

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Проценко Сергій Іванович

УДК 621.793.8; 316.8

**ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ І ВЛАСТИВОСТІ
НАНОСТРУКТУРОВАНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ
СПІН-ЗАЛЕЖНИМ РОЗСІЮВАННЯМ ЕЛЕКТРОНІВ**

01.04.07– фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

Суми - 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий консультант – доктор фізико-математичних наук, професор
Чорноус Анатолій Миколайович,
Сумський державний університет, проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор
Азаренков Микола Олексійович,
Харківський національний університет імені В.
Н. Каразіна, проректор з науково-педагогічної роботи;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Татаренко Валентин Андрійович,
Інститут металофізики імені Г. В. Курдюмова НАН України (м. Київ), провідний науковий співробітник відділу теорії твердого тіла;

доктор фізико-математичних наук, професор
Погребняк Олександр Дмитрович,
Сумський державний університет, завідувач кафедри наноелектроніки.

Захист відбудеться «20» січня 2012 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.
Автореферат розіслано «15» грудня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. О. Журба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Наноструктуровані плівкові матеріали у вигляді нанорозмірних багатошарових плівкових систем, мультишарів або масивів малих частинок знайшли широке застосування в мікро- і опто електроніці, спінтроніці, пристроях захисту інформації, сенсорній техніці [1-12]. Незважаючи на вражаючі успіхи у цьому напрямі, залишається ряд проблем, вирішення яких дозволило б створювати більш ефективні мікросенсори температури, тиску, деформації, лінійних і кутових переміщень, магнітних полів на основі таких явищ, як температурна залежність опору (ТКО), тензочутливість (КТ), магнітоопір (МО), гігантський магнітний опір (ГМО) і т.п. До таких проблем, зокрема, належить обмежена можливість прогнозування величини ТКО, КТ, МО на основі відомих класичних чи феноменологічних моделей. Причина цього пов'язана із тим, що класичні моделі Тельє, Тоссе і Пішар; Варкуша і Дімміха; Дехтярука і Колесніченка при всій своїй послідовності, фізичній і математичній логічності потребують знання великої кількості параметрів електроперенесення, які неможливо не лише точно розрахувати, але й виміряти експериментально. У цьому відношенні феноменологічні моделі, які адекватні структурно-фазовому стану плівкової системи, можуть бути більш ефективними для прогнозування електро- і магніторезистивних властивостей. У всіх цих випадках дуже важливо знати, які фізичні процеси реалізуються у плівкових зразках. Мова йде про особливості процесів розсіювання електронів під дією температурних, деформаційних і магнітних полів; особливості дифузійних процесів (обмежена чи необмежена розчинність компонент, перемішування атомів чи розшарування твердих розчинів (т. р.), конденсаційно-стимульована дифузія (КСД) чи термодифузія (ТД), локалізація т. р. біля інтерфейсів чи по всьому об'єму зразка); коерцетивність, намагнічування спін-вентильних структур.

Отже, з точки зору отримання результатів фундаментального характеру і практичної їх значущості актуальною задачею є проведення комплексних досліджень фізичних процесів у наноструктурованих плівкових матеріалах, у т.ч. із спін-залежним розсіюванням електронів, і встановлення кореляції з їх структурними, електрофізичними, магніторезистивними і магніто-оптичними властивостями. Це і визначило мету і задачу даного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертація виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету. Основні результати були отримані у ході виконання планових завдань наукових тем і спільних проектів: держбюджетної теми „Вплив статичної деформації і температури на електрофізичні властивості багатошарових плівкових систем” (2003-2005 рр.), № 0103U000773, виконавець; спільного проекту науково-технічного співробітництва „Дифузійні процеси і транспортні властивості мультишарів і тонких плівок” (2004-2005 рр.) між Сумським державним університетом 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 Сумським державним університетом та

Інститутом фізики САН (м. Братислава, Словаччина), договір № М/148-2006 від 07.06.2006 р., відповідальний 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 Сумським державним університетом 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 Сумським державним університетом та Університетом Барода (м. Ваходара, Індія), договір № М/344-2008 від 23.05.2008 р., 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 Сумським державним університетом та Інститутом фізики при Університеті ім. Й. Гуттенберга (м. Майнц, Німеччина), договір № М/178-2009 від 08.04.2009 р., виконавець; спільного проекту науково-технічного співробітництва „Віддалено-контрольована лабораторія для дослідження фізичних властивостей багатошарових нанорозмірних систем із спін-залежним розсіюванням електронів” (2009-2010 рр.) між Сумським державним університетом та Університетом у м. Марібор (м. Марібор, Словенія), договір № М/54-2009 від 06.03.2009 р., керівник проекту.

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи – вивчення фізичних процесів у багатошарових плівкових системах і мультишарах із спін- залежним розсіюванням електронів та встановлення кореляції між цими процесами і електрофізичними, магніторезистивними та магнітооптичними властивостями матеріалів.

Для досягнення сформульованої мети необхідно було вирішити такі основні завдання:

- сконструювати і здійснити монтаж автоматизованого комплексу у варіанті віддалено контрольованої лабораторії з відповідним програмним забезпеченням для дослідження ТКО і КТ в області пружної (до 1%) і пластичної (до 2%) деформації;

- дослідити фазові та структурні перетворення у багатошарових плівкових системах, у т.ч. і двошарових, та мультишарах Cu та Co і Cu, Ag або Au, які відбуваються в результаті взаємної дифузії атомів, зміни загальної концентрації атомів компонент, термообробки, а у випадку мультишарів Fe/Cr під дією потоку високоенергетичних іонів Au⁺¹⁵;

– установити фізичні фактори та умови формування т.р. у плівкових системах з необмеженою і обмеженою розчинністю компонентів, при локалізації т.р. біля інтерфейсів або по усьому об'єму зразка, умови розмиття або стабільності інтерфейсів і окремих шарів;

– дослідити особливості дифузійних процесів (конденсаційно-стимульована дифузія і термодифузія) методами вторинно-іонної мас-спектрометрії (ВІМС), оже-електронної спектроскопії (ОЕС), низькотемпературної резистометрії та розрахунковим методом на основі запропонованої класичної моделі;

– дослідити електрофізичні, магніторезистивні та магніто-оптичні властивості багатошарових плівкових систем та мультишарів і розвинути фізичні уявлення про особливості поверхневого, зерномежового та інтерфейсного розсіювання електронів при дії температурних, механічних і магнітних полів;

– розробити феноменологічні теоретичні моделі для ТКО, КТ і МО гранульованих плівкових сплавів, т.р., які локалізуються біля інтерфейсів або по усьому об'єму зразка, із урахуванням температурної залежності параметрів електроперенесення і динаміки руху електронів у магнітному полі;

– удосконалити методіку і розробити програмне забезпечення для розв'язання оберненої задачі нуль-еліпсометрії за допомогою генетичного алгоритму;

– запропонувати наноструктуру функціонального елемента спіні-вентиля на основі шарів Co і Au (Cu) та Cr; вивчити фізичні процеси у ньому і магніто-оптичні властивості та зробити висновок стосовно ефективності застосування плівок Au або Cu у спіні-вентиллях.

Об'єкт дослідження – фізичні процеси у багатошарових плівкових системах і мультишарах із спіні-залежним розсіюванням електронів і взаємозв'язок їх із електрофізичними, магніторезистивними і магніто-оптичними властивостями.

Предмет дослідження – електрофізичні (ТКО і КТ в області пружної і пластичної деформації), магніторезистивні (МО і ГМО) і магніто-оптичні (магніто-оптичний ефект Керра (МОКЕ), еліпсометрія) властивості багатошарових плівкових систем і мультишарів на основі Fe і Cr або Cu; Co і Cu, Ag або Au.

Методи досліджень. Для отримання і термообробки плівкових зразків у вакуумі використовувався метод термічного випаровування і пошарової конденсації. Для дослідження ТКО і тензочутливості був сконструйований і виготовлений на основі стандартної установки ВУП 5М автоматизований комплекс у варіанті віддалено контролюваної лабораторної установки. Дифракційні і структурні дослідження провадилися методами електронографії, рентгенографії, електронної, атомно-силової і тунельної мікроскопії та рентгенівської рефлектометрії. Дифузійні процеси вивчалися методами ВІМС, ОЕС, низькотемпературної резистометрії і розрахунковим методом. Процес розмиття інтерфейсів у мультишарах Fe/Cr досліджувався методом конверсійної електронної мессбау-рівської спектроскопії (КЕМС), а магнітооптичні властивості і процеси – методами МОКЕ, еліпсометрії і генетичного алгоритму.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Уперше запропонований комплексний підхід у вивченні взаємного зв'язку між фізичними процесами у плівкових матеріалах із спін-залежним розсіюванням електронів, які формуються методом пошарової конденсації, та їх електрофізичними, магніторезистивними та магнітооптичними властивостями.

2. Запропоновані феноменологічні моделі для електрофізичних і магніторезистивних властивостей багатошарових плівкових систем, які більш детально і коректно враховують процеси розсіювання електронів на межах зерен, інтерфейсах і зовнішніх поверхнях, утворення т. р. біля інтерфейсів або по усьому об'єму разка та стабілізацію гранульованого стану.

