристалічних решіток відповідно.

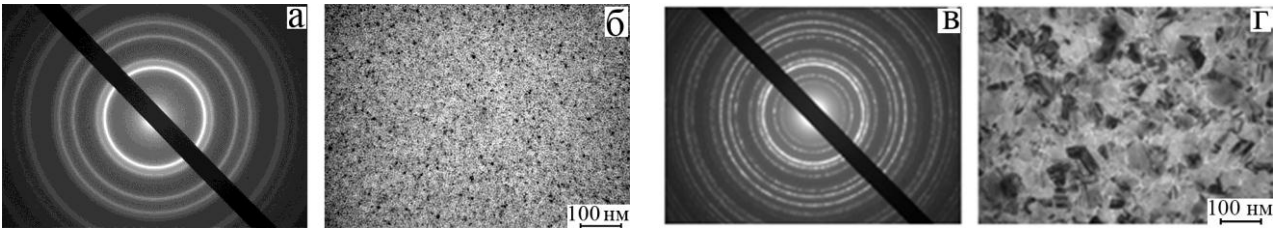


Рис. 6. Електронограми і мікроструктура від плівкових систем $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_5/Pi$, отриманих при $T = 300$ (а, б) та відпалених до 780 K (в, з)

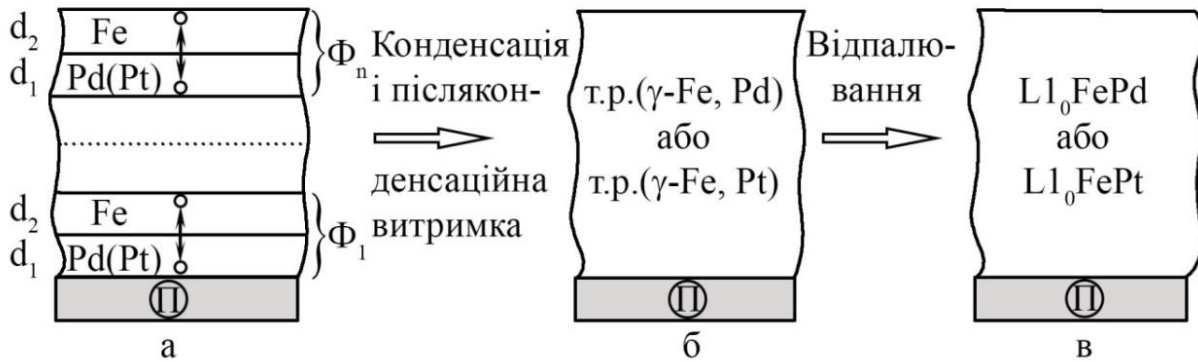


Рис. 7. Схема процесу формування неупорядкованого т.р. у процесі конденсації і післяконденсаційної витримки (а, б) та переходу до упорядкованої фази $L1_0$ після термообробки (в)

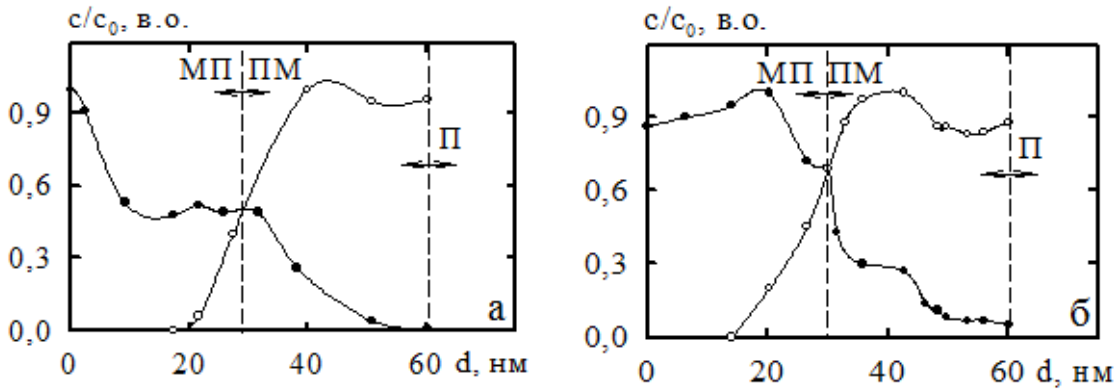


Рис. 8. Дифузійні профілі для плівки $Ni(30)/Mo(30)/Pi$ у невідпаленому (а) та відпаленому до 500 K (б) станах: \bullet – Ni , \circ – Mo . c/c_0 – відносна концентрація; c_0 – концентрація еталонного зразка; МП – межа поділу; ПМ – площина Матано

Отримано, що величина $S \cong 0,85\text{--}0,90$ (Fe/Pd) і $0,75\text{--}0,82$ (Fe/Pt).

У двошарових зразках і мультишарах на основі Fe і Pd або Pt спостерігалось зменшення температури фазового переходу $\Gamma\text{ЦК-FePd(Pt)} \rightarrow \Gamma\text{ЦТ-FePd(Pt)}$ порівняно з масивними зразками приблизно на 300 і 200 K відповідно. У цьому підрозділі також наведені результати дослідження дифузійних процесів методом ВІМС.

На основі дифузійних профілів (приклад на рис. 8), проведено розрахунок ефективних коефіцієнтів взаємної дифузії:

$$\begin{aligned}
D_{\text{Ni} \rightarrow \text{Mo}} &\cong 5,4 \cdot 10^{-18} \text{ i } D_{\text{Mo} \rightarrow \text{Ni}} \cong 1,4 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с} (T_{\text{п}} = 300 \text{ К}); \\
D_{\text{Ni} \rightarrow \text{Mo}} &\cong 1,3 \cdot 10^{-19} \text{ i } D_{\text{Mo} \rightarrow \text{Ni}} \cong 0,5 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с} (T_{\text{в}} \cong 500 \text{ К}); \\
D_{\text{Pd} \rightarrow \text{Fe}} &\cong 2,7 \cdot 10^{-18} \text{ i } D_{\text{Fe} \rightarrow \text{Pd}} \cong 1,1 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с} (T_{\text{п}} = 300 \text{ К}); \\
D_{\text{Ag} \rightarrow \text{Co}} &\cong 1,1 \cdot 10^{-18} \text{ i } D_{\text{Co} \rightarrow \text{Ag}} \cong 2,7 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с} (T_{\text{п}} = 300 \text{ К}) \text{ та} \\
D_{\text{Ag} \rightarrow \text{Co}} &\cong 1,9 \cdot 10^{-18} \text{ i } D_{\text{Co} \rightarrow \text{Ag}} \cong 5,5 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с} (T_{\text{в}} \cong 700 \text{ К}).
\end{aligned}$$

У третьому підрозділі «Фізичні процеси в чутливих елементах сенсорів» в рамках напівфеноменологічного підходу проведено урахування впливу деформаційних ефектів у параметрах електроперенесення плівкових матеріалів сенсорики на величину КТ.

Двошарова плівкова система моделюється як паралельне з'єднання двох провідників, що дає можливість записати співвідношення для опору зразка і КТ у такому вигляді:

$$\frac{1}{R} = \frac{a}{l} (F_1 \sigma_{01} d_1 + F_2 \sigma_{02} d_2),$$

де a і l – ширина і довжина плівки відповідно; F_i – функція Фукса

$$\text{та } \gamma_l = A_1 \cdot \left(\eta_{\lambda_{01}} + 1 + \mu'_{f_1} - \frac{d \ln F_1}{d \ln l} \right) + A_2 \cdot \left(\eta_{\lambda_{02}} + 1 + \mu'_{f_2} - \frac{d \ln F_2}{d \ln l} \right),$$

де $A_i = \frac{F_i \sigma_{0i} d_i}{\sum_{i=1}^2 F_i \sigma_{0i} d_i}$ (при розрахунках більш логічно використовувати величину

$\sigma_{gi} \equiv \sigma_{0i} \cdot f(\alpha)$, де $f(\alpha)$ і σ_0 – функція зерномежового розсіювання і питома провідність масивного монокристала відповідно); $\mu'_{fi} - (d \ln d_i / d \ln l) \cong \mu_{fi}$ – коефіцієнт Пуассона i -го шару плівки.

У нашій теоретичній моделі враховано, що функція F_i залежить не лише від параметрів $k = d/\lambda_0$, ефективного коефіцієнта дзеркальності p^* і r , а й від $m = L/\lambda_0$ (L – середній розмір кристалітів) і коефіцієнта проходження інтерфейсу Q . Її похідну, що використовується в базових співвідношеннях теоретичної моделі, в розгорнутому вигляді, на прикладі F_1 , можна подати так:

$$\begin{aligned}
\frac{d \ln F_1(k_1, m_1, p_1^*, r_1, Q)}{d \ln l} &= \left(\frac{d \ln F_1 d \ln k_1}{d \ln k_1 d \ln l} + \frac{d \ln F_1 d \ln m_1}{d \ln m_1 d \ln l} \right) + \left(\frac{d \ln F_1 d \ln k_1 d \ln k_2}{d \ln k_1 d \ln k_2 d \ln l} + \right. \\
&+ \left. \frac{d \ln F_1 d \ln m_1 d \ln m_2}{d \ln m_1 d \ln m_2 d \ln l} \right) + \left(\frac{d \ln F_1 d \ln k_1 d \ln p_1^*}{d \ln k_1 d \ln p_1^* d \ln l} + \frac{d \ln F_1 d \ln k_1 d \ln Q}{d \ln k_1 d \ln Q d \ln l} \right) + \quad (3) \\
&+ \left(\frac{d \ln F_1 d \ln k_1 d \ln k_2 d \ln p_2^*}{d \ln k_1 d \ln k_2 d \ln p_2^* d \ln l} + \frac{d \ln F_1 d \ln k_1 d \ln k_2 d \ln Q}{d \ln k_1 d \ln k_2 d \ln Q d \ln l} \right).
\end{aligned}$$

У випадку двошарової плівки співвідношення для КТ має вигляд

$$\begin{aligned}
\gamma_l = & A_1 \left\{ \left(\gamma_{01}^\rho + \mu_1' \right) - \left(1 - \frac{\beta_1}{\beta_{01}} \right) \left[\left(2\gamma_{01}^\rho - 1 - \mu_1' - \eta_{p^*l1} \frac{d \ln k_1}{d \ln p^*} - \eta_{Ql1} \frac{d \ln k_1}{d \ln Q} - \right. \right. \right. \\
& \left. \left. - \eta_{rl1} \frac{d \ln m_1}{d \ln r_1} + \left(2\gamma_{02}^\rho - 1 - \mu_2' - \eta_{p^*l2} \frac{d \ln k_2}{d \ln p^*} - \eta_{Ql2} \frac{d \ln k_2}{d \ln Q_2} - \eta_{rl2} \frac{d \ln m_2}{d \ln r_2} \right) \frac{\beta_{01}}{\beta_{02}} \right] \right\} + \\
& + A_2 \left\{ \left(\gamma_{02}^\rho + \mu_1' \right) - \left(1 - \frac{\beta_2}{\beta_{02}} \right) \left[\left(2\gamma_{02}^\rho - 1 - \mu_2' - \eta_{p^*l2} \frac{d \ln k_2}{d \ln p^*} - \eta_{Ql2} \frac{d \ln k_2}{d \ln Q_2} - \eta_{rl2} \frac{d \ln m_2}{d \ln r_2} \right) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \left(2\gamma_{01}^\rho - 1 - \mu_1' - \eta_{p^*l1} \frac{d \ln k_1}{d \ln p^*} - \eta_{Ql1} \frac{d \ln k_1}{d \ln Q_1} - \eta_{rl1} \frac{d \ln m_1}{d \ln r_1} \right) \frac{\beta_{02}}{\beta_{01}} \right] \right\} + 1 + \mu_s,
\end{aligned} \quad (4)$$

де деформаційні коефіцієнти дорівнюють $\eta_Q = -\frac{1}{Q} \cdot \frac{dQ}{d\varepsilon_l}$ (вважається,