3. Установлені умови формування у багатошарових плівкових системах і мультишарах т. р. на основі Fe і Cu; Co і Cu, Ag або Au з елементами гранульованого стану і з'ясована причина його відсутності у випадку т. р. на основі Fe і Cr.

4. Вивчений магнітодеформаційний ефект тензочутливості, який має анізотропний характер і може бути охарактеризований відповідним анізотропним коефіцієнтом.

5. Уперше вивчено ефект тензочутливості одночасно в області пружної та пластичної деформації і встановлена значна роль процесу зерномежового розсіювання електронів при пластичній деформації, що спричиняє відносно велике значення КТ плівкових матеріалів.

6. Уперше комплексно вивчені особливості конденсаційно-стимульованої, іонно-стимульованої та термічної дифузії у нанорозмірних і нанокристалічних плівкових системах методами ВІМС, ОЕС, низькотемпературної резистометрії та розрахункового методу на основі запропонованої класичної моделі.

7. Запропонована наноструктура спін-вентиля на основі експериментальних досліджень магніто-оптичних і еліпсометричних характеристик багатошарових плівок на основі Co, Au (Cu) і Cr.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Автоматизований комплекс для дослідження термо- і тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів представляє собою різновид віддаленої контрольованої лабораторії і дозволяє в автоматичному режимі проводити дослідження; він може бути використаний при дослідженні інших процесів і явищ у плівкових матеріалах.

2. Досягнутий рівень розуміння фізичних процесів у плівкових системах на основі Fe і Cr або Cu, Co і Cu, Ag або Au і їх взаємозв'язку із властивостями може бути методологічною основою створення більш ефективних класичних моделей для плівкових матеріалів із різним ступенем дифузійної взаємодії.

3. Теоретичні та експериментальні дослідження термо-, тензо- і магніторезистивних властивостей плівкових систем у вигляді багатошарових плівок чи мультишарів можуть бути використані при створенні чутливих елементів для сенсорів температури, деформації (пружної і пластичної), магнітних полів.

4. Магніто-оптичні та еліпсометричні дослідження дозволили запропонувати наноструктуру спін-вентиля на основі шарів Au (Cu) Co і Cr; методика її виготовлення може бути застосована і для інших наноструктур.

5. Ефективне застосування генетичного алгоритму при розв'язуванні оберненої задачі нуль-еліпсометрії може бути стимулом для його застосування при розв'язанні інших наукових задач.

Особистий внесок здобувача полягає в ініціюванні проведення досліджень електрофізичних властивостей, дифузійних процесів, структурно-фазового стану, магніто-оптичних і оптичних властивостей. Наведені у роботі результати отримані як особисто автором, так і при співпраці з колегами (Великодний Д. В., Синашенко О. В., Чешко І. В., Однодворець Л. В., Салтикова А. І., Забіла Є. В., Ткач О. П. і Говорун Т. В.). Автор сконструював і виготовив автоматизований комплекс для дослідження електрофізичних властивостей, розробив програмне забезпечення для нього і для розв'язування оберненої задачі еліпсометрії за допомогою генетичного алгоритму. В усіх роботах автор розробив методики досліджень і вибрав методи розв'язання поставлених задач. Отримані результати обговорювалися і узагальнювалися спільно з науковим консультантом проф. Чорноусом А. М. і частково із проф. Маршалек М. (стосовно ГМО у мультишарах Fe/Cr і методу ОЕС) та проф. Майковою Є. (стосовно МОКЕ і еліпсометрії). Особисто автором підготовлені статті [2, 3, 5, 6, 8, 11, 13, 17, 18, 20, 21, 22,], підрозділи 1.2; 1.3; 2.3; 2.4 і 3.5 в [1], розділ 7 і підрозділи 4.6 і 4.7 в [41], окремі розділи у статтях [4, 7, 9, 10, 12, 15, 16, 20, 27, 44] і тези доповідей [26, 30, 31, 33, 34, 36, 38, 46 - 48, 50, 53, 54, 57]. Усі наукові положення та висновки, винесені на захист, належать автору дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи були представлені на ряді конференцій, шкіл, асамблей і семінарів, у тому числі: науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів Сумського державного університету (2006-2011 рр.); X, XI і XII Міжнародних конференціях МК ФТТПН (м. Івано-Франківськ, 2005, 2007, 2009, 2011 рр.); 7-й, 8-й Міжнародних конференціях „Фізичні явища в твердих тілах” (м. Харків, 2005, 2007 рр.); Всеукраїнській конференції ЄВРИКА (м. Львів, 2006, 2008, 2010, 2011 рр.); Міжнародній конференції „Современные информационные системы” (мм. Харків, Туапсе, 2007 р.); Конференції НАНСИС 2007 (м. Київ, 2007 р.); Міжнародній конференції „Сучасні проблеми фізики твердого тіла” (м. Київ, 2007 р.); Workshop on Smoothing and Characterization Magnetic Films for Advanced Devices (м. Краків, 2007 р.); Konferencja Optoelektronicze i Elektronicze (м. Краків, 2006 р.); XIX Міжнародному симпозиумі „Тонкие пленки в оптике, нанофотонике и нанoeлектронике” (м. Харків, 2007 р.); Всеукраїнській конференції молодих вчених „Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології” (м. Київ, 2008 р.); XLII, XLIV, XLVI Zakopane School of Physics (м. Краків, 2008, 2009, 2011 рр.); XXI Congress and General Assembly „IUR Cr 2008” (м. Осака, 2008 р.); Міжнародній конференції „Современные проблемы физики металлов” (м. Київ, 2008 р.); Харьковской нанотехнологической Ассамблее (м. Харків, 2008 р.); 12-му Міжнародному молодіжному форумі „Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” (м. Харків, 2008 р.); Міжнародній науково-практичній конференції „Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій” (м. Запоріжжя, 2008 р.); 2-й Всеукраїнській науковій конференції молодих вчених „Фізика низьких темпе-

ратур” (м. Харків, 2009 р.); Werhandlungen Φ (м. Дрезден, 2009 р.); Conference ICL 2009 (м. Віллах, 2009 р.); XXII International Symposium of Informatic, Communication and Atomation Technologies (IEEE) (м. Сараєво, 2009 р.); Міжнародній конференції „МОДЕЛЮВАННЯ -2010” (м. Київ, 2010 р.); 20- й Міжнародній Кримській конференції „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (м. Севастополь, 2010 р.); 4- й Міжнародній конференції „Фізичні і хімічні принципи формування і модифікації мікро- і наноструктур” (м. Харків, 2010 р.); VIII Міжнародній конференції „Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons” (м. Казімеж Дольний, 2010 р.); 3- й Міжнародній конференції „Radiation Interaction with Material and Its Use in Technologies 2010” (м. Каунас, 2010 р.); 3-й Міжнародній конференції HighMaTech (м. Київ, 2011 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображені у 57 публікаціях: 24 статтях у провідних фахових журналах, у т.ч. 2 оглядах [15, 16]; колективній монографії [1]; навчальному посібнику із грифом МОН України [41]; 4 статтях у матеріалах конференцій та 27 тезах доповідей на конференціях, більшість із яких представляв особисто автор.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, семи розділів оригінальних досліджень, висновків, списку використаних джерел та додатків. Вона містить 320 сторінок, із них 216 сторінок основного тексту, 104 рис. і 43 табл., у тому числі 58 рис. і 19 табл. на окремих 52 аркушах, список використаних джерел з 410 найменувань на 42 стор., 3 додатки на 5 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета та задачі дослідження, зазначені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, відмічений зв'язок роботи з науковими темами та міжнародними проектами науково-технічного співробітництва. Подана також інформація стосовно апробації отриманих результатів і особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** «Електро- і магніторезистивні та магніто-оптичні властивості тонких плівок і мультишарів (літературний огляд)» представлений огляд літературних даних стосовно електрофізичних, тензо- і магніторезистивних та магніто-оптичних властивостей пліткових матеріалів. Зокрема, у *першому підрозділі* аналізуються напівкласичні і феноменологічні теоретичні моделі, які описують явища ТКО і КТ в одно- і багатошарових плівках і були запропоновані у 1980-2000 рр. К. Тельє, А. Тоссе і К. Пішар; Ф. Варкушем і Р. Дімміхом; Ю. О. Колесніченком, Л. В. Дехтяруком та ін. авторами. Особливо підкреслено, що обробка експериментальних результатів для одношарових плівок у рамках цих моделей дозволяє отримати сукупність таких параметрів електроперенесення, як середня довжина вільного пробігу (СДВП), коефіцієнтів дзеркальності (p) і проходження межі зерна (r) та інтерфейсу (Q), які використовуються при апробації теоретичних моделей у випадку багатошарових систем. Крім того, відмічається велике концептуальне значення цих моделей, оскільки вони дозволяють розуміти суть фізичних процесів в електрофізичних властивостях і послужити методологічною основою для побудови аналогічних моделей

для багатошарових систем і мультишарів. Значну увагу приділено аналізу моделі тензоефекту Ф. Катера і М. Ель-Гіті для двошарових плівок, на основі якої була розвинута напівфеноменологічна модель для багатошарових плівкових систем, яка враховує не тільки поверхневе, але й зерномежове та інтерфейсне розсіювання електронів, а також зміну параметрів електроперенесення (СДВП, p , r і Q) при деформації плівкових зразків. Саме зазначені механізми розсіювання електронів та деформаційна залежність параметрів електроперенесення дають основний внесок у величину КТ, оскільки внесок геометричного фактору відносно малий. Відмічається, що коректне урахування температурної залежності зазначених параметрів електроперенесення дозволить розвинути аналогічну напівфеноменологічну модель для ТКО багатошарових плівкових систем. У цьому самому підрозділі систематизовані експериментальні роботи останніх років стосовно як величини КТ одно- і багатокомпонентних плівок у вигляді плівкових сплавів, зразків гетерогенного складу або одно- і багатошарових систем, так і з точки зору їх застосування як чутливих елементів сенсорів деформації і тиску та їх термічної стабільності.