що $Q = Q_{12} = Q_{21}$); $\eta_r = -\frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{d\varepsilon_l}$ та $\eta_{p^*} = -\frac{1}{p^*} \cdot \frac{dp^*}{d\varepsilon_l}$, а похідні можна записати так:

$$\frac{d \ln k}{d \ln p^*} \cong \frac{\Delta \ln k}{\Delta \ln p^*} = \left(\ln \frac{\lambda_0(0)}{\lambda_0(\varepsilon_l)} \right) / \left(\ln \frac{p^*(\varepsilon_l)}{p^*(0)} \right), \quad \frac{d \ln m}{d \ln r} \cong \frac{\Delta \ln m}{\Delta \ln r} = \left(\ln \frac{\lambda_0(0)}{\lambda_0(\varepsilon_l)} \right) / \left(\ln \frac{r(\varepsilon_l)}{r(0)} \right).$$

Фізичний зміст деформаційних коефіцієнтів полягає в тому, що при деформації плівкового зразка відбувається ряд процесів у об'ємі зерна (збільшення його лінійних розмірів і відповідно параметра решітки, деформація внутрішнього потенціалу решітки) і на його межі (деформація межі, розворот зерен, релаксаційні процеси, пов'язані із заліковуванням або генерацією дефектів (вакансій), виникненням локалізованих енергетичних рівнів тощо). Незважаючи на складність співвідношення (4), його відносно легко порівняти з експериментальними даними, оскільки в праву частину входять параметри, які можна розрахувати виходячи із експериментальних результатів для одношарових плівок. Але при цьому залишається складним питання про ефективність міжшарових переходів та про експериментальне визначення величини $\Delta\lambda_0$. Суть останнього утруднення полягає в тому, що величина $\Delta\lambda_0$ визначається не лише безпосереднім впливом деформації, а й опосередковано через деформаційну залежність параметра дзеркальності та коефіцієнта проходження межі зерна, тобто

$$\Delta\lambda_0(\varepsilon_l) = \Delta\lambda_{0\varepsilon_l} + \Delta\lambda_{0p} + \Delta\lambda_{0r} = \eta_{\lambda_0} \lambda_0 \Delta\varepsilon_l + \eta_{p^*} \lambda_0 \Delta\varepsilon_l + \eta_r \lambda_0 \Delta\varepsilon_l, \quad (5)$$

де $\eta_{\lambda_0} = -\frac{1}{\lambda_0} \cdot \frac{\Delta\lambda_0}{\Delta\varepsilon_l}$; $\eta_{p^*} = -\frac{1}{\lambda_0} \cdot \frac{\Delta\lambda_{0p}}{\Delta p^*} \cdot \frac{\Delta p^*}{\Delta\varepsilon_l}$; $\eta_r = -\frac{1}{\lambda_0} \cdot \frac{\Delta\lambda_{0r}}{\Delta r} \cdot \frac{\Delta r}{\Delta\varepsilon_l}$ (при такій

формі запису цих співвідношень усі множники у правій частині легко розраховуються).

Оскільки найбільш послідовна методика апробації теоретичної моделі (4) базується на розрахунках величин λ_0 , ρ і r у рамках теоретичної моделі ізотропного розсіювання електронів Тельє, Тоссе і Пішар на основі експериментальних залежностей ТКО від товщини плівки для серії недеформованих та другої серії деформованих плівок при сталій деформації, то неможливо розділити безпосередній і опосередкований внески деформації у величину $\Delta\lambda_0$ (співвідношення 5). Це спричиняє певну похибку у розрахунках деформаційних коефіцієнтів СДВП, хоча додатковий аналіз засвідчує, що основний внесок у величину $\Delta\lambda_0$ дає доданок $\eta_{\lambda_0}\lambda_0\Delta\varepsilon_l$. Відзначимо, що шляхом екстраполяції залежностей ρ від d^{-1} і β від d^{-1} на нуль (відмітимо, що це стандартна процедура) були визначені величини ρ_g і β_g для одношарових плівок, які використовувалися замість ρ_0 і β_0 при апробації співвідношення (4). За своєю суттю ρ_g і β_g відповідають ρ і β масивних конденсатів із тим самим типом та концентрацією дефектів, як і в одношаровій плівці.

Приклади розрахунків розмірної залежності коефіцієнта проходження межі зерна, його деформаційного коефіцієнта і похідної $d\ln m/d\ln r$ наведені на рис. 9.

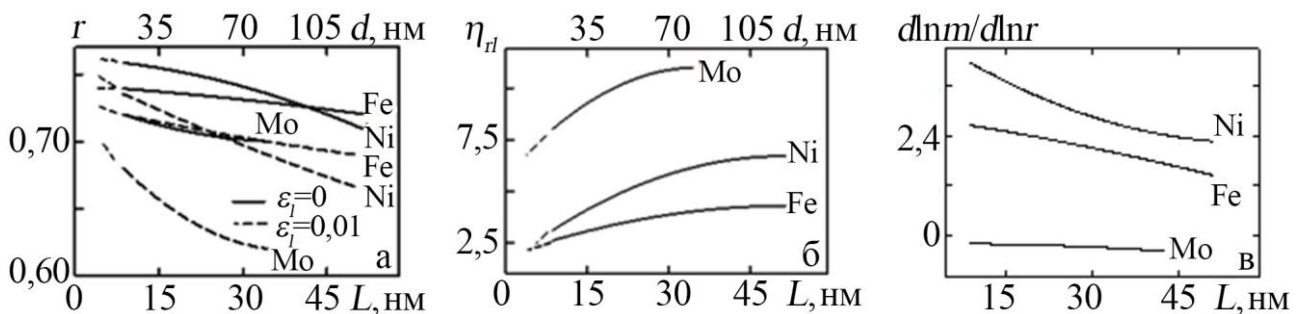


Рис. 9. Залежності коефіцієнтів r (а), η_r (б) і $d\ln m/d\ln r$ (в) від середнього розміру кристалітів

Аналогічні залежності були отримані й для інших параметрів, які входять до співвідношення (4): η_{p^*} , η_Q , що, за нашим припущенням, з певною точністю дорівнює η_r , $d\ln k/d\ln p^*$ та інші похідні.

Показано, що запропонована напівфеноменологічна модель для КТ багатошарових плівкових систем в області пружної деформації дає задовільну відповідність (від 3 до 25 %) розрахункових і експериментальних результатів (табл. 3).

У четвертому підрозділі пояснена причина реалізації у тонких плівках аномально малих величин КТ. Якісні міркування про те, що в усіх плівкових матеріалах коефіцієнт Пуассона буде $\mu_f < 0,5$, якщо температура Дебая Θ_D збільшується при деформації плівки, і $\mu_f > 0,5$ – при зменшенні Θ_D . Інший механізм збільшення μ_f пов'язаний із деяким зменшенням загальної товщини плівки на за рахунок дифузії поверхневих атомів на межі зерен, в яких при

Порівняння експериментальних (γ) та розрахункових (γ_p) даних для двошарових плівкових систем

Плівкова система Me ₁ /Me ₂ /П (товщина, нм)	Концентрація атомів магн. металу <i>c</i> , ат.%	γ_i		$\left \frac{\gamma_i - \gamma_{ip}}{\gamma_i} \right , \%$
		експерим. значення	з урахув. деформ. коеф.	
Ni(50)/Mo(20)/П	80	5,4	5,2	4
Mo(20)/Ni(15)/П	56	7,4	7,8	5
Ni(25)/Mo(15)/П	28	7,2	7,0	3
Ni(150)/Cr(40)/П	80	2,9	2,8	4
Ni(20)/Cr(20)/П	53	4,3	4,1	5
Cr(15)/Ni(40)/П	26	3,8	3,6	5
Mo(20)/Fe(50)/П	79	4,9	5,4	10
Mo(20)/Fe(40)/П	75	5,6	5,8	4
Mo(20)/Fe(15)/П	53	7,2	7,5	4
Mo(25)/Fe(35)/П	32	4,8	5,1	6

деформації $\Delta \varepsilon_{l,t} > 0$ збільшується ширина. Згладжування поверхневого рел'єфу плівки також спричинить додатковий внесок у величину μ_f' .

Четвертий розділ «Узагальнення результатів досліджень розмірного і концентраційного ефектів у ТКО» складається із трьох підрозділів.

У першому підрозділі на основі результатів наших досліджень і аналізу літературних даних для температурної залежності опору і ТКО плівкових матеріалів узагальнені результати стосовно розмірного та концентраційного ефектів у ТКО. Отримані залежності питомого опору і ТКО від температури для одношарових металевих плівок Cr, Co, Fe, Ni, Cu, Sc, Ti і V ілюструють особливості при температурі Дебая (Θ_D), $2/3\Theta_D$ та температурах магнітних переходів. При переході до багатошарових плівок на основі металів на температурних залежностях опору і ТКО зазначені особливості проявляються меншою мірою, що пов'язано з процесами взаємної дифузії атомів і фазоутворення; збільшення кількості шарів призводить до зникнення особливостей, і залежність $\rho(T)$ стає лінійною в інтервалі температур 300–900 К, а величина ТКО практично не залежить від температури.

У системах із низькою взаємною розчинністю атомів характер температурних залежностей $\rho(T)$ і $\beta(T)$ до великої міри визначається зерномежовою дифузією компонент. Температурні залежності питомого опору для одношарових плівок мають металевий характер. Деякі приклади розмірних залежностей для ТКО, що розраховувалися на основі залежностей $\rho(T)$, наведені на рис.10. Вони узгоджуються з відомими теоретичними висновками та експериментальними залежностями для плівок інших металів.

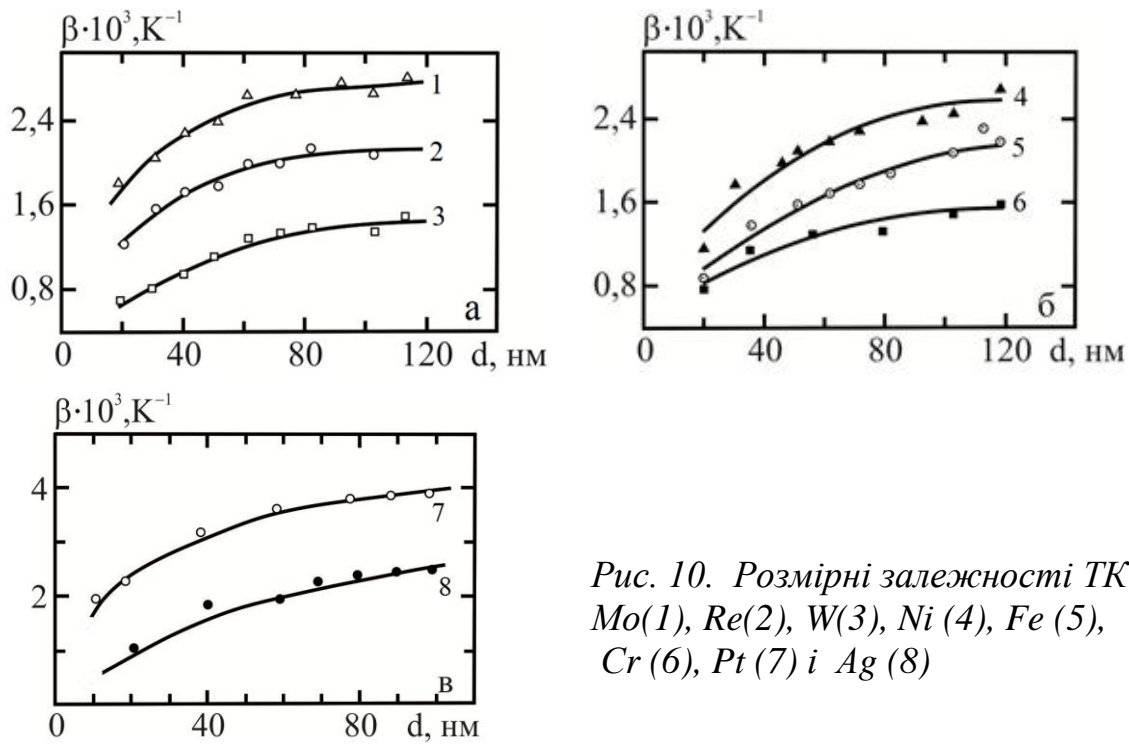


Рис. 10. Розмірні залежності ТКО: Mo(1), Re(2), W(3), Ni (4), Fe (5), Cr (6), Pt (7) і Ag (8)

На основі результатів мікроскопічних і рентгенографічних досліджень для одношарових металевих плівок товщиною 10–90 нм розраховано середні розміри кристалітів. Невідпалені зразки мають сильнодисперсну структуру (L змінюється в межах 2–15 нм), а при відпалюванні, в результаті рекристалізаційних процесів, величина L у всіх досліджених нами плівках збільшується в декілька разів. Необхідно відзначити, що висока дисперсність одношарових плівок, як у нашому випадку, – це типова ситуація при вивченні кристалічної структури плівок тугоплавких металів та металів із проміжною температурою плавлення. При цьому термовідпалювання до 900 К не приводить до інтенсивних рекристалізаційних процесів, хоча величина L , як у випадку плівок Ag, Pd, може збільшуватися до 50–100 нм. При переході до дво- або багатошарових плівкових систем ступінь їх дисперсності істотно не змінюється.

Було отримано, що величини $\beta_g/\beta_0 = 0,3 - 0,4$ (Mo, Fe і Co); $0,6 - 0,7$ (Ni, Ag, Re, W і Cr) і $0,90 - 0,95$ (Pd, Pt і Cu). Відносно малі значення β_g/β_0 (β_0 – ТКО масивних зразків, β_g – ТКО плівки при $d \rightarrow \infty$ відповідно) пов'язані із сильнодисперсною структурою зразків.

У другому підрозділі зазначається, що висока температурна стійкість гетерогенних плівкових матеріалів на основі тугоплавких металів, які містять аморфні фази, оксиди, карбідні, нітриди і т. п., дозволяє використовувати їх для створення функціональних елементів сенсорної техніки методом багатошарової металізації з прогнозуванням робочих параметрів і характеристик. Як приклад, на рис. 11 наведені типові температурні залежності для плівок гетерогенного складу $\text{Re}(\text{N},\text{O})_x + \text{Re}$ і $\text{Mo}(\text{C},\text{N})_x + \text{Mo}$ та показано, що в інтервалі проміжних температур при збільшенні температури питомий опір зменшується, що пояснюється наявністю у гетерогенних плівках фаз із напівпровідниковими властивостями. Показана

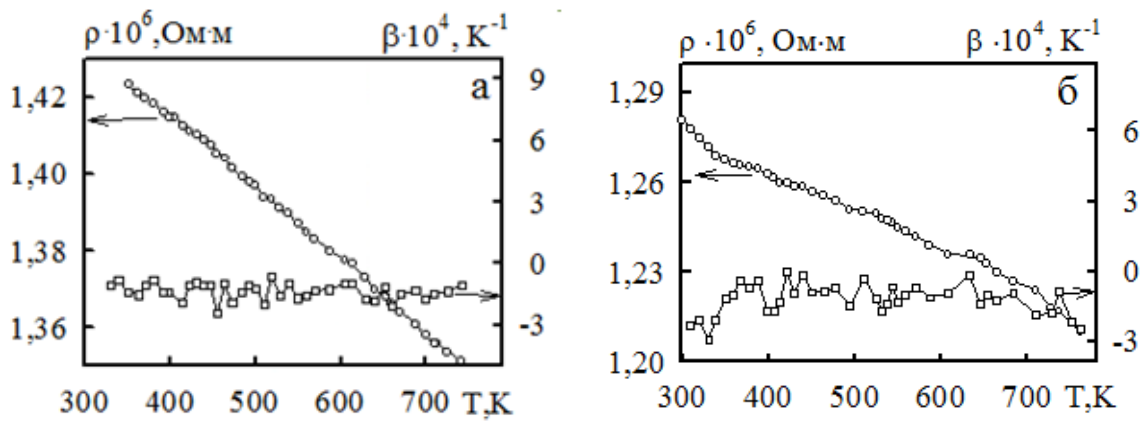


Рис. 11. Температурні залежності ρ і β для плівок гетерогенного складу $Re(N,O)_x + Re$ (а) і $Mo(C,N)_x + Mo$ (б) товщиною 40 нм

висока термічна стійкість гетерогенних матеріалів на основі тугоплавких металів (ТКО $\sim -10^{-4} K^{-1}$), що робить їх перспективними при конструюванні стабільних у широкому інтервалі температур сенсорних елементів.

У третьому підрозділі проаналізовані терморезистивні властивості плівкових сплавів і мультишарів на основі металів.

При дослідженні терморезистивних властивостей плівок на основі Fe і Pd або Pt товщина окремих шарів була підібрана таким чином, що відповідно до діаграм стану для масивних зразків Fe-Pd і Fe-Pt у плівкових системах стабілізуються різні фази: т. р. атомів Pd або Pt в ОЦК-Fe (це фаза (α -Fe); концентрація $c_{Pd} < 25$ ат.%, і $c_{Pt} < 15$ ат.%; Fe_3Pd або Fe_3Pt (фаза $L1_2$; $c_{Pd} \cong 20-45$ ат.%; $c_{Pt} \cong 14-30$ ат.%; $FePd$ або $FePt$ (фаза $L1_0$; $c_{Pd} \cong 50-60$ ат.% і $c_{Pt} \cong 30-60$ ат.%).

Електронографічні дослідження свідчать про те, що фазовий склад термостабілізованих зразків відповідає прогнозованому. Для цих фаз має місце залежність $\beta \sim 1/T$ в інтервалі 300 – 700 К, хоча величина ТКО має різні значення в межах трьох вказаних концентраційних інтервалів. Максимальне значення ТКО спостерігається для фази (α -Fe): від $2,5 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ (300 К) до $1,4 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ (700 К), що узгоджується з величиною β для одношарових плівок Fe. Для фази $L1_2$ величина ТКО змінюється від $2 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ (300 К) до $0,9 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ (700 К). Мінімальне значення ТКО, тобто найбільшу термічну стабільність, має впорядкована фаза $L1_0 - (0,2-0,8) \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

Електрофізичні властивості плівок вивчалися не лише на прикладі систем із необмеженою розчинністю компонент, а й з обмеженою розчинністю (плівки на основі Fe або Co і Ag). Двошарові плівки на основі Fe і Ag мають відносно велике значення ρ і відповідно мале значення β , що також якісно свідчить про утворення обмежених т. р. При зміні товщини плівки Ag від 10 до 50 нм і Fe – від 30 до 40 нм ($c_{Fe} = 85-45$ ат.%) величина ТКО становить $(0,2-1,0) \cdot 10^{-3} K^{-1}$, що поряд із високою температурною стабільністю дозволяє говорити про можливість їх застосування як елементів терморезисторів. У випадку системи на основі Co і Ag з елементами гранульованого стану, який стабілізується як

при пошаровій, так і одночасній конденсації, величина ТКО змінюється в межах $(1,2-1,6) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ($c_{Co} = 33-72 \text{ ат.}\%$).

До основних робочих параметрів промислових терморезисторів на основі двокомпонентних металевих і напівпровідникових матеріалів, температурна залежність опору яких близька до експоненціальної, відносять коефіцієнт температурної чутливості B , величина якого розраховується за співвідношенням

$$B = \frac{T_1 T_2}{\Delta T} \ln \frac{R_1}{R_2}, \quad (6)$$

де $\Delta T = T_2 - T_1$ – робочий температурний інтервал терморезистора; R_1 і R_2 – значення опору при температурах T_1 і T_2 відповідно.

Експериментальний робочий параметр B для матеріалів різних типів має такі значення $B \cdot 10^{-2}$, К:

4,2–12,4 (двошарові плівки Ni/Mo, загальна товщина $d \cong 40-70 \text{ нм}$);

5,1–10,9 (двошарові плівки Mo/Fe, $d \cong 40-70 \text{ нм}$);

8,5–20,9 (двошарові плівки Ni/Cr, $d \cong 50-190 \text{ нм}$);

7,2–8,1 (двошарові плівки Fe/Pd, $d \cong 40-80 \text{ нм}$);

16–54 (мультишари на основі Fe і Pd або Pt, $d \cong 10-30 \text{ нм}$);

9,5–10,8 (двошарові плівки на основі Ag/Fe, $d \cong 40-60 \text{ нм}$);

5,8–9,2 (сплави на основі Ni і Fe або Mo; Co і Ag, $d \cong 30-40 \text{ нм}$);

1,3–1,9 (плівки гетерогенного складу на основі Re, Fe і Mo, $d \cong 30-40 \text{ нм}$);

13 – 20 (плівки гетерогенного складу на основі W або Mo, $d \cong 30-40 \text{ нм}$).

Оскільки відомо, що для промислових плівкових приладів величини робочих параметрів β і B знаходяться в межах $10^{-3}-10^{-4} \text{ K}^{-1}$ та 1200–8000 К відповідно, то на основі отриманих результатів можна зробити висновок про можливість застосування вищезазначених плівкових матеріалів як елементів сенсорів температури і терморезисторів. З цієї точки зору найбільш ефективними будуть матеріали, які мають найбільшу температурну чутливість, а саме: багатошарові плівки і мультишари на основі Fe і Pd або Pt та двошарові плівки на основі Ni і Cr ($B = 1620-4725 \text{ K}$) і плівки гетерогенного складу на основі Mo або W ($B = 1350-1980 \text{ K}$).

Установлено, що величина ТКО в області проміжних температур становить: $(0,2-2,3) \cdot 10^{-3} \text{ K}$ (двошарові плівки Ni/Mo, Mo/Fe, Ni/Cr і Fe/Pd, загальна товщина $d \cong 40-190 \text{ нм}$); $(1-6) \cdot 10^{-3} \text{ K}$ (двошарові плівки Ag/Fe та мультишари на основі Fe і Pd або Pt, $d \cong 5-60 \text{ нм}$); $(0,1-2,0) \cdot 10^{-3} \text{ K}$ (сплави на основі Ni і Fe або Mo; Co і Ag; плівки гетерогенного складу на основі Re, Fe і Mo, $d \cong 30-40 \text{ нм}$); $(2-3) \cdot 10^{-5} \text{ K}$ (плівки гетерогенного складу на основі Fe і Mo, $d \cong 30-40 \text{ нм}$).

У цьому ж підрозділі проаналізовані деякі питання, пов'язані із температурними і концентраційними ефектами у системі електронного газу. Зокрема, розглянуто питання про температурну залежність коефіцієнта зерномежового розсіювання електронів на основі такого співвідношення [1*]:

$$\frac{dR}{dT} = \frac{(\beta_\rho - \beta_0 \rho_0) L}{1,3 \rho_0 \lambda_0} (1 - R)^2. \quad (7)$$

Величина температурної чутливості параметра зерномежового розсіювання

змінюється в межах $3,5 \cdot 10^{-4} - 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (плівки Pd) і $2,3 \cdot 10^{-4} - 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (плівки Pt) при зростанні товщини плівок в інтервалі $d \cong 10-100 \text{ нм}$.

Уточнена кореляція між концентрацією $s + d$ електронів і електрофізичними властивостями магнітних (Fe, Co, Ni) і немагнітних (Sc, Ti, Mo, Re, Cr, Cu, Ag, Pd, Pt) металевих плівок, що дозволяє зробити прогноз їх робочих параметрів: величин ТКО (для сенсорів температури і терморезисторів) і КТ (для сенсорів деформації і тензорезисторів).

П'ятий розділ «Магніторезистивні та магнітооптичні властивості плівкових матеріалів із можливим спін-залежним розсіюванням електронів», присвячений вивченню магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів на основі феромагнітних і благородних металів, вміщує шість підрозділів.

У першому підрозділі наведені результати досліджень магніторезистивних властивостей плівок Fe/Pd (Pt, Ag) та Co/Ag, що проводилися при трьох геометріях вимірювання. Величина МО визначалася за співвідношенням $MO = \Delta R/R(0) = (R(B) - R(0))/R(0)$, де $R(0)$ і $R(B)$ – опір плівки за відсутності магнітного опору та в магнітному полі індукцією B .

У плівкових системах на основі Fe і Pd або Pt у зв'язку з високою дифузійною рухливістю атомів, спричиненою конденсаційно-стимульованою дифузією і наперед заданими малими товщинами окремих шарів, у процесі конденсації формується т. р., відбувається розмиття структурних інтерфейсів, а додатковим механізмом розсіювання є т. зв. магнітні інтерфейси [2*], коли електрони розсіюються не на фактичних межах поділу шарів, а на магнітних моментах атомів феромагнітного і поляризованих немагнітних металів (рис. 12).