У *другому підрозділі* зроблено аналіз робіт стосовно магніторезистивних властивостей (МО і ГМО) мультишарів на основі Cr і Fe; Co і Cu, Ag або Au; Cu і NiFe або Co і т.п. Наведені основні співвідношення резистивної моделі для ефекту МО. Представлені експериментальні результати, що ілюструють роль немагнітного прошарку, вплив його товщини на величину ефекту. Детально розглянуто питання про ефект ГМО у гранульованих плівкових сплавах, можливі механізми їх формування. Коротко викладена концепція виготовлення сенсорів, у т.ч. спін-вентилів, на основі ефекту ГМО.

У *третьому підрозділі* здійснено короткий аналіз можливості застосування методики МОКЕ при вивченні структурних і функціональних особливостей спін-вентильних структур. Розглянуті можливі варіанти таких структур на основі багатошарових систем і гранульованих сплавів та відповідні якісні залежності МОКЕ і ГМО від індукції магнітного поля. Підкреслюється, що між сигналами МОКЕ і ГМО має місце чітка кореляція, що відкриває можливість заміняти методику ГМО на магніто-оптичні вимірювання.

Грунтуючись на результатах аналізу літературних даних, відмічаються проблеми, яким мало приділялося уваги у процесі дослідження електрофізичних і магніторезистивних та магніто-оптичних властивостей плівкових систем із спін-залежним розсіюванням електронів, сформульовані методи і методики та завдання досліджень, які використовувалися і вирішувалися в роботі.

У **другому розділі** «Методика і техніка експерименту» спочатку сформульовані основні завдання, описані методи і методики, які були використані в роботі. Основна увага приділена методикам отримання одно- і багатошарових плівкових систем та мультишарів у високому (установка ВУП-5М) та надвисокому (установки UVS - 500 BALZERS та D - 356 ASSLAR в Інституті фізики САН, м. Братислава) вакуумі для дослідження електрофізичних, магніторезистивних та магніто-оптичних властивостей і спін-вентильних структур. Детально описані запропоновані у роботі блок-схеми для реєстрування температурної залежності електроопору та автоматизованої системи для дослідження тензорези-

стивних властивостей у варіанті віддалено контрольованої лабораторії. Детально описані методики вимірювання МО, ГМО і МОКЕ та методу еліпсометрії не тільки на базі СумДУ, але і в ІФ САН та Інституті ядерної фізики ПАН (м. Краків). Поряд із цими методиками частково використовувався (при аналізі процесів перемішування атомів біля інтерфейсів мультишарів $[\text{Fe}/\text{Cr}]_n/\text{П}$) метод КЕМС.

Оскільки дифузійні процеси відіграють велику роль у фізичних властивостях плівкових матеріалів, то велика увага була приділена їх дослідженню методами ОЕС (на базі ІЯФ ПАН), ВІМС, низькотемпературної резистометрії і шляхом порівняння експериментальних результатів із розрахунковими на основі запропонованої теоретичної моделі.

Кристалічна структура плівкових матеріалів, її особливості та еволюція при термообробці вивчалися методами ПЕМ, АСМ і ТЕМ та дифракційними методами електроннографії (мікроскоп ПЕМ-125К) і рентгенографії (дифрактометри Bruker D8 Discover і Philips X'Pert MRD Pro). Рентгенівські дослідження проводились у двох режимах роботи дифрактометрів – фазового аналізу і рефлектометрії. Для ілюстрації можливості методів і методик, які використовувалися, у другому розділі подані приклади найбільш характерних температурних і деформаційних залежностей опору, на основі яких проводиться розрахунок ТКО і КТ; оже-спектрів для двошарових нанорозмірних плівкових систем, які фіксувались у процесі нарощування верхнього шару; мікрознімків, отриманих методами ПЕМ і АСМ, електроннограм та рентгенівських дифрактограм і рефлектограм.

Третій розділ «Електрофізичні властивості багатошарових плівкових систем» складається із трьох підрозділів.

У *першому підрозділі* подані результати теоретичного та експериментального дослідження термічного коефіцієнту опору багатошарових плівкових систем. Зокрема, удосконалена напівфеноменологічну та запропоновані феноменологічні теоретичні моделі для ТКО плівкових систем трьох типів, у яких максимально зберігається індивідуальність окремих шарів (фрагмент такої системи відповідає біпластині); утворюється біля інтерфейсу проміжний шар т.р. або інтерметалідів та граничний випадок попередньої моделі, коли по усій товщині плівкової системи утворюється гранульований т.р.

Вихідні положення напівфеноменологічної моделі враховують практично всі можливі процеси розсіювання електронів (за винятком дифузійних) і формулюються таким чином: багатошарова система моделюється як паралельне з'єднання n провідників, кожен із яких характеризується товщиною d_i ; СДВП λ_{0i} ; коефіцієнтами дзеркальності p_i та проходження межі зерен (МЗ) r_i й інтерфейсів Q_{ij} (із i -го в j -й шар). Температурні ефекти у параметрах електроперенесення враховуються відповідними термічними коефіцієнтами:

$$\beta_{0i} = -\frac{d \ln \lambda_{0i}}{dT}, \quad \beta_{p_i} = -\frac{d \ln p_i}{dT}, \quad \beta_{r_i} = -\frac{d \ln r_i}{dT} \quad \text{та} \quad \beta_{Q_{ij}} = -\frac{d \ln Q_{ij}}{dT}.$$

Крім того, допускається, що багатошарова система являє собою паралельне з'єднання n провідників; залежно від співвідношення між товщинами окремих шарів d_i і λ_{0i} міжшарові переходи електронів можуть відбуватися між сусідніми шарами (із i -го в $(i\pm 1)$ -й шари) або між декількома шарами (наприклад, із i -го в $(i\pm 1)$ -й та $(i\pm 2)$ -й шари); на межі поділу (МП) шарів мають місце процеси як дифузного, так і дзеркального відбиття електронів (коефіцієнт відбиття $P_i \cong p_i$) та міжшарових переходів; величини Q_{ij} та β_{Qij} приблизно дорівнюють r_i та β_{ri} . Останнє припущення обґрунтовується на основі розрахованих за методикою де Врайса у маядасівському наближенні величини $p+Q$ на основі експериментальних досліджень провідності тришарових систем Cu/Fe/Cu і Cr/Fe/Cr при зменшенні d_{Fe} до нуля. Було отримано, що $p+Q \cong 1,2$ (інтерфейс Fe/Cu) і $0,8$ (Fe/Cr), що добре узгоджується із результатами де Врайса (наприклад, сума $p+Q$ для інтерфейсів Au/Fe, Au/Co і Au/Ni дорівнює відповідно $1,3$; $0,8$ і $1,2$). Враховуючи, що точність визначення становить $\pm 10\%$, а найбільш типові значення коефіцієнта дзеркальності $p \cong 0,1-0,2$, то величина $Q \cong 0,6-0,9$ добре корелює із типовим значенням величини r . Таким чином, можна стверджувати, що, незважаючи на певну структурну відмінність МЗ і МП, ймовірність тунелювання електрона через них приблизно однакова.

Якщо розглянути тришарову систему, що не обмежує аналізу в загальному випадку, то у випадку переходу електронів лише між сусідніми шарами співвідношення для ТКО можна записати так:

$$\beta = A_1 \left(\alpha_1 - \frac{\partial \ln \sigma_{01}}{\partial T} - \frac{\partial \ln F_1}{\partial T} \right) + \dots + A_3 \left(\alpha_3 - \frac{\partial \ln \sigma_{03}}{\partial T} - \frac{\partial \ln F_3}{\partial T} \right), \quad (1)$$

де α – термічний коефіцієнт лінійного розширення ($\alpha \ll \beta$).

У розгорнутому вигляді, наприклад, похідна $\partial \ln F_1 / \partial T$ має такий вид

$$\begin{aligned} \frac{d \ln F_1}{dT} = & \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln k_1} \frac{d \ln k_1}{dT} + \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln m_1} \frac{d \ln m_1}{dT} + \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln k_1} \frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln p_1} \frac{d \ln p_1}{dT} + \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln m_1} \frac{\partial \ln m_1}{\partial \ln r_1} \frac{d \ln r_1}{dT} + \\ & + \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln k_1} \frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln k_2} \frac{d \ln k_2}{dT} + \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln m_1} \frac{\partial \ln m_1}{\partial \ln m_2} \frac{d \ln m_2}{dT} + \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln k_1} \frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln Q_{12}} \frac{d \ln Q_{12}}{dT} + \\ & + \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln k_1} \frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln k_2} \frac{\partial \ln k_2}{\partial \ln p_2} \frac{d \ln p_2}{dT} + \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln m_1} \frac{\partial \ln m_1}{\partial \ln m_2} \frac{\partial \ln m_2}{\partial \ln r_2} \frac{d \ln r_2}{dT} + \frac{\partial \ln F_1}{\partial \ln k_1} \frac{\partial \ln k_1}{\partial \ln k_2} \frac{\partial \ln k_2}{\partial \ln Q_{12}} \frac{d \ln Q_{12}}{dT}, \end{aligned} \quad (2)$$

де не представлені доданки, які пропорційні $\frac{\partial \ln k}{\partial \ln r}$ або $\frac{\partial \ln m}{\partial \ln p}$ і формально можуть бути записані, але не мають фізичного змісту.