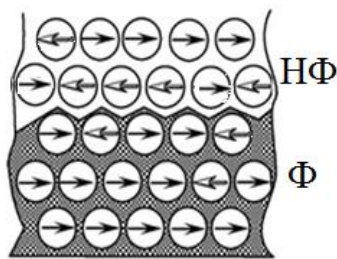


Рис. 12. Схема магнітного інтерфейсу.
 Φ – феромагнітний метал,
 Н Φ – неферомагнітний метал

На рис. 13 наведені типові польові залежності МО для мультишарів $[Pd(1,1)/Fe(0,9 \text{ нм})]_n/\Pi$ ($n = 3, 5, 10$), в яких спостерігаються ознаки ГМО. У системах на основі Fe і Pd або Pt, отриманих методом одночасної конденсації з двох джерел ($Me_1 + Me_2/\Pi$), при трьох геометріях вимірювання спостерігалися ознаки ГМО з амплітудою від 0,05 до 0,30%. При зміні загальної концентрації атомів Fe від 10 до 36 ат.% (ГЦК-фази $FePd_3$ і $FePt_3$), величина МО мала максимальне значення 0,20–0,28 % (перпендикулярна); 0,12–0,30 % (поздовжня) та 0,14–0,20 % (поперечна) геометрії вимірювання.

Апробація теоретичної моделі Тельє і Тоссе для розмірного ефекту в МО одношарових плівок показала, що вона задовільно узгоджується з експериментальними даними і більш коректно враховує процеси зерномежового розсіювання електронів (маядасівський механізм) порівняно з поверхневим (фуксівський механізм).

Характерною особливістю польових залежностей МО для плівкових систем

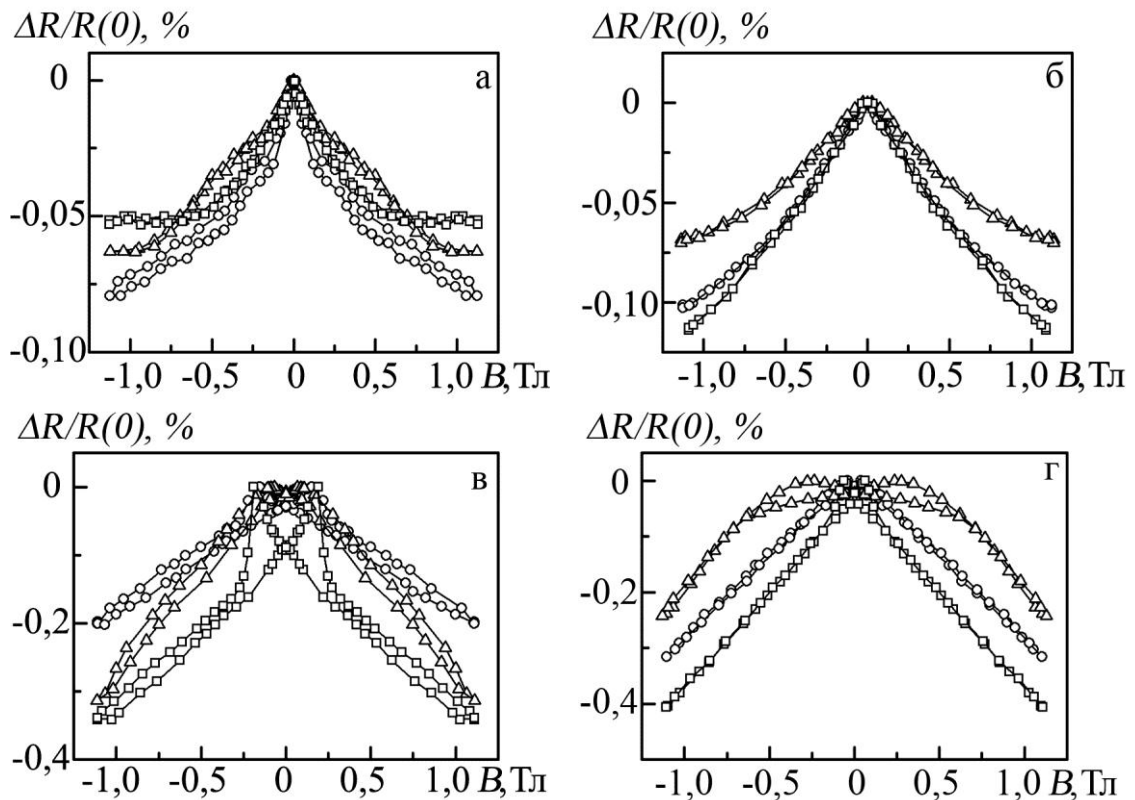


Рис. 13. Польові залежності МО для мультишарів $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_3/Pt$ (а, б) і $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_{10}/Pt$ (в, г) для невідпалених (а, в) і відпалених до 780 К (б, г) при $c_{Fe} = 50$ ат. %. Геометрії вимірювання: паралельна (○), перпендикулярна (Δ) і поперечна (□)

$Fe(30)/Pt(d)/Fe(30)/Pt$, ($d = 3-25$ нм) у невідпаленому стані є незначний магніторезистивний гістерезис, петлі якого при усіх трьох геометріях вимірювання свідчать про ознаки ефекту ГМО із відносно малою амплітудою (до 0,035 %). При поступовому збільшенні товщини шару Pt амплітуда ефекту майже не збільшується і при 15–20 нм ефект ГМО трансформується в АМО. У відпалених до $T_g \cong 800$ К плівках ознаки ефекту ГМО більш чітко виражені з більшою величиною амплітуди.

Ймовірними причинами малої амплітуди ефекту ГМО можуть бути явища, які частково компенсують спін-залежне розсіювання електронів (СЗРЕ), а саме прояв аномального ефекту Холла при вимірюванні МО; розсіювання електронів на доменних стінках у шарах Fe; магнітна взаємодія між гранулами; одновісна магнітокристалічна анізотропія у шарах Fe, яка обумовлює сильну спін-орбітальну взаємодію в атомах Pd або Pt та гібридизацію і поляризацію d-зони атомів Fe і Pd або Pt. У принципі, всі ці явища мають місце у плівкових системах із СЗРЕ (мультишари, спін-вентилі, гранульовані сплави), але останні два явища можуть спричинити зменшення величини ГМО.

Плівкові матеріали на основі Fe і Pd або Pt можуть бути ефективними чутливими елементами як сенсорів деформації, так і магнітного поля, оскільки фази $L1_1$ і $L1_0$ термічно стабільні до 1570 К при $c_{Fe} = 30-60$ ат. % (системи на основі Fe і Pd) і $c_{Fe} = 18-70$ ат. % (системи на основі Fe і Pt). Це може бути певною компенсацією відносно малої чутливості фаз $L1_1$ і $L1_0$ до магнітного

поля. У системах $\text{Fe}(3)/\text{Ag}(d)/\text{Fe}(3)/\Pi$ і $\text{Ag}(d_1)/\text{Fe}(10)/\text{Ag}(d_2)/\Pi$ ($d \cong 1, 3, 5$ нм; $d_1 = 1, 2, 5$ нм; $d_2 = 5, 3, 1$ нм), отриманих пошаровою конденсацією металів, при зміні індукції магнітного поля від $-0,45$ до $0,45$ Тл величина МО має найбільші значення у поздовжній геометрії і дорівнює $0,30\text{--}0,45\%$ і $0,12\text{--}0,28\%$, відповідно. Відпалювання зразків до $T_b = 800$ К призводить до незначного зростання величини МО у трьох геометріях вимірювання.

Дослідження методом МОКЕ (рис. 14) вказують на те, що магнітооптичні властивості багатошарових плівок і мультишарів феромагнетик (Fe, Co)/ благородний метал (Pd, Pt, Ag) істотно залежать від типів упорядкування – атомного або магнітного, що полягає, зокрема, у різних величинах коерцитивної сили і прояві анізотропного ефекту при переході від структурно-розупорядкованої до упорядкованої фази.

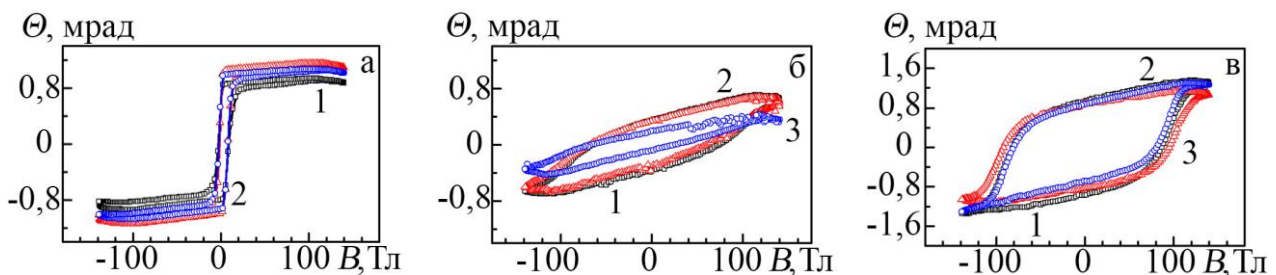


Рис. 14. Залежності МОКЕ для невідпалених (а, в) і відпалених до 780 К (б) плівок $[\text{Pd}(1,1)/\text{Fe}(1,1)]_5/\Pi$ (а, б) і $\text{Fe}(12)/\text{Pt}(10)/\Pi$ (в). Кут Керра: 1 – 0° ; 2 – 45° ; 3 – 90° . Концентрація атомів немагнітної компоненти – 46 ат.%

Форма петель змінюється залежно від концентрації атомів немагнітної компоненти. Для систем на основі Fe і Ag, отриманих методом пошарової конденсації, характерна прямокутна форма петлі гістерезису, що свідчить про збереження індивідуальності окремих шарів.

У роботі зазначені причини зменшення коерцитивної сили при зростанні товщини немагнітного шару. По-перше, структурні мікронапруження, які виникають внаслідок збігу термічних коефіцієнтів лінійного розширення феромагнітних і неферомагнітних шарів, по-друге, зменшення намагніченості за рахунок перемішування атомів і, по-третє, зменшення радіусу феромагнітної кореляції та процеси аморфізації плівки.

Третій підрозділ присвячений питанню температурної залежності ГМО. Установлено, що величина температурного коефіцієнта ГМО в мультишарах на основі Fe і Pd, Pt або Ag при зростанні температури від 300 до 900 К має величину в межах $\Delta\beta_{\text{ГМО}} = (-0,3) - (-9,2) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

У четвертому підрозділі розглянуто питання стосовно ефекту Холла в багатошарових плівках на основі Fe і Pd або Pt та встановлено, що величина сталої Холла залежить від загальної товщини і фазового складу матеріалу, товщини немагнітного шару та інтервалу відпалювання плівкових зразків. Зроблено висновок про можливість застосування матеріалів феромагнетик/благородний метал як чутливих елементів датчиків із площею робочої області $S = 5 \cdot 10^{-12} - 4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ для вимірювання локальних магнітних

полів і величини електричного струму.

П'ятий підрозділ присвячений питанню, пов'язаному із процесами фазоутворення і властивостями пліткових матеріалів метал/напівпровідник як елементів сенсорів і контактних структур. Результати досліджень магніторезистивних властивостей плівок на основі Fe і Ge показують, що максимальні значення $MO = 0,28-0,40\%$ спостерігаються при кімнатній температурі у відпалених до $T = 1070\text{ K}$ системах з товщиною немагнітного шару $d_{Ge} = 25 - 40\text{ нм}$ ($c_{Fe} < c_{Ge} = 60-68\text{ ат.}\%$). Зростання величини MO пояснюється утворенням за таких умов магнітних фаз германідів заліза $FeGe_x$ (рис. 15) по всьому об'єму зразка та їх феромагнітним упорядкуванням.

Установлено (табл. 4), що пліткові системи Me/НП також задовольняють основні вимоги до матеріалів омичних контактів і терморезисторів: мають відносно високий питомий опір, лінійну вольт - амперну характеристику і низький ТКО в інтервалі товщин від 20 до 140 нм.

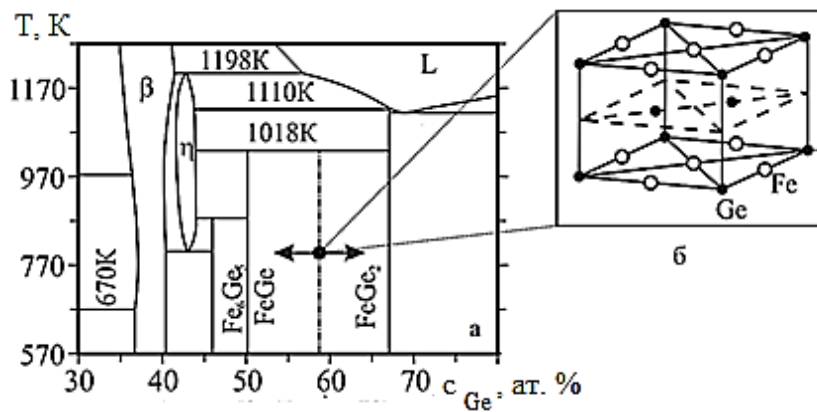


Рис. 15. Фрагмент діаграми стану для бінарної системи Fe-Ge (а) і елементарна комірка гексагональної решітки фази $FeGe_x$ ($x \cong 1$) (б)

Таблиця 4

Робочі параметри пліткових матеріалів Me/НП

Зразок (товщина, нм)	$\beta \cdot 10^4, K^{-1}$	$R_c, \text{ Ом/м}^2$	Фазовий склад
$\Delta T_1 \cong 300 - 600\text{ K}$			
Ge(20)/Cr(50)/П	0,19	0,033	к-Ge + ОЦК-Cr, к – кристал
Ge(50)/Cr(50)/П	0,22	0,038	
Ge(60)/Cu(80)/П	5,55	0,126	к-Ge + ГЦК-Cu
Ge(80)/Cu(80)/П	5,60	0,130	
$\Delta T_2 \cong 300 - 900\text{ K}$			
Fe(30)/Ge(20)/П	6,32	0,320	ОЦК-Fe + + ГЦК-FeGe
Fe(30)/Ge(25)/П	6,00	0,300	
$\Delta T_3 \cong 300 - 700\text{ K}$			
Ge(10)/Ni(10)/П	2,23	0,385	а-Ge + ГЦК-Ni, а – аморфна фаза
Ge(30)/Ni(20)/П	2,51	0,434	
Ge(30)/Ni(30)/П	2,75	0,475	
Ge(30)/Ni(60)/П	2,88	0,498	

Характер температурної залежності питомого опору можна пояснити зміною умов розсіювання для електронів біля межі поділу Ме/НП та екситонним механізмом провідності, а саме формуванням екситонів Ванье - Мотта.

У шостому підрозділі розглянуто вплив магнітного поля на ТКО гранульованих плівкових сплавів, співвідношення для якого у самому загальному вигляді було отримано в праці [3*] на основі уявлення про шарувату структуру цього сплаву (рис. 16):

$$\beta = \beta_{\text{тр}} - \frac{4\beta_{\text{Г}}\rho_{\text{Г}}}{4\rho_{\text{Г}} + \alpha\rho_{\text{тр}}} - \frac{\alpha\beta_{\text{тр}}\rho_{\text{тр}}}{4\rho_{\text{Г}} + \alpha\rho_{\text{тр}}} + \frac{\beta_{\text{Г}}\rho_{\text{Г}} + \alpha\beta_{\text{тр}}\rho_{\text{тр}}}{\rho_{\text{Г}} + \alpha\rho_{\text{тр}}}, \quad (8)$$

де параметр $\alpha = \Delta l_{\text{тр}}/r_0$ – ступінь гранулярності зразка; $\rho_{\text{Г}}$ і $\rho_{\text{тр}}$ – питомий опір матеріалу гранули (це може бути Co, Fe або Ni) і т.р.; $\beta_{\text{Г}}$ і $\beta_{\text{тр}}$ – ТКО матеріалу гранул і т. р. відповідно.

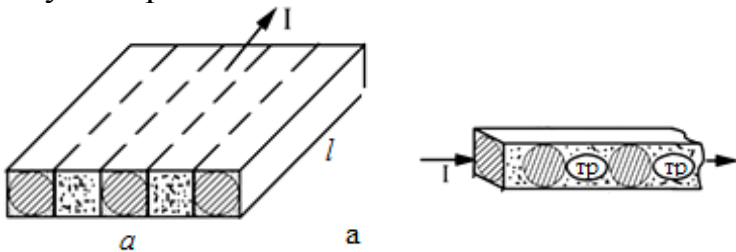


Рис. 16. Схематичне зображення окремого шару (а) і трубки струму (б) шаруватой структури: I – сила струму; l і a – довжина і ширина плівкового зразка

Нами були отримані близькі за своєю математичною структурою співвідношення для чутливостей ТКО до магнітного поля для двох граничних випадків $\alpha \gg 1$ та $\alpha \ll 1$ і за умови $\alpha \cong 1$. Наприклад, у першому випадку це співвідношення має такий вигляд:

$$S_{\beta_B} - S_{\beta_{\text{тр}B}} = \frac{\partial \beta}{\partial B} - \frac{\partial \beta_{\text{тр}}}{\partial B} \cong \frac{4}{\alpha} \frac{\rho_{\text{Г}}}{\rho_{\text{тр}}} \cdot \left[\beta_{\text{Г}} \beta_{\text{тр}B} - \frac{\partial \beta_{\text{Г}}}{\partial B} \right] - \frac{4}{\alpha} \frac{\partial \rho_{\text{Г}}}{\partial B} \cdot \frac{\beta_{\text{Г}}}{\rho_{\text{тр}}}. \quad (9)$$

Для другого і третього випадків отримані аналогічні співвідношення. Це дало можливість розрахувати залежність $\Delta \beta_B$ від величини $\Delta l_{\text{тр}}$. При $\alpha \gg 1$ величина $\Delta \beta_B$ монотонно зменшується із зростанням розміру фрагменту і змінюється в межах $0,02-0,10 \text{ K}^{-1}\text{Tл}^{-1}$ при зміні величини $\Delta l_{\text{тр}}$ від 30 до 160 нм. Для протилежного випадку $\alpha \ll 1$ величина $\Delta \beta_B$ навпаки монотонно зростає від 0,02 до $0,12 \text{ K}^{-1}\text{Tл}^{-1}$ при зміні α від 0 до 0,4, а величини $\Delta l_{\text{тр}}$ від 1 до 5 нм. При $\alpha \cong 1$ величина $\Delta \beta_B$ не залежить від розміру фрагменту т. р.

Отримані результати свідчать про принципову можливість керувати зовнішнім магнітним полем величиною термічного коефіцієнта опору. Відмінний характер залежностей у трьох випадках пояснюється різним впливом на питомий опір плівкового зразка СЗРЕ на гранулах магнітного металу.

Шостий розділ «Врахування поверхневих і температурних ефектів у фононному і спин-залежному розсіюванні електронів у чутливих елементах сенсорів» містить три підрозділи.

У першому підрозділі проведено аналіз температурних залежностей питомого опору одношарових металевих плівок залежно від їх товщини.

У випадку металевих плівок співвідношення для температурної залежності питомого опору має вигляд

$$\rho(T) = \rho_3 + a \cdot T^2 + c^* \cdot \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3 \cdot j_3\left(\frac{\Theta_D}{T}\right), \quad (10)$$

де ρ_3 – залишковий опір, пов'язаний із розсіюванням носіїв електричного струму на дефектах решітки, який не залежить від температури; a – параметр електрон-електронної взаємодії; $c^* = \operatorname{tg} \alpha \frac{\Theta_D^3}{T^2} \cdot \frac{1}{J_3(\Theta_D/T)}$ – ефективний параметр, який враховує сумарний ефект мотівського s-d- та електрон-електронного s-s-розсіювання електронів; J_3 – інтеграл Дебая; $\operatorname{tg} \alpha$ – кутовий коефіцієнт лінійної ділянки залежності $\rho(T)$.

На основі експериментальних залежностей $\rho(T)$ для одношарових металевих плівок (на рис. 17 наведені їх приклади для плівок Pd, Pt і Ag) установлено, що при зменшенні товщини зразка спостерігається збільшення кута нахилу залежностей: від $1,9 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$ Ом·м/К (плівки Pd, товщина до 35 нм); від $6 \cdot 10^{-10}$ до $3,7 \cdot 10^{-9}$ (плівки Pt, $d < 50$ нм) і від $0,3 \cdot 10^{-10}$ до $1,3 \cdot 10^{-10}$ Ом·м/К (плівки Ag, $d < 85$ нм), що свідчить про збільшення ролі електрон-фононної взаємодії в терморезистивних властивостях в інтервалі проміжних робочих температур.

Зроблено висновок, що залежність ефективного параметра електрон-фононної взаємодії від товщини плівки (іншими словами, зміна тангенса кута нахилу температурної залежності $\rho(T)$) пов'язана з двома ефектами: деформацією фононного спектра в зразках малих розмірів та проявом класичного розмірного ефекту, у результаті чого на залежності $\rho(T)$ проявляється слабозалежний від температури доданок $\Delta\rho_d$, який обернено пропорційний товщині плівки. Очевидно, що другий фактор більшою мірою впливає на характер залежності $\rho(T)$, це обумовлює збільшення кутового коефіцієнта цієї залежності при зменшенні товщини (рис.17).

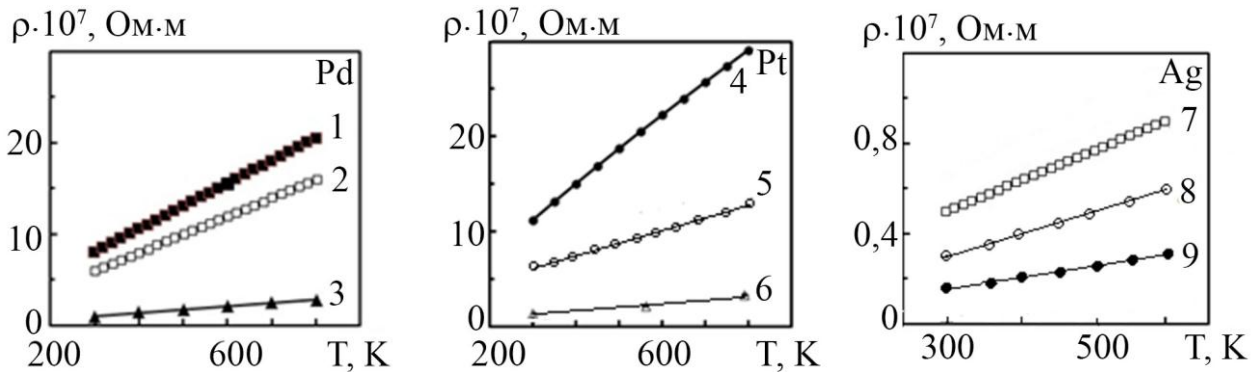


Рис.17. Експериментальні залежності $\rho(T)$ для плівок Pd, Pt і Ag. Товщина, нм: 20 (1), 35 (2), 10 (4), 50 (5), 25 (7), 85 (8) та для масивних зразків (3, 6 і 9)

У другому підрозділі на основі експериментальних залежностей питомого опору від концентрації атомів немагнітної компоненти для плівок ферромагнетик/благородний метал проведені розрахунки внеску в питомий опір різної спінової орієнтації електронів.

У третьому підрозділі узагальнені результати стосовно практичного застосування матеріалів із СЗРЕ у вигляді мультишарів, гранульованих плівкових сплавів, спінових клапанів і плівок на основі наночастинок як ЧЕ сенсорних та інформаційних приладів різного функціонального призначення з високою щільністю запису інформації, що є вигідним і перспективним напрямом електроніки. Зазначено, що для сенсорів на основі плівок і наночастинок властиві простота конструкції, висока стабільність або чутливість до температури і магнітного поля та наявність вихідного сигналу при високих магнітних полях. Зроблено висновок, що об'єднання магніторезистивних і напівпровідникових матеріалів у єдиному технологічному процесі приведе до істотного збільшення щільності запису інформації та чутливості сенсорних елементів електронних приладів та інтегрованих мікросхем.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі набув подальшого розвитку напрям досліджень у галузі плівкового матеріалознавства стосовно фізичних процесів у багатокомпонентних і гетерогенних плівкових матеріалах та їх взаємозв'язку з електрофізичними, магніторезистивними і магнітооптичними властивостями. Зокрема, на експериментальному і теоретичному рівнях вирішена проблема впливу на властивості чутливих елементів плівкових сенсорів на основі феромагнітних, немагнітних і тугоплавких металів та напівпровідникових матеріалів дифузійних процесів, фазоутворення, розмірних і концентраційних ефектів.

Висновки можна сформулювати таким чином.