Після підстановки в (1) похідних $\frac{d \ln F_1}{dT} - \frac{d \ln F_3}{dT}$ отримуємо співвідношення для ТКО тришарової системи:

$$\beta = \sum_{j=1}^3 A_j \left\{ \beta_j - \left(1 - \frac{\beta}{\beta_j} \right) \cdot \left[\left(2 \beta_j + \beta_j \cdot \frac{\partial \ln k_j}{\partial \ln p_j} + \beta_j \cdot \frac{\partial \ln m_j}{\partial \ln r_j} + \beta_{j^{(\pm 1)}} \cdot \frac{\partial \ln k_j}{\partial \ln Q_{j^{(\pm 1)}}} \right) + \left(2 \beta_{ji} + \beta_{ji} \cdot \frac{\partial \ln k_i}{\partial \ln p_i} + \beta_{ji} \cdot \frac{\partial \ln m_i}{\partial \ln r_i} + \beta_{j^{(\pm 1)}} \cdot \frac{\partial \ln k_i}{\partial \ln Q_{(i \pm 1)^3}} \right) \cdot \frac{\beta_{ji}}{\beta_j} \right] \right\}, \quad (3)$$

де $A_i = d_i F_i \sigma_{0i} / \sum_{i=1}^3 d_i F_i \sigma_{0i}$ ($F_i = \sigma_{0i} / \sigma_i$ - функція Фукса); k_i та m_i - зведені відносно λ_{0i} товщина окремого шару та середній розмір кристалітів; β_{0i} / β_{0n} дорівнює β_{01} / β_{02} (для 1-го шару); β_{02} / β_{01} і β_{03} / β_{01} (для 2-го шару) та β_{03} / β_{02} (для 3-го шару).

Відмітимо, що аналогічна напівфеноменологічна модель для КТ, яка враховує деформаційні ефекти у параметрах електроперенесення, була раніше запропонована О. Б. Ласюченко, Л. В. Однодворець і І. Ю. Проценком та скорегована нами з точки зору більш коректного врахування процесу зерномежового розсіювання електронів.

Розглянута напівфеноменологічна модель не враховує процеси взаємної дифузії атомів, що обмежує її застосування у випадку плівкових систем, у яких біля інтерфейсу (або по усій товщині) утворюється твердий розчин (т.р.) (рис.1). Плівку, схематична будова якої подана на рис. 1, можна моделювати як тришарову систему із товщиною окремих шарів d_1' (ММ₁), $d_1'' + d_2''$ (т.р.) і d_2' (ММ₂). Співвідношення для ТКО у зручному для апробації та прогнозування вигляді можна записати так:

$$\beta \cong \beta_1 + \beta_c + \beta_2 - \frac{A_1(\beta_c + \beta_2) + A_2(\beta_c + \beta_1) + A_3(\beta_1 + \beta_2)}{A_1 + A_2 + A_3}, \quad (4)$$

де $A_1 = (d_1 - d_1'') \rho_c \rho_2$, $A_2 = (d_2 - d_2'') \rho_c \rho_1$ та $A_3 = (d_1' + d_2'') \rho_1 \rho_2$.

Плівковий гранульований сплав моделюється як шарувата структура загальної товщини d із паралельним з'єднанням як трубок струму в окремому шарі, так і між окремими шарами (рис. 2). Трубка струму, в свою чергу, моделюється як послідовне з'єднання фрагментів т. р. Δl_{mp} і гранул із середнім радіусом r_0 .

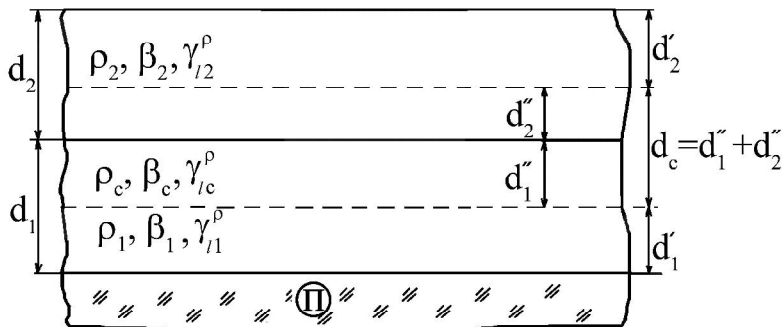


Рис.1 Геометрія двошарової плівки із проміжним шаром т.р. біля інтерфейсу. Індекс «с» позначає сплав (т. р.)

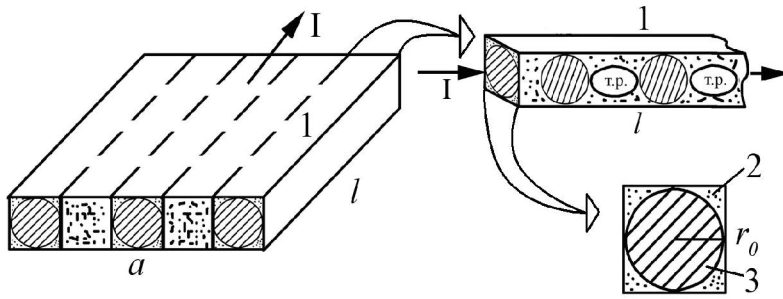


Рис. 2. Схематичне зображення окремого шару шаруватої структури та трубки струму (1) і її поперечного перерізу із 4-ма боковими (2) та центральним (3) стержнем. I – сила струму; l і a – довжина і ширина зразка

Було отримано співвідношення для ТКО у самому загальному і граничних випадках:

$$\beta \cong \beta_{mp} - \frac{4\beta_2\rho_2 + \alpha\beta_{mp}\rho_{mp}}{4\rho_2 + \alpha\rho_{mp}} + \frac{\beta_2\rho_2 + \alpha\beta_{mp}\rho_{mp}}{\rho_2 + \alpha\rho_{mp}}, \quad (5)$$

де $\alpha = \frac{\bar{\Delta}l_{mp}}{r_0}$ – ступінь гранулярності; ρ_2 і ρ_{mp} та β_2 і β_{mp} – питомий опір і ТКО гранул і т.р.

Величина β_{mp} розраховується за співвідношенням

$$\beta_{mp} = \frac{\beta_{Co}}{1 + c_{Me}\rho_{Me}/c_{Co}\rho_{Co}} + \frac{\beta_{Me}}{1 + c_{Co}\rho_{Co}/c_{Me}\rho_{Me}},$$

яке отримується шляхом диференціювання рівняння

$$\rho_{mp} = c_{Co}\rho_{Co} + (1 - c_{Co})\rho_{Me},$$

де c_{Co} , ρ_{Co} та ρ_{Me} – концентрація атомів Co, питомий опір плівки Co із ефективною товщиною, що відповідає загальній концентрації атомів Co у т.р. і гранулах, та питомий опір плівки – розчинника.

У граничних випадках формула (5) спрощується до вигляду

$$\beta \cong \beta_{mp} - \frac{4\beta_2\rho_2}{\alpha\rho_{mp}} \quad (\alpha \gg 1, \text{ малі } r_0) \text{ та } \beta \cong \beta_{mp} - \frac{\alpha\beta_{mp}\rho_{mp}}{4\rho_2} \quad (\alpha \ll 1, \text{ великі } r_0). \quad (5')$$

Співвідношення (5) і (5') дозволяють за різницею ($\beta_{екс} - \beta_{роз}$) оцінити внесок у величину ТКО процесу розсіювання електронів на розорієнтованих магнітних моментах гранул без вимірювання ТКО у магнітному полі.

Результати порівняння теоретичних моделей із експериментальними даними подані у другому підрозділі. У випадку моделі (3) термічні коефіцієнти і похідні краще за все подати у вигляді таких робочих формул:

$$\beta_p = -\frac{1}{p(T_1)} \frac{p(T_2) - p(T_1)}{\Delta T}, \quad \beta_r = -\frac{1}{r(T_1)} \frac{r(T_2) - r(T_1)}{\Delta T} \cong \beta_{Qij};$$

$$\frac{\Delta \ln k}{\Delta \ln p} = -\frac{p(T_1)}{\Delta p} \cdot \frac{d/\lambda_0(T_2) - d/\lambda_0(T_1)}{d/\lambda_0(T_1)}, \quad \frac{\Delta \ln m}{\Delta \ln r} = -\frac{r(T_1)}{\Delta r} \frac{L/\lambda_0(T_2) - L/\lambda_0(T_1)}{L/\lambda_0(T_1)};$$

$$\beta_k = \frac{\Delta \ln k}{\Delta T} = \frac{1}{k(T_1)} \frac{k(T_2) - k(T_1)}{\Delta T} \quad \text{та} \quad \beta_m = \frac{\Delta \ln m}{\Delta T} = \frac{1}{m(T_1)} \frac{m(T_2) - m(T_1)}{\Delta T}.$$

Для визначення параметрів λ_{0i} , $r_i(Q_{ij})$, $k_i = d_i/\lambda_{0i}$ та $m_i = L_i/\lambda_{0i}$ нами запропонована методика, суть якої полягає у наступному. Експериментальні залежності (їх приклади наведені на рис. 3) ТКО від товщини одношарових плівок, отримані при двох температурах, обробляються, із урахуванням також розмірної залежності середнього розміру кристалітів, у рамках лінеаризованого співвідношення (рис. 4 а, в) і моделі ізотропного розсіювання (рис.4 б, г).