1. Проведено узагальнення результатів досліджень тензорезистивного ефекту в плівкових матеріалах для сенсорних чутливих елементів, досліджені процеси (дифузія атомів, фазоутворення, тип та інтервал деформації та ін.), які впливають на розмірну, температурну і концентраційну залежності коефіцієнтів тензочутливості, що дозволило зробити такі висновки:
 - уперше запропонована напівфеноменологічна модель для КТ багатошарових плівкових систем в області пружної деформації, в якій коректно врахована деформаційна залежність не лише СДВП електронів, а й коефіцієнтів дзеркальності зовнішніх поверхонь і проходження меж зерен та інтерфейсів; отримана задовільна відповідність розрахункових і експериментальних результатів;
 - встановлено, що при пружній і пластичній деформації одношарових Fe, Cr, Mo, Ni, Pd, Pt і Gd та двошарових плівок Ni/Cr, Fe/Pd, Fe/Pt і Fe/Gd основний внесок у чутливість до деформації роблять процеси розсіювання електронів на межах зерен, в той час як поверхневе розсіювання дає помітний внесок лише при малій товщині зразків;
 - показано, що величина деформації переходу від пружної до пластичної деформації має розмірну залежність і монотонно зменшується від 0,55 до 0,15% (одношарові плівки Pd, Fe, Ni, Cr, Mo) та від 0,40 до 0,15 % (двошарові плівки на основі Fe і Pd, Cr або Mo та Ni і Cr або Mo) при збільшенні загальної

товщини зразків від 20 до 100 нм;

– на основі температурних залежностей питомого опору одношарових металевих плівок проаналізовані особливості високотемпературної електрон-фононої взаємодії, її впливу на температуру Дебая і, як результат, коефіцієнт Пуассона, при цьому встановлено, що в усіх плівкових матеріалах величина коефіцієнта Пуассона буде в цілому менше від 0,5, якщо температура Дебая збільшується при деформації плівки і більша за 0,5 – якщо зменшується;

– максимальні величини КТ спостерігаються при певній концентрації атомів магнітної компоненти і змінюються в межах 16 – 22 одиниць (багатошарові плівки і плівкові сплави на основі Ni і Cr при $c_{Ni} \cong 80-85$ ат.%); близько 20 одиниць (багатошарові плівки на основі Co і Cr при $c_{Co} \cong 70$ ат.%) і 12–15 одиниць (двошарові плівки і мультишари на основі Fe і Pd або Pt при $c_{Fe} \cong 45-55$ ат. %).

2. Вивчення процесів фазоутворення в багатошарових плівкових матеріалах на основі Fe і Pd або Pt, у яких мають місце процеси впорядкування атомів (формування фаз $L1_1$ і $L1_0$), дозволити встановити таке:

– у процесі осадження внаслідок конденсаційно-стимульованої дифузії утворюється невпорядкований т. р. на основі Fe із ГЦК решіткою і параметрами $a = 0,388-0,393$ нм (плівкові матеріали на основі Fe і Pd) і $a = 0,375-0,385$ нм (плівкові матеріали на основі Fe і Pt);

– у процесі термообробки відбувається перехід до упорядкованого ГЦТ твердого розчину: при 780 К (плівки на основі Fe і Pd із загальною товщиною 10–50 нм) з параметром порядку $S = 0,85-0,90$ і параметрами решітки $a = 0,387-0,389$ нм і $c = 0,368-0,369$ нм або при 620 К (плівки на основі Fe і Pt) із $S = 0,75-0,82$ та параметрами $a = 0,382-0,384$ нм і $c = 0,368-0,370$ нм.

3. На основі результатів комплексних досліджень електрофізичних і магніторезистивних властивостей багатошарових плівкових матеріалів феромагнетик/благородний метал показана можливість їх використання як елементів високочутливих сенсорів температури і магнітного поля та терморезисторів і встановлено таке:

– залежність МО від індукції зовнішнього магнітного поля в плівках на основі Fe і Pd при паралельній, перпендикулярній і поперечній геометріях вимірювання має ізотропний характер, і його величина, як і величина опору, монотонно зменшується при зростанні індукції; при загальній концентрації атомів $c_{Pd} = 20-45$ ат.% проявляється АМО, обумовлений впливом феромагнітної складової зразка; при цьому збільшення товщини плівки Pd приводить до зменшення величини МО;

– у багатошарових плівках з кількістю фрагментів від 3 до 10 як до, так і після відпалювання до 780 К спостерігаються ознаки ГМО, а величина МО дещо зростає, що, швидше за все, обумовлено процесами впорядкування і до деякої міри – рекристалізаційними процесами; при $c_{Pd} = 35-65$ % величина МО при $T = 300$ К становить 0,20–0,36 % (300 К) і 0,09–0,59 % (780 К);

– у плівкових матеріалах на основі Fe і Pt при $c_{Pt} = 5-60$ ат.% утворюються гранули із $L1_2$ і $L1_0$ фазами, що спричиняє СЗРЕ і ознаки ефекту ГМО, величина якого не перевищує 0,4% (300 К); незважаючи на відносно малу величину ГМО, ці плівкові матеріали можуть бути використані як чутливі елементи сенсорів

деформації і магнітного поля, оскільки фазовий склад гранул має широкі температурні та концентраційні інтервали стабільності.

4. Результати досліджень електрофізичних властивостей, структурно-фазового стану і елементного складу гетерогенних плівкових матеріалів на основі перехідних металів (Ni, Fe, Cr, Mo, W і Re) для розроблення плівкових тензо- і терморезисторів, датчиків деформації і тиску із стабільними робочими характеристиками в області пластичної деформації та підвищених температур дозволили зробити такі висновки:

– фазовий склад плівок на основі ГЦК-Ni і ОЦК-Cr або a-Mo та ОЦК-Fe і a-Mo, отриманих методом пошарової конденсації після відпалювання до температури $T_6 \cong 750$ К, відповідає т. р. (Ni,Cr) + ОЦК-Cr (при відносно великих товщинах Cr) + сліди Cr_2O_3 ; ГЦК-Ni + ОЦК-Mo і ОЦК-Fe + ОЦК-Mo + ГЦК-FeO, відповідно;

– при конденсації плівок Mo, W і Re в умовах технологічного вакууму відбувається стабілізація фаз упродовження газів залишкової атмосфери в решітку металу, що дозволяє сформувати плівкові матеріали гетерогенного складу на основі металів, їх оксидів, карбідів і карбонітридів;

– у плівкових сплавах і плівках гетерогенного складу величина КТ змінюється від 3 до 12 одиниць, а перехід від пружної (квазіпружної) до пластичної деформації спостерігається при деформації 0,15–0,30 %.

5. На основі прогнозу можливих величин ТКО і КТ встановлено, що величина ТКО істотно залежить від концентрації s + d електронів і для плівок магнітних металів (Fe, Co, Ni) у 1,5–2,5 рази більша порівняно із ТКО для немагнітних (Sc, Ti, Mo, Re, Cr, W) та в 1,2–1,6 разів менша порівняно із плівками благородних (Pd, Pt, Ag, Cu) металів. Величина КТ для плівок магнітних і немагнітних металів (Fe, Co, Ni, Sc, Ti, Cr, Pd, Ag, Cu) не залежить, в рамках точності експерименту, від зазначеної концентрації.

6. Експериментальні дослідження фазового складу і магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів метал/напівпровідник як чутливих елементів сенсорів магнітного поля і контактних структур дозволили встановити таке:

– при формуванні плівкових елементів методом пошарової конденсації з подальшою термообробкою в інтервалі температур 300–1070К утворюються стабільні магнітні фази германідів металів;

– в елементах мікроелектронних і сенсорних приладів у вигляді тришарових плівок на основі Fe і Ge відбувається формування германідів заліза $FeGe_x$ ($1 \leq x < 2$) із феромагнітними властивостями по всьому об'єму зразка, що призводить до зростання величини МО; встановлено, що максимальні значення магнітоопору 0,35–0,44 % спостерігаються при загальній концентрації атомів Ge від 60 до 68 ат.%;

– елементи у вигляді двошарових плівок на основі Fe і Ge (товщина шарів 20–30 нм) мають симетричні лінійні вольт-амперні характеристики і можуть бути використані для формування омичних контактів з наступними робочими параметрами: $R_{\square} = (0,38–0,45) \text{ Ом/м}^2$ і $\text{ТКО} = (5,5–6,9) \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$;

– плівкові матеріали у вигляді двошарових плівок на основі Ni, Cr або Cu і Ge, незважаючи на малу величину ТКО $\sim 10^{-5}–10^{-4} \text{ К}^{-1}$, мають низьку термічну

стійкість у часі, що пов'язано з активними процесами термодифузії атомів металу в напівпровідник.

7. Дослідження впливу поверхневих і температурних ефектів на питомий опір плівкових чутливих елементів сенсорів дозволило встановити таке:

- кутовий коефіцієнт лінійної ділянки температурних залежностей питомого опору одношарових металевих плівок зростає при зменшенні їх товщини: від $1,9 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$ Ом · м / К (плівки Pd); від $6 \cdot 10^{-10}$ до $3,7 \cdot 10^{-9}$ (плівки Pt) і від $0,3 \cdot 10^{-10}$ до $1,3 \cdot 10^{-10}$ Ом · м / К (плівки Ag), що свідчить про збільшення ролі поверхневих ефектів розсіювання електронів у терморезистивних властивостях при температурах більших за температуру Дебая;
- внесок у питомий опір різної спінової орієнтації електронів на основі експериментальних результатів для питомого опору розбавлених металевих плівкових сплавів на основі Fe і Pd або Pt;
- умови формування термостабільних із високою чутливістю до деформації або високою температурною і магнітною чутливістю матеріалів у вигляді багатошарових плівок, мультишарів, гранульованих плівкових сплавів, спінових клапанів на основі металів та напівпровідників як чутливих елементів багатofункціональних сенсорних та інформаційних приладів різного функціонального призначення.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1*. Ласюченко Е. Б. Температурная и деформационная зависимость зернограничного рассеяния электронов / Е. Б. Ласюченко, С. И. Проценко // Тонкие пленки в электронике. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2001. – С. 27–28.
- 2*. Draaisma H. J. G. Magnetic interface anisotropy in Pd/Co and Pd/Fe multilayers / H. J. G. Draaisma, W. J. M. de Jonge, F. J. A. den Broeder // J. Magn. Magn. Mat. – 1987. – V. 66. – P. 351–355.
- 3*. Кондрахова Д. М. Структурно-фазовий стан, електрофізичні та магніторезистивні властивості твердих розчинів у плівкових системах на основі Co і Cu або Ag та Fe і Cr або Cu / Д. М. Кондрахова, Ю. М. Шабельник, О. В. Синашенко, І. Ю. Проценко // Успехи физ. мет. – 2012. – Т. 13, №3. – С. 241 – 267.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Ордворець Л. В. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів в умовах фазоутворення: монографія / Л. В. Ордворець, С. І. Проценко, А. М. Черноус ; [за заг. ред. І. Ю. Проценка]. – Суми : Наукове видання вид-ва СумДУ, 2011. – 203 с. – ISBN 978-966-657-364-6.
2. Protsenko S. I. Futures strain properties of multilayer films materials / S. I. Protsenko, L. V. Odnodvoretz, I. Yu. Protsenko; [editors O. Fesenko, L. Yatsenko] // Chapter in Springer Proceedings in Physics «Nanocomposites, Nanophotonics, Nanobiotechnology, and Applications». – 2014. – V. 156. – P. 345–374.
3. Ордворець Л. В. Розмірний ефект в температурній залежності питомого

- опору металевих плівок / **Л. В. Одневорець** // Ж. нано- електрон. фіз. – 2014. – Т. 6, № 4. – С.04001-1 – 04001-5.
4. Магнеторезистивні та магнетооптичні властивості плівкових систем із можливим спин-залежним розсіюванням електронів (огляд) / [І. Ю. Проценко, І. В. Чешко, **Л. В. Одневорець**, Д. М. Кондрахова, О. В. Пилипенко, Ю. М. Шабельник, О. В. Власенко] // Успехи физ. мет. – 2013. – Т. 14. – С. 229 – 257.
5. Ткач Е. П. Магниторезистивные свойства мультислоёв Fe/Pd / [Е. П. Ткач, **Л. В. Одневорець**, И. Е. Проценко] // Наносистемы, наноматериалы нанотехнологии. – 2012. – Т. 10, Вып. 1. – С. 69 – 77.
6. Sensor and microelectronic elements based on nanoscale granular systems (review) / [S. A. Nepijko, D. Kutnyakhov, S. I. Protsenko, **L. V. Odnodvoretz**, G. Schonhense] // J. Nanopart. Res.– 2011. – V. 12, № 13. – P. 6263–6281.
7. Tenoiresistive effect in thin metal films in the range of elastic and plastic strain / [І. Р. Буряк, D. V. Velykodnyi, **L. V. Odnodvoretz**, I. E. Protsenko, E. P. Tkach] // Tech. Phys. – 2011. – V. 56, № 2. – P. 232 – 237.
8. Эффект Холла в мультишарах на основе Pd і Fe / [О. П. Ткач, О. С. Гришук, Т. П. Говорун, **Л. В. Одневорець**] // Ж. нано- електрон. фіз. – 2011. – Т. 3, № 4. – С. 131 – 137.
9. Electrophysical properties of Ge/Cr thin films / M.S.Desai, **L.V. Odnodvoretz**, S. J. Panchal, I. Yu.Protsenko, N. I. Shumakova, D.V.Velykodnyi // J. Nano-Electron. Phys. – 2011. – V. 3, № 1. – P.232 – 235.
10. Одневорець Л. В. Тензорезистивні властивості плівкових матеріалів на основі Мо, Ні та Fe / [І. П. Бурик, Т. М. Гричановська, **Л. В. Одневорець**] // Металлофіз. новейшие технол. – 2010. – Т. 32, № 3. – С. 345–356.
11. Механічні властивості нанорозмірних і нанокристалічних металевих плівок / [О. П. Ткач, К. В. Тищенко, **Л. В. Одневорець**, С. І. Проценко, Д. В. Великодний, І. Ю. Проценко] // Ж. нано- електрон. фіз. – 2010. – Т. 2, № 1. – С. 51–59.
12. Буряк И. П. Тензорезистивные свойства пленочных материалов на основе Ni и Mo или Cr / [И. П. Буряк, С. И. Воробьев, **Л. В. Одневорець**] // Фізична інженерія поверхні. – 2009. – Т. 7, № 1–2. – С.115–118.
13. Магниторезистивные свойства многослойных наноразмерных пленочных систем / [О. В. Сынашенко, Е. П. Ткач, И. П. Буряк, **Л. В. Одневорець**, С. И. Проценко, Н. И. Шумакова] // ВАНТ. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2009. – № 6. – С. 169–174.
14. Бурик І. П. Тензорезистивні властивості гетерогенних плівкових матеріалів на основі тугоплавких металів / [І. П. Бурик, **Л. В. Одневорець**] // Ж. нано- електрон. фіз. – 2009. – Т. 1, № 3. – С. 24 – 29.
15. Магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових систем на основі Fe і Pd / [О. П. Ткач, **Л. В. Одневорець**, S. Nepijko, С. І. Проценко] // Фізична інженерія поверхні. – 2009. – Т. 7, № 3. – С. 256–261.
16. Размерные примесные эффекты в кристаллической структуре тонких металлических пленок / [**Л. В. Одневорець**, Н. И. Шумакова, Е. П. Ткач, И. Е. Проценко] // Ж. нано- електрон. фіз. – 2009. – № 1. – С. 29–41.
17. Electrophysical properties of Ni/V and Cr/Fe multilayer films / [**L. Odnodvoretz**, S. Protsenko, O. Synashenko, D. Velykodnyi, I. Protsenko] //

Cryst. Res. Technol.– 2009.– V. 44, № 1.– P. 74–81.

18. Проценко С.І. Феноменологічна модель електрофізичних властивостей плівкових гранульованих сплавів / [С.І. Проценко, І.В. Чешко, **Л.В. Олександр**] // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка.– 2008.– № 1.– С. 22–27.

19. Ефект тензочутливості в металевих плівкових матеріалах (огляд) / [**Л. В. Олександр**, С. І. Проценко, А. М. Чорноус, І. Ю. Проценко] // Успехи физ.мет. – 2007. – Т.8, №2. – С. 109–156.

20. Структурно-фазовий стан, стабільність інтерфейсів та електрофізичні властивості двошарових плівкових систем (огляд) / [С. І. Проценко, І. В. Чешко, Д. В. Великодний, І. М. Пазуха, **Л. В. Олександр**, І. Ю. Проценко, О. В. Синашенко] // Успехи физ. мет.– 2007.– Т. 8, № 4.– С. 247–278.

21. Бурик І. П. Структура та електрофізичні властивості нанокристалічних плівок молибдену / [І. П. Бурик, Є. А. Білинський, **Л. В. Олександр**] // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2007. – № 2. – С. 74–78.

22. Бурик І.П. Терморезистивні властивості плівкових матеріалів метал/напівпровідник / І. П. Бурик, **Л. В. Олександр**, А.О. Степаненко // Вісник Сумського державного університету. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2004, № 10(69). – С. 110–117.

23. Lasyuchenko O. Microscopic theory of thensosensibility of multilayer polycrystalline films / [O. Lasyuchenko, **L. Odnodvoretz**, I. Protsenko] // Cryst. Res. Technol.– 2000.– V. 35, № 3.– P. 329–332.

24. Protsenko I. Electroconductivity and thensosensibility of multilayer films / [I. Protsenko, **L. Odnodvoretz**, A. Chornous] // Металлофиз. новейшие технол. – 1998. – Т. 20, № 1. – С. 36–44.

25. Odnodvoretz L. V. Influence of magnetic field on thermal coefficient of resistance of the granular film alloys / [**L. V. Odnodvoretz**] // Proceedings of the International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties». – 2014. – V. 3, № 1. – P. 02NNF13-4.

26. Фазообразование и электрофизические свойства пленочных систем на основе Fe и Pd: сборник научных трудов Международной конференции [«Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур (ФММН-2009)»], (21–23 октября 2009 г.) / Е. П. Ткач, **Л. В. Олександр**, S. Neričko, И. Е. Проценко, G. Schonhense. – 2009.– С. 138–142.

27. Бурик І. П. Тензорезистивні властивості тонких плівок молибдену і заліза / [І. П. Бурик, Д. П. Дудецький, **Л. В. Олександр**] // Нанотехнологии. Том I. Сборник докладов Харьковской нанотехнологической ассамблеи. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008. – С. 151–154.

28. Тензорезистивні властивості багатошарових плівок Ni/V, Ni/Ti і Cr/Fe / [В. В. Бібик, Т. М. Гричановська, Д. П. Дудецький, **Л. В. Олександр**, І. Ю. Проценко] // Тонкие пленки. Том II. Сборник докладов 19-го Международного симпозиума «Тонкие пленки в оптике, нанофотонике и наноэлектронике» Харьковской нанотехнологической ассамблеи-2007. – Харьков.: ННЦ ХФТИ, 2007. – С. 108–119.

2. Наукові праці апробаційного характеру

29. Однодворець Л.В. Властивості чутливих елементів плівкових сенсорів на основі Fe і Pd або Pt : матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції [«Сенсорна електроніка та мікросистемні технології»], (Одеса, 29 вересня – 3 жовтня 2014 р.) / [Л. В.Однодворець]. – Одеса: Одеський національний університет, 2014. – С.142.
30. Однодворець Л.В. Процеси фазоутворення в плівкових системах Fe/Pd і Fe/Pt : матеріали XI Міжнародної конференції [«Фізичні явища в твердих тілах»], (Харків, 3–6 грудня 2013 р.) / [Л.В. Однодворець]. – Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2013. – С. 66.
31. Quadratic magneto-optical effects in two-dimensional permalloy particles investigated by scanning X-ray microscopy: Book of Abstracts [«Verhandlungen Ф»], (Regensburg, 12 March 2013) / [O. V. Pylypenko, L. V. Odnodvoretz, E. Kisker, H.J. Elmers, G. Schonhense]. – Regensburg, 2013. – Germany. – MA 16.35.
32. Удод Ю. С. Чутливий елемент датчика магнітного поля на основі плівок Fe і Ge: Матеріали науково-технічної конференції [«Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ-2013)], (Суми, 22–27 квітня 2013 р.) / [Ю. С. Удод, О. В. Власенко, Л. В. Однодворець]. – Суми: СумДУ, 2013. – С. 126.
33. Crystalline structure and magnetoresistivity properties of Fe/Pd films: materials of [«XLVI Zakopane School of Physics International Symposium»], (Zakopane, 16–21 May, 2011) / [O.P. Tkach, Y. Zabala, L.V. Odnodvoretz, M. Marszałek]. – Krakow: IFJ PAN, 2011. – P. 147.
34. Odnodvoretz L.V. Futures of tensosensitive effect in film materials on the range of elastic and plastic deformation: матеріали XIII Міжнародної конференції [«Фізика і технологія тонких плівок та наносистем»], (Івано-Франківськ, 16–21 травня 2011 р.) / [L. V. Odnodvoretz]. – Івано-Франківськ: ПрНУ ім. В. Стефаника, 2011. – С. 180–181.
35. Ткач О.П. Магніторезистивні властивості мультишарової плівкової системи Fe/Pd: матеріали Міжнар. конф. студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«ЕВРИКА-2011»], (Львів, 18–20 травня 2011 р.) / [О. П. Ткач, Л. В. Однодворець]. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2011. – С. А38.
36. Ткач О. П. Гальваномагнітні властивості мультишарів Fe/Pd: матеріали X Міжнародної конференції [«Фізичні явища в твердих тілах»], (Харків, 6–9 грудня 2009 р.) / [О. П. Ткач, Л. В. Однодворець]. – Харків: ХНУ імені В.Н.Каразіна, 2011. – С.89.
37. Crystal structure and magnetoresistance of multilayer films based on Fe and Pd or Cr: materials of Int. workshop [«Magnetic phenomena in micro- and nanostructure 2010»], (Donetsk, 27–29 May 2010) / [I. Cheshko, S. Nepijko, L. V. Odnodvoretz, O. V. Synashenko, O. P. Tkach, I. Yu. Protsenko]. – Donetsk, 2010. – P. 158 – 159.
38. Однодворець Л. В. Магніторезистивные свойства многослойных пленочных материалов с различной степенью взаимной растворимости: тезисы II Международной научной конференции [«Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь, Россия, Украина»], (Киев, 19–22 октября 2010 г.) / [Л. В. Однодворец, О. В. Сынашенко, И. Е. Проценко]. – Киев: Институт

металлофізики ім. Г. В. Курдюмова НАНУ, 2010. – С. 611.

39. Магніторезистивні властивості плівкових матеріалів на основі Fe і Pd та Fe і Cu: матеріали II наукової Міжнародної конференції [«Сучасні проблеми конденсованого стану»], (Київ, 6–9 жовтня 2010 р.) / [Л. В. **Однорець**, О. В. Синашенко, О. П. Ткач, І. Ю. Проценко]. – Київ: КНУ імені Тараса Шевченка, 2010. – С. 17.

40. Особливості процесів фазоутворення в приладових плівкових структурах, отриманих пошаровою конденсацією: матеріали Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«ЕВРИКА-2009»], (Львів, 20–21 травня 2009 р.) / [Л. В. **Однорець**, В. О. Зленко, О. В. Синашенко, О. П. Ткач, І. В. Чешко]. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2009. – С. А17.

41. Фазовые переходы в пленочных системах на основе Fe и Pd: материалы III Международной школы-семинара молодых ученых [«Рост кристаллов»], (Харьков, 13–16 сентября 2009 г.) / [И. В. Чешко, Е. П. Ткач, Д. А. Кутняхов, Л. В. **Однорець**]. – НАН Украины НТК «Институт монокристаллов», 2009. – С. 5.

42. Однорець Л. В. ТКО двошарових плівкових систем на основі Cr і Cu та Cr і Fe: Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції [«Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»], (Запоріжжя, 24–26 вересня 2008 р.) / [Л. В. **Однорець**, І. О. Шпетний, С. І. Проценко] – Запоріжжя: ЗНТУ. – С. 153–154.

43. Тензорезистивные свойства пленочных материалов на основе металлов и их оксидов: материалы 9-й Международной научно-практической конференции [«Современные информационные и электронные технологии»], (Одесса, 19–23 мая 2008 г.) / [И. П. Бурый, Д. П. Дудецкий, В. А. Соломаха, Е. П. Ткач, Л. В. **Однорець**]. – Одесса : ОНПУ, 2008. – С. 145.