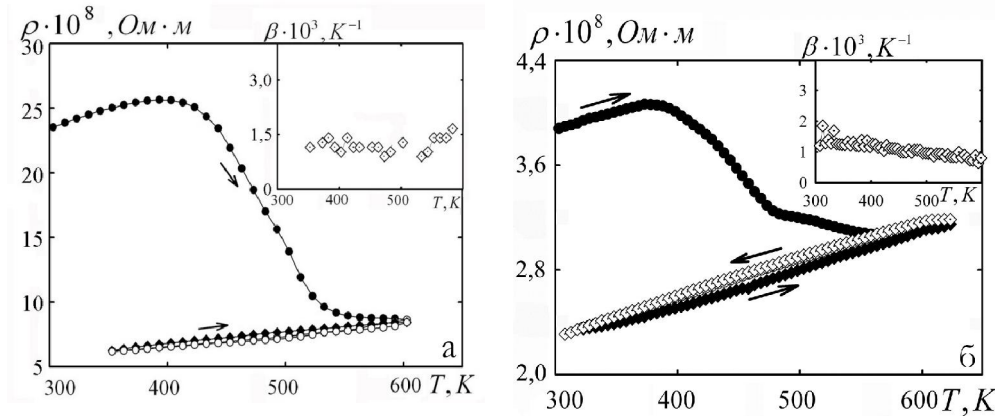


Рис. 3. Температурна залежність ρ і ТКО у плівках $\text{Cu}(30)$ (а) і $\text{Au}(50)$ (б). У дужках вказана товщина в нм

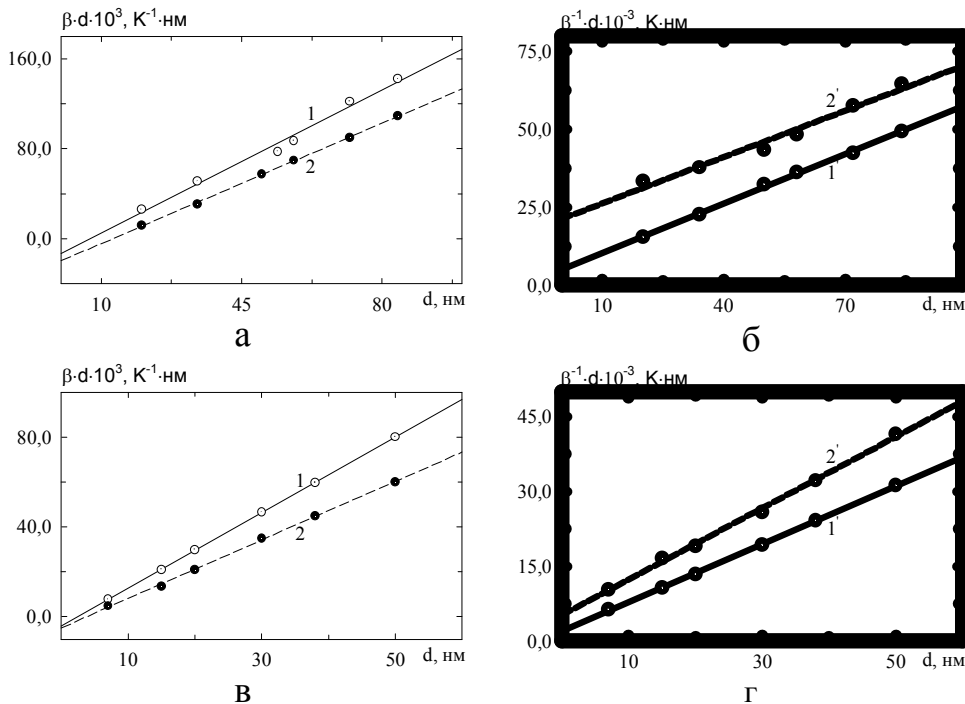


Рис. 4. Лінеаризовані залежності для ТКО у спрямляючих координатах для плівок Ag (а, б) і Au (в, г): 1, 1' – 300 К; 2, 2' – 600 К

Результати розрахунків параметрів електроперенесення узагальнені у таблиці 1, а порівняння експериментальних (на рис. 5 наведені приклади температурної залежності ρ і ТКО для двошарових плівкових систем) і розрахункових даних – у таблиці 2. Ці результати свідчать про те, що в цілому краще узгодження теоретичної моделі (3) й експерименту має місце у випадку систем на основі Cu і Cr. Це стає зрозумілим після дослідження процесів дифузії і фазоутворення дифракційними й електронно-мікроскопічними методами та методами ОЕС і ВІМС. Ці дослідження однозначно свідчать, що у системах на основі Cr і Cu значною мірою зберігається індивідуальність окремих шарів, у той час як у системах на основі Co і Ag, Au або Cu та Fe і Cu відбувається стабілізація гранульованого стану у матриці т.р. – (Ag, Co), (Au, Co) та (Cu, Co). Крім цього, необхідно мати на увазі значний внесок у ТКО інтерфейсного розсіювання електронів, який важко визначити точно за допомогою параметрів β_{Qij} та β_m , оскільки вони характеризують температурні ефекти, а не ефективність процесів розсіювання. Запропонована методика розрахунку внеску інтерфейсного розсіювання, яка базується на високоточному вимірюванні ТКО в ідентичних зразках з точки зору кристалічної структури і концентрації дефектів, але із різною кількістю інтерфейсів, дозволяє оцінити цей внесок. Зокрема, отримано, що відношення $\frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{\beta [(Me_1/Me_2)]_n - \beta (Me_1/Me_2)}{\beta (Me_1/Me_2)}$, де $n = 2-5$, має величину до – 35% (системи на основі Cu/Cr); – 12% (Ag/Cu) та – 13% (Fe/Cr).

Таблиця 1

Параметри електроперенесення в одношарових плівках

$T_1 \cong 300\text{K}$	$T_2 \cong 400\text{K (Cr, Cu)},$ $T_2 \cong 600\text{K (Ag, Au)}$	$\beta_p \cdot 10^3,$ K^{-1}	$\beta_r \cdot 10^3,$ K^{-1}	$\beta_k \cdot 10^3,$ K^{-1}	$\beta_m \cdot 10^3,$ K^{-1}	Плівка
$p = 0,105$ $\lambda_0(1-p) = 56 \text{ нм},$	$p = 0,150$ $\lambda_0(1-p) = 43 \text{ нм}$	- 0,6	- 0,5	- 2,3	- 0,8	Cr
$p = 0,105$ $\lambda_0(1-p) = 25,6 \text{ нм}$	$p = 0,190$ $\lambda_0(1-p) = 35 \text{ нм}$	-3,1	-1,8	1,0	-0,6	Cu
$p = 0,105$ $\lambda_0(1-p) = 25,6 \text{ нм}$	$p = 0,013$ $\lambda_0(1-p) = 39,6 \text{ нм}$	8,8	-5,6	-3,7	-3,5	Ag
$p = 0,080$ $\lambda_0(1-p) = 7,5 \text{ нм}$	$p = 0,044$ $\lambda_0(1-p) = 9,8 \text{ нм}$	4,5	-5,0	-2,4	-2,0	Au

Окремо аналізується питання про можливий механізм інтерфейсного розсіювання електронів у плівкових системах на основі Fe і Cr, у якій стабілізуються розбавлені т. р. (розчинник – надлишкова компонента) із тонким прошарком біля інтерфейсу, в якому магнітні моменти атомів Fe і Cr мають протилежну орієнтацію. Цією обставиною, на яку вперше звернув увагу Р. Коєгоорн, можна пояснити реалізацію спін-залежного розсіювання електронів у мультишарах, у яких не зберігається індивідуальність окремих шарів і не стабілізується гранульований стан.