44. Феноменологічна модель електрофізичних властивостей гранульованих плівкових сплавів: Международная конференция [«Современные проблемы физики металлов»], (Киев, 7–9 октября 2008 г.) / [Л. В. **Однорець**, С. І. Проценко, Ч. Панчал, І. В. Чешко]. – Киев: ИМФ НАНУ, 2008. – С. 59.

45. Termoresistivity effect in thin films Fe and Cr/Fe: Book of Abstracts Workshop on [«Smoothing&Characterization of Magnetic Films for Advanced Devices»], (Krakow, 4–6 July 2007) / [D. Dudets'kyi, O. Synashenko, Л. **Odnorets**, I. Protsenko]. – 2007. – P. P-14.

46. Бурик І. П. Тензоефект в нанокристалічних плівках молібдену: матеріали 8-ої Міжнародної конференції [«Фізичні явища в твердих тілах»], (Харків, 11 – 13 грудня 2007 р.) / [І. П. Бурик, Л. В. **Однорець**]. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна. – 2007. – С. 77.

47. Тензорезистивні властивості нанокристалічних плівкових матеріалів на основі Fe, Cr та Mo: матеріали Міжнар. конф. [«Сучасні проблеми фізики твердого тіла»], (Київ, 8–11 жовтня 2007 р.) / [І. П. Бурик, Д. П. Дудецький, Л. В. **Однорець**, М. Маршалек]. – К. : КНУ ім. Т. Шевченка, 2007. – С. 97–98.

48. Концентраційна залежність параметра ГЦК решітки в плівках на основі Co і Cu: Матеріали XI Міжнародної конференції [«Фізика і технологія тонких плівок та наносистем»], (Івано-Франківськ, 7–12 травня 2007 р.) / [Л. В. Одноворець, М. Маршалек, І. Ю. Проценко, І. В. Чешко]. – Івано-Франківськ: ПрНУ, 2007. – С. 34–35.
49. Дудецький Д. П. Електрофізичні властивості тонких плівок заліза: Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«ЕВРИКА-2007»], (Львів, 22–24 травня 2007 р.) / [Д. П. Дудецький, Л. В. Одноворець, Н. І. Шумакова]. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2007. – С. D57.
50. Бурик І. П. Електрофізичні властивості плівкових систем на основі металів і напівпровідників: матеріали Ювілейної X Міжнар. конф. [«Фізика і технологія тонких плівок»], (Івано - Франківськ, 16–21 травня 2005 р.) / [І. П. Бурик, Л. В. Одноворець, Н. М. Опанасюк]. – Івано-Франківськ: ПНУ ім. В. Стефаника, 2005. – С. 287–288.
51. Бурик І. П. Вплив розсіювання електронів на міжфазній межі на тензорезистивні властивості металевих плівкових матеріалів: матеріали 7-ї Міжнародної конференції [«Фізичні явища в твердих тілах»], (Харків, 14–15 грудня 2005 р.) / [І. П. Бурик, Л. В. Одноворець]. – Х. : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2005. – С. 64.
52. Пасько Н. І. Температурна залежність опору та ТКО двошарових плівок на основі Cr, Cu та Ge: Матеріали Міжнародної конференції молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«ЕВРИКА-2004»], (Львів, 19–21 травня 2004 р.) / [Н. І. Пасько, Л. В. Одноворець]. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка. – 2004. – С. 163.

3. Праці, які додатково відображають наукові результати

53. Основи спінтроніки: матеріали, прилади та пристрої: навч. посібник / Ю. А. Куницький, В. В. Курилюк, Л. В. Одноворець, І. Ю. Проценко. – Суми : Вид-во СумДУ, 2013. – 127 с. – ISBN 978-966-657-478-0.
54. Бібик В. В. Фізика твердого тіла: навч. посібник / В. В. Бібик, Т. М. Гричановська, Л. В. Одноворець, Н. І. Шумакова. – Суми: СумДУ, 2009. – 200 с. – ISBN 978-966-657-270-0.
55. Проценко І. Ю. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми) : навч. посібник / І. Ю. Проценко, Л. В. Одноворець. – Суми: СумДУ, 2011. – 231 с. – ISBN 978-966-657-336-3.
56. Stress topology within silicon single-crystal cantilever beam / [A. P. Kuz'menko, D. I. Timakov, P. V. Abakumov, M. B. Dobromyslov, L. V. Odnodvoretz] // J. Nano-Electron. Phys. – 2013. – V. 5, №3. – P. 03024-1 – 03024-5.
57. Investigations of magnetoresistance of multilayers based on Fe/Cu and Fe/Cr // [O. V. Synashenko, C. J. Panchal, M. S. Desai, L. V. Odnodvoretz, N. I. Shumakova, I. Yu. Protsenko] // Int. J. Micro- Nanoelectron. Circ. Systems. – 2011. – V. 2(1). – P. 7–11.

58. Деякі особливості тензорезистивного ефекту в металевих дротах при їх пластичній деформації / [І. П. Бурик, Д. В. Великодний, **Л. В. Одиногорець**, Н. І. Шумакова, І. Ю. Проценко] // ФХТТ. – 2006. – Т. 7, № 2. – С. 241–244.
59. Одиногорець Л. В. Диффузійні процеси в багатослойних плівках: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції [«Україна наукова 2003»], (Дніпропетровськ, 16–20 червня 2003 р.) / [Л. В. Одиногорець]. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2003. – Т. 31. – С. 20–22.
60. Одиногорець Л. В. Електрофізическіє свойства двухслойних плінок Cu/Cr в умовах взаємної дифузії атомів / [Л. В. Одиногорець, С. І. Проценко, А. І. Салтыкова] // Металлофіз. новейшіє технол. – 1999. – Т. 21, № 8. – С. 71–74.

АНОТАЦІЯ

Одиногорець Л. В. Електрофізичні і магніторезистивні властивості багатослойних та гетерогенних плівкових матеріалів сенсорної техніки. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2015.

У дисертаційній роботі подані результати комплексних досліджень впливу процесів фазоутворення, структурних перетворень і дифузійних процесів, температурних та концентраційних ефектів на електрофізичні (термічний коефіцієнт опору і коефіцієнт тензочутливості), магніторезистивні (анізотропний і гігантський магнітоопір, ефект Холла) таі магнітооптичні (магнітооптичний ефект Керра) властивості чутливих елементів плівкових сенсорів на основі феромагнітних (Co, Fe, Ni, Gd), антиферомагнітних (Cr), немагнітних (Cu, Ag, Pd, Pt), тугоплавких (Mo, W і Re) або напівпровідникових (Ge) компонент та гетерогенних плівкових систем на основі перехідних металів (Mo, Ni, Fe, Cr, W і Re). Запропонована напівфеноменологічна модель для КТ багатослойних плівкових систем в області пружної деформації, в якій вперше коректно врахована деформаційна залежність коефіцієнтів дзеркальності зовнішніх поверхонь і проходження меж зерен та інтерфейсів. Отримана задовільна відповідність розрахункових і експериментальних результатів. Вивчені фізичні процеси в плівкових матеріалах (одно- і багатослойні плівки, мультишари, гранульовані плівкові сплави, структурно-упорядковані системи, плівки гетерогенного складу) з точки зору їх можливого застосування як чутливих елементів тензо- і терморезисторів та сенсорів температури, деформації, тиску і магнітного поля з високою температурною, деформаційною і магнітною стабільністю або чутливістю; контактних структур; елементів багатфункціональних сенсорних та інформаційних приладів різного функціонального призначення.

Ключові слова: мультишари, гетерогенні плівкові матеріали, чутливий елемент сенсора, фазоутворення, коефіцієнт тензочутливості, термічний коефіцієнт опору, процеси впорядкування, магнітоопір.

АННОТАЦИЯ

Одноворец Л. В. Электрофизические и магниторезистивные свойства многослойных и гетерогенных пленочных материалов сенсорной техники. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2015.

В диссертационной работе представлены результаты комплексных исследований влияния процессов фазообразования, структурных преобразований и диффузионных процессов, температурных и концентрационных эффектов на электрофизические (термический коэффициент сопротивления и коэффициент тензочувствительности), магниторезистивные (анизотропное и гигантское магнитосопротивление, эффект Холла) и магнитооптические (магнитооптический эффект Керра) свойства чувствительных элементов пленочных сенсоров на основе ферромагнитных (Co, Fe, Ni, Gd), антиферромагнитных (Cr), немагнитных (Cu, Ag, Pd, Pt), тугоплавких (Mo, W и Re) или полупроводниковых (Ge) компонент и гетерогенных пленочных систем на основе переходных металлов (Mo, Ni, Fe, Cr, W и Re). Предложена полуфеноменологическая модель для КТ многослойных пленочных систем в области упругой деформации, в которой впервые корректно учтена деформационная зависимость коэффициентов зеркальности внешних поверхностей и прохождения границ зерен и интерфейсов. Получено удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

Проведено обобщение результатов исследований тензорезистивного эффекта в пленочных материалах сенсорных чувствительных элементов, исследованы процессы (фазообразование, диффузия атомов, тип и интервал деформации и др.), влияющие на размерную, температурную и концентрационную зависимости коэффициентов тензочувствительности. Проведены комплексные исследования электрофизических и магниторезистивных свойств многослойных пленочных материалов ферромагнетик/благородный металл, изучены процессы упорядочения атомов в них, сделан вывод о возможности их использования в качестве чувствительных элементов сенсоров деформации и магнитного поля в широких температурном и концентрационном интервалах стабильности; гетерогенных пленок на основе переходных металлов (Mo, Ni, Fe, Cr, W и Re) для разработки металлопленочных тензо- и терморезисторов, датчиков деформации и давления с высокостабильными рабочими характеристиками в области пластической деформации и повышенных температур; пленочных материалов металл/полупроводник как чувствительных элементов сенсоров магнитного поля и контактных структур.

Изучены физические процессы в пленочных материалах (одно- и многослойные пленки, мультислои, гранулированные пленочные сплавы, структурно-упорядоченные системы, пленки гетерогенного состава) с точки зрения их возможного применения как чувствительных элементов тензо- и терморезисторов и сенсоров температуры, деформации, давления и магнитного

поля с высокими температурной, деформационной и магнитной стабильностью или чувствительностью; контактных структур; элементов многофункциональных сенсорных и информационных приборов различного функционального назначения.

Ключевые слова: мультислои, гетерогенные пленочные материалы, чувствительный элемент сенсора, фазообразование, коэффициент тензочувствительности, термический коэффициент сопротивления, процессы упорядочения, магнитосопротивление.

SUMMARY

Odnodvoretz L. V. Electrophysical and magnetoresistance properties of multilayers and heterogenous film materials of sensor technic. – Manuscript.

The thesis for Doctor's degree on physical and mathematical sciences, speciality 01.04.01 – physics of apparatus devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2015.

The thesis presents the complex studies results of the influence of the phase formation processes, structural changes and diffusion processes, temperature and concentration effects on the electrophysical (thermal coefficient of resistance and strain coefficient), magnetoresistive (anisotropic and giant magnetoresistance, Hall effect) and magneto-optical (magneto-optical Kerr effect) properties of film sensors sensitive elements based on ferromagnetic (Co, Fe, Ni, Gd), antiferromagnetic (Cr), nonmagnetic (Cu, Ag, Pd, Pt), refractory (Mo, W and Re) or semiconductor (Ge) components as well as heterogeneous film systems based on transition metals (Mo, Ni, Fe, Cr, W and Re). The semiphenomenological model for strain coefficient of multilayer film systems in elastic strain have been offered. This is the first model that takes into account the deformation dependence of the the parameter of specular reflection from external surfaces and the transmission parameter at the grain boundary and interfaces of electrons. The satisfactory correspondence between the calculated and experimental results was obtained. The physical processes in film materials (single films and multilayers, granulated film alloys, structurally ordered systems, heterogeneous film structure) have been studied in terms of their possible use as sensing elements, strain sensors, thermistors and temperature sensors, pressure and magnetic field sensors with high temperature, deformation and magnetic stability or sensitivity; contact structures; multi-sensory elements and information devices of different functions.

Keywords: multilayers, heterogeneous film materials, sensitive element of sensor, phase formation, strain coefficient, coefficient of thermal resistance, processes of ordering, magnetoresistance.

Підписано до друку 19.01.2015.

Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 2,5. Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 пр. Зам. №.63.

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.