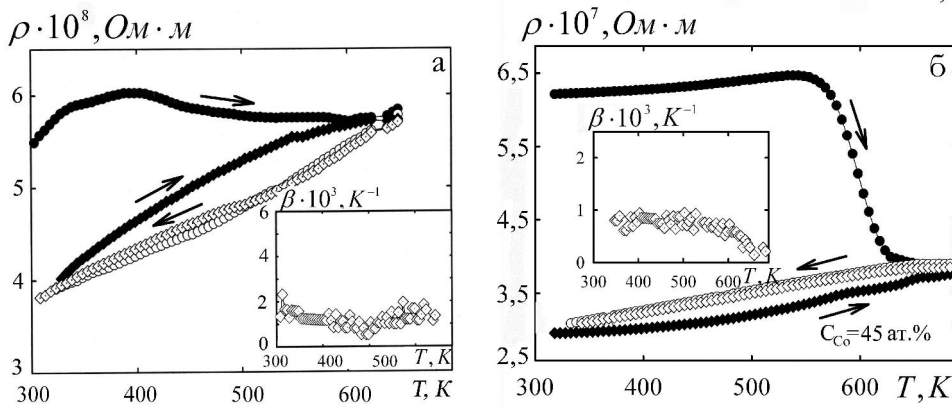


Рис.5. Температурна залежність ρ і ТКО у плівкових системах $\text{Ag}(90)/\text{Co}(30)/\text{PI}$ (а) і $\text{Au}(50)/\text{Co}(40)/\text{PI}$ (б). П – підкладка

Таблиця 2

Порівняння експериментальних і розрахункових на основі моделі (3) результатів для ТКО

Плівкова система	$\beta \cdot 10^3, K^{-1}$		$\frac{\beta_{\text{екс}} - \beta_{\text{роз}}}{\beta_{\text{екс}}}, \%$
	експеримент	розрахунок	
$\text{Cu}(20)/\text{Cr}(10)/\text{PI}$	1,35	1,40	3,7
$\text{Cu}(48)/\text{Cr}(15)/\text{PI}$	2,22	2,23	0,5
$\text{Cr}(25)/\text{Cu}(30)/\text{PI}$	1,59	1,56	1,9
$\text{Cr}(25)/\text{Cu}(45)/\text{PI}$	1,73	1,97	13,8
$\text{Ag}(20)/\text{Co}(15)/\text{PI}$	0,82	0,70	14,6
$\text{Au}(50)/\text{Co}(40)/\text{PI}$	0,75	0,68	10,6
$\text{Cu}(30)/\text{Cr}(25)/\text{Cu}(45)/\text{PI}$	1,35	1,10	18,5
$\text{Cu}(40)/\text{Cr}(25)/\text{Cu}(55)/\text{PI}$	1,25	1,28	2,4

Спроба врахувати процеси фазоутворення (стабілізація гранульованого стану на основі т. р.) здійснена нами у феноменологічних моделях (4) і (5). Рис.6 ілюструє ступінь відповідності експериментальних результатів і розрахункових на основі моделі (4).

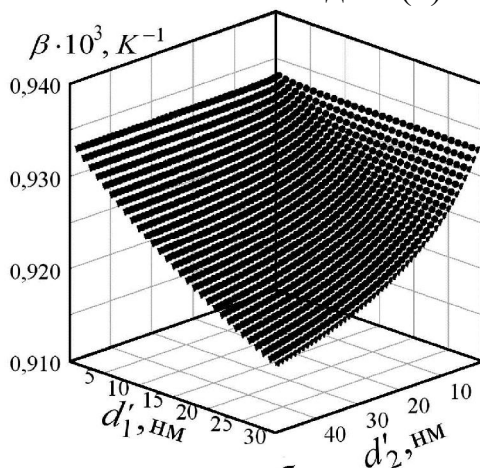


Рис.6. Залежність величини ТКО плівкової системи $\text{Fe}(55)/\text{Cu}(20)/\text{PI}$ із експериментальною величиною $\beta = 0,90 \cdot 10^{-3} K^{-1}$

Якщо узагальнити результати апробації, то можна зробити висновок, що при відносно малих товщинах плівки розчинника (Ag , Au , Cu) краще узгодження буде мати місце при збільшенні товщини d_1 і d_2 , а при відносно великій товщині плівки розчинника – навпаки, при їх зменшенні. Апробація співвідношень (5) і (5') була проведена на плівкових системах на основі Co і Cu , Ag або Au , отриманих методом одночасної або послідовної конденсації компонент із подальшою термообробкою до $T_6 \cong 900\text{K}$. Це давало можливість сформувати гранульовані

плівкові сплави (рис. 7) із середнім розміром гранул $2\bar{r}_2 \cong 4-10$ нм залежно від загальної концентрації (40-70 ат.% Со) атомів Со у плівковій системі. Обробка мікроснімків, подібних представленому на рис. 7, дозволяє отримати необхідні для розрахунків величини, які входять у співвідношення (5) або (5'). Незважаючи на те, що в (5) не враховується поверхневе розсіювання електронів (поверхневий опір) на гранулах і на їх магнітних моментах, неузгодженість експериментальних і розрахункових при загальній концентрації атомів Со, близькій до 50 ат.%, лежить у межах 10-20%.

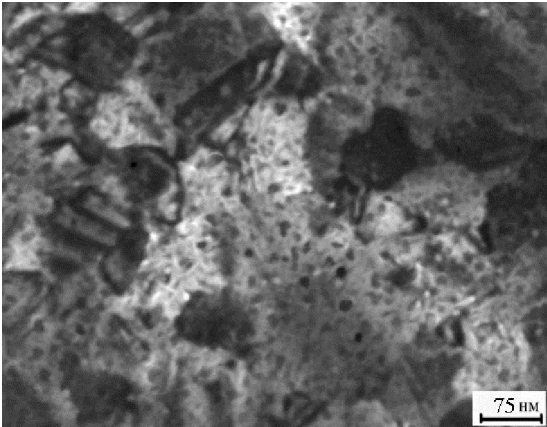


Рис.7. Гранульований сплав, сформований при термовідпалюванні до 700 К плівкової системи Ag(40)/Co(30)/П

У третьому підрозділі подані результати дослідження тензорезистивних властивостей дво- і багат шарових плівкових систем при пружній і пластичній деформації. Особливість фізичних процесів, які мають місце у досліджених плівкових системах, пов'язані з таким:

– при пошаровій конденсації утворюється т.р. - (α - Fe, Cr) по всій товщині зразка (рис. 8, табл. 3);

– у плівкових системах на основі Со і Cu, Ag або Au т. р. із обмеженою розчинністю атомів Со утворюються лише після термообробки (табл. 4);

– у плівкових системах на основі Cu і Cr або Fe має місце обмежена взаємна розчинність атомів, і тому в них до великої міри зберігається індивідуальність окремих шарів (рис. 9).

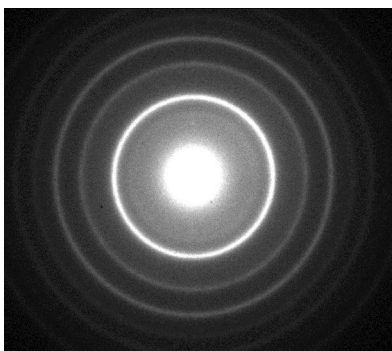


Рис. 8. Електронограма від півки т. р.- (α - Fe, Cr)

Таблиця 3

Розшифрування електронограми т.р.- (α - Fe, Cr)

№	I , в.о.	d , нм	hkl	a , нм	Параметри решіток, нм
1	Д.С.	0,205	110	0,289	$\bar{a}(\alpha\text{-Fe, Cr}) = 0,289$, $a(\text{Cr}) = 0,288$, $a(\alpha\text{-Fe}) = 0,287$
2	ср.	0,145	200	0,290	
3	ср.	0,118	211	0,289	
4	сл.	0,102	220	0,288	
5	сл.	0,091	310	0,288	
6	сл.	0,077	321	0,289	

Аналіз експериментальних результатів стосовно тензорезистивного ефекту проводився із урахуванням їх структурно-фазового стану. Дуже важливим аргументом на підтвердження дифракційних досліджень є узгодженість експери-

ментальних результатів із відповідними теоретичними моделями. Зокрема, мова йде про відповідність даних для системи Fe/Cr і термовідпаленої Co/Cu співвідношенню для тензочутливості плівкових сплавів (табл. 5):

$$\gamma_i^p \cong \gamma_{ii}^p \left(I + \frac{c_2 \rho_2}{c_1 \rho_1} \right)^{-1} + \gamma_{i2}^p \left(I + \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2} \right)^{-1}, \quad \text{де } \gamma_i^p = \frac{d \ln p}{d \varepsilon_i}. \quad (6)$$

У випадку плівкових систем на основі Co і Ag або Au та Fe і Cu експериментальні результати краще узгоджуються із запропонованою нами феноменологічною моделлю для КТ плівкових систем із проміжним шаром т. р. біля інтерфейсу (аналог формули (4)):

$$\gamma_i^p \cong \gamma_{ii}^p + \gamma_{i2}^p + \gamma_{i3}^p - \frac{A_1(\gamma_{ic}^p + \gamma_{i2}^p) + A_2(\gamma_{ic}^p + \gamma_{ii}^p) + A_3(\gamma_{ii}^p + \gamma_{i2}^p)}{A_1 + A_2 + A_3}. \quad (7)$$

Таблиця 4

Розшифрування електронограми від плівки Co(40)/Cu(30)/П, відпаленої до 900 К

№	I, в.о.	d, нм	hkl	фаза	a, нм
1	Д.Д.сл	0,250	111	Cu ₂ O	0,432
2	С.	0,208	111	ГЦК(Cu,Co)	0,359
3	Д.сл.	0,190	101	ГЦП Co	-
4	ср.	0,176	200	ГЦК(Cu,Co)	0,353
5	Д.сл.	0,153	220	Cu ₂ O	0,433
6	ср.	0,130	220	ГЦК(Cu,Co)	0,360
7	сл.	0,128	220	ГЦК Cu	0,362
8	ср.	0,109	311	ГЦК(Cu,Co)	0,361
9	сл.	0,108	311	ГЦК Cu	0,358

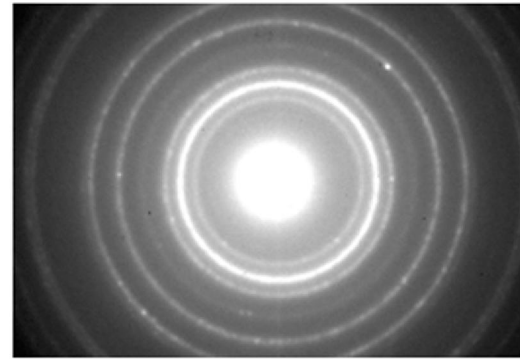


Рис. 9. Електронограма від плівки Cu(12)/Cr(13)/П

Таблиця 5

Порівняння експериментальних і розрахункових за співвідношенням (6) даних

Плівкова система	γ_i	$\gamma_{роз}$	$(\gamma_i - \gamma_{роз})/\gamma_i, \%$
Cr(20)/Fe(50)/П	3,4	3,2	6,0
Cr(50)/Fe(50)/П	2,9	3,0	3,0
Cr(70)/Fe(50)/П	2,7	2,9	7,0

Результати для системи Cu/Cr і до деякої міри для Fe/Cu краще за все відповідають відомій моделі «біпластини». Для дослідження особливостей тензоефекту були проведені дослідження у двох деформаційних інтервалах $\Delta \varepsilon_{11} = 0-1\%$ і $\Delta \varepsilon_{12} = 0-2\%$ (як підкладка використовувалися полістиролові смужки, які у зазначених інтервалах деформуються

пружно). Оскільки межа пружності металевих плівок $\varepsilon_{лер} \leq 1,0\%$, то вибрані інтервали деформації дозволяють вимірювати КТ як в області пружності, так і пластичності. Рис. 10 ілюструє приклади деформаційних залежностей $\Delta R/R_n$ від ε_i , на основі яких розраховувалася величина $\gamma_{iM} = d \ln R_i / d \varepsilon_i$ і $\bar{\gamma}_i$. Додатковою

ілюстрацією особливостей тензоефекту можуть служити експериментальні дані, наведені на рис. 11. Різке збільшення величини КТ або поява максимуму на залежності КТ від ε_l відбувається в інтервалі пластичної деформації. Узагальнення фізичних процесів при пружній і пластичній деформації буде здійснене у підрозділі 7.1.

Четвертий розділ «Магніторезистивні властивості багатошарових нанорозмірних плівкових систем» складається із трьох підрозділів, у першому із яких запропонований напівфеноменологічний підхід для аналізу різних механізмів розсіювання електронів у явищі магнітоопору (відмітимо аналогію із моделлю для ТКО (співвідношення (3)), у якій ураховано температурні ефекти у параметрах електроперенесення).

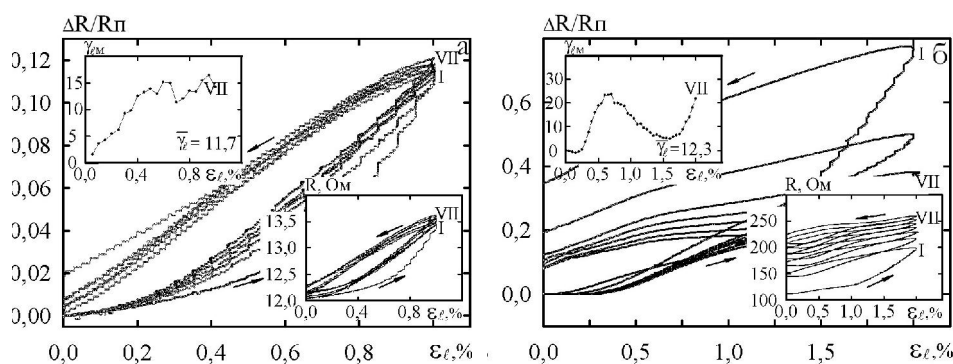


Рис. 10. Деформаційні залежності $\Delta R/R_n$, R і γ_{lm} для плівкових систем $\text{Cu}(20)/\text{Cr}(30)/\Pi$ (а) і $\text{Fe}(20)/\text{Cr}(30)/\Pi$ (б). I, VII – номери циклів

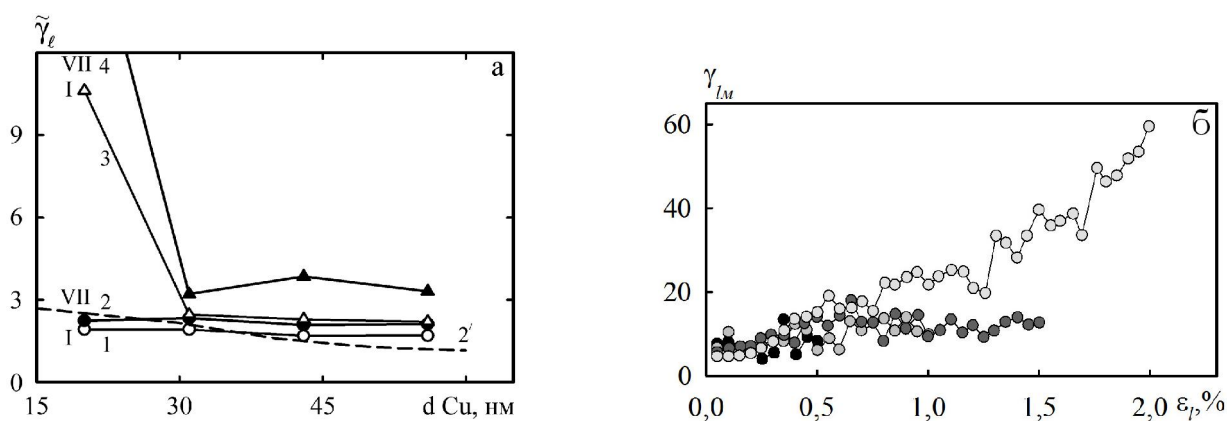


Рис. 11. Розмірна залежність $\tilde{\gamma}$ від d_{Cu} для плівкових систем $\text{Cu}(d_{Cu})/\text{Cr}(15)/\Pi$ (а) і $\text{Au}(20)/\text{Co}(20)/\Pi$ (б): $\Delta\varepsilon_{l1} \cong 1,0\%$ (криві 1, 2); $\Delta\varepsilon_{l2} \cong 2,0\%$ (3, 4); 2' – розрахунок на основі моделі КТ для «біластини»

Кількісною характеристикою дії індукції магнітного поля B є відповідні магнітні коефіцієнти:

$$\beta_{0i}^K = -\frac{d \ln \lambda_{0i}}{dB}, \quad \beta_{pi}^K = -\frac{d \ln p_i}{dB}, \quad \beta_{ri}^K = -\frac{d \ln r_i}{dB} \cong -\frac{d \ln Q_{ij}}{dB} = \beta_{QiK}^K,$$

де індекс K відповідає трьом орієнтаціям поля: 1 – поздовжній; 2 – поперечній та 3 – перпендикулярній до площини плівки.

Фізична природа магнітних коефіцієнтів полягає в тому, що сила Лоренца обумовлює зміну λ_0 , а магнітострікційний ефект – зміну p , r і Q_{ij} . Відповідно

до (1) співвідношення для магнітного коефіцієнту опору $\beta_B^K \equiv \left(\frac{d \ln \rho}{dB}\right)^K$ можна записати так:

$$\beta_B^K = A_1 \left(\alpha_{B1}^K - \frac{\partial \ln \sigma_{01}^K}{\partial B} - \frac{\partial \ln F_1^K}{\partial B} \right) + \dots + A_3 \left(\alpha_{B3}^K - \frac{\partial \ln \sigma_{03}^K}{\partial B} - \frac{\partial \ln F_3^K}{\partial B} \right),$$

де α_{Bi}^K – магнітострикційний коефіцієнт; $-\partial \ln \sigma_{0i}^K / \partial B = \beta_{0Bi}^K$.

Похідна для функції Фукса має вигляд, аналогічний співвідношенню (2), в якому диференціювання проводиться по індукції В. Відповідно і кінцеве співвідношення для β_B^K буде аналогічним (3) із заміною термічних коефіцієнтів на магнітні. Його апробація може бути здійснена за тією ж методикою, що й співвідношення (3) для ТКО.

Поряд із цим, виходячи із експериментальних величин магнітних коефіцієнтів і похідних $d \ln k / d \ln p$ і $d \ln m / d \ln r$, можна оцінити внесок процесів розсіювання електронів у магнітному полі. Він становить від 10 до 30 % у випадку плівкових систем із магнітними шарами, що в абсолютному вимірюванні незначна величина, оскільки величина МО має порядок 10^{-2} - 10^{-1} .

У цьому ж підрозділі подані результати дослідження МО у мультишарах на основі Fe і Cr та Fe і Cu (табл. 6). Згідно з цими результатами у першому випадку має місце ефект ГМО, оскільки ступінь анізотропії лежить у межах точності вимірювання. У системі на основі Fe і Cu у невідпалених зразках спостерігається досить сильно виражений АМО, але при відпалюванні до 800 К у зразках формуються гранули Fe і відбувається перехід АМО→ГМО (рис. 12).

Таблиця 6

Величина МО і $\bar{\beta}_B$ для нанорозмірних мультишарів

Зразок	c_{Fe} , ат. %	П геометрія				⊥ геометрія			
		без відпалювання		відпалювання до 800К		без відпалювання		відпалювання до 800К	
		МО, %	$\bar{\beta}_B$, Тл ⁻¹	МО, %	$\bar{\beta}_B$, Тл ⁻¹	МО, %	$\bar{\beta}_B$, Тл ⁻¹	МО, %	$\bar{\beta}_B$, Тл ⁻¹
Fe(2,5)/[Cr(1)/Fe(2,5)] ₃ /П	77,3	0,35	-5,8	0,41	-6,8	0,42	-7,0	0,49	-8,2
Fe(2,5)/[Cr(1)/Fe(2,5)] ₇	74,5	0,40	-6,7	0,47	-7,8	0,46	-7,7	0,53	-8,8
Fe(2,5)/[Cr(1,5)/Fe(2,5)] ₃	69,4	0,12	-2,0	0,48	-8,0	0,04	-0,7	0,10	-1,7
Fe(2,5)/[Cr(1,5)/Fe(2,5)] ₇	66,1	0,13	-2,2	0,15	-2,5	0,08	-1,3	0,11	-1,8
Fe(2,5)/[Cu(1,5)/Fe(2,5)] ₃ /П	68,9	0,50	-8,3	0,36	-6,0	0,40	-6,7	0,33	-5,5
Fe(2,5)/[Cu(1,5)/Fe(2,5)] ₉	64,9	0,74	-12,3	0,47	-7,8	0,52	-8,7	0,43	-7,2
Fe(2,5)/[Cu(2)/Fe(2,5)] ₃	62,5	0,09	-1,5	0,06	-1,0	0,07	-1,2	0,05	-0,8
Fe(2,5)/[Cu(2)/Fe(2,5)] ₇	58,8	0,12	-2,0	0,10	-1,7	0,11	-1,8	0,07	-1,2

Відносно малу величину ГМО у мультишарах на основі Fe і Cu ми пояснюємо тим, що гранульований стан реалізується біля інтерфейсів, причому частина гранул має немагнітну природу, оскільки утворюється на основі γ -Fe. У роботі якісно аналізується питання про вплив динаміки руху електронів, зокрема дифузне або дзеркальне відбиття електронів від поверхні плівки, інтерфейсів, меж зерен (доменів); відсікання траєкторії електронів; когерентне або некогерентне проходження МЗ (Д).

У цьому підрозділі вперше здійснені теоретичний аналіз магнітодеформаційного ефекту (МДЕ) і порівняння із експериментальними результатами. Відмічається, що цей ефект всебічно вивчений у роботах М. І. Захаренка, Ю. А. Куницького, В. А. Макари, М. П. Семенька, А. П. Шпака на прикладі масивних аморфних феромагнітних сплавів. Відома також робота В. А. Ванга та ін., в якій МДЕ був вивчений у алмазних плівках. Кількісною характеристикою МДЕ може бути магнітний коефіцієнт тензочутливості (МККТ), який має таке

означення: $\beta_{\gamma l B}^K = \frac{1}{\gamma_l} \left(\frac{\partial \gamma_l}{\partial B} \right)$ та $\beta_{\gamma t B}^K = \frac{1}{\gamma_t} \left(\frac{\partial \gamma_t}{\partial B} \right)$, де індекси l і t позначають напрями

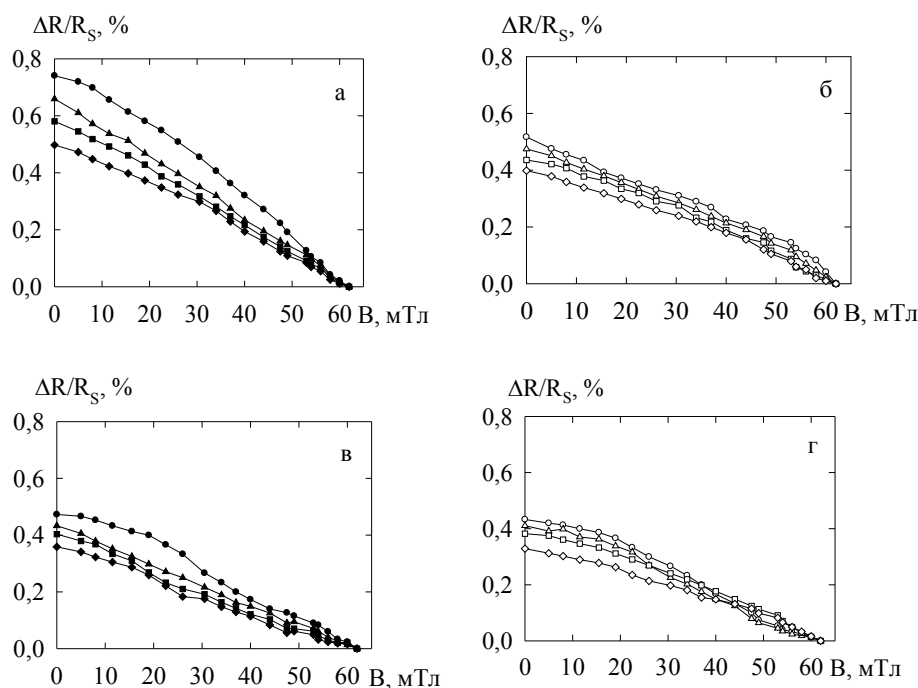


Рис. 12. Залежність МО від B у мультишарах $Fe(2,5)/[Cu(1,5)/Fe(2,5)]_n/P$, де $n=3$ ($\blacklozenge, \blacklozenge$), 5 (\blacksquare, \square), 7 ($\blacktriangle, \triangle$) та 9 (\bullet, \circ): а, б – невідпалені зразки; в, г – відпалені до 800 K ; а, в – \parallel геометрія; б, г – \perp геометрія

деформації зразків у магнітному полі. Після підстановки співвідношень для γ_l і γ_t можна отримати співвідношення для МККТ у самому загальному вигляді, наприклад, для випадку поздовжньої деформації (у випадку поперечної деформації воно матиме аналогічний вигляд):

$$\beta_{\gamma l B}^K = \frac{\gamma_l - 1 - 2\mu_f}{\gamma_l} \left(-\beta_B^K + \frac{1}{\gamma_l - 1 - 2\mu_f} \cdot \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial B} \right), \quad (8)$$

де μ_f – коефіцієнт Пуассона.

У граничному випадку, коли γ_l і $\gamma_t \gg 1$, співвідношення (8) спрощується до вигляду

$$\beta_{\gamma l B}^K \cong -\beta_B^K + \frac{1}{\gamma_l \rho} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial B} \quad \text{та} \quad \beta_{\gamma t B}^K \cong -\beta_B^K + \frac{1}{\gamma_t \rho} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_t \partial B}. \quad (8')$$

Із (8) або (8') та експериментальних величин $\beta_{\gamma l B}^K$ або $\beta_{\gamma t B}^K$ і β_B^K можна розрахувати важливий тензометричний параметр $\partial^2 \rho / \partial \varepsilon_l \partial B$, який характеризує поведінку чутливого елементу багатofункціонального сенсора в умовах одночасної дії деформації і магнітного поля, і проаналізувати польову залежність КТ. Проаналізовано випадки аморфних і кристалічних металевих плівок, установлено якісно, коли величина КТ збільшується або зменшується (як в аморфних сплавах або алмазних напівпровідникових плівках) у зовнішньому магнітному полі. Акцентується увага на тому, що польова залежність КТ повністю визначається знаком другої похідної або, іншими словами, конкуренцією чутливості опору плівки до деформації ($\partial \rho / \partial \varepsilon_l$) або до зміни поля ($\partial \rho / \partial B$). Ця конкуренція може обумовити інверсію знаку другої похідної, як це має місце у плівках Со (табл.7), умову якої можна записати так: $\left| (\gamma_l - 1 - 2\mu_f) \beta_B^K \right| > \gamma_l^K \beta_{\gamma l B}^K$. Відсутність інверсії знаку другої похідної у плівках α -Fe (табл. 7), а також Ni ми пояснюємо більш ефективним поверхневим розсіюванням електронів (характеризується величиною $\beta_p^K \frac{\partial \ln k}{\partial \ln p}$, яка входить у похідну $\partial F^K / \partial B$ у співвідношенні для β_B^K) у зв'язку із зменшенням ступеня дисперсності плівок α -Fe і Ni порівняно із плівками Со, в яких буде переважати зерномежове розсіювання електронів, за яке відповідає величина $\beta_r^K \frac{\partial \ln m}{\partial \ln r}$. Експериментальні результати, що наведені у табл. 8, дозволяють говорити про анізотропний МДЕ (за аналогією з АМО), кількісною характеристикою може бути $\Delta \gamma_l = \gamma_{||} - \gamma_{\perp}$ або $\frac{\Delta \gamma_l}{\gamma_l} = \frac{\gamma_{||} - \gamma_{\perp}}{(\gamma_{||} + \gamma_{\perp})/2}$. У роботі аналізуються можливі процеси розсіювання електронів, які обумовлюють АМДЕ.

У другому підрозділі подані результати дослідження ефекту ГМО у мультишарах $[\text{Fe}(10)/\text{Cr}(1-1,8)]_{30-60}/\text{П}$ та $\text{Au}(3)/\text{Co}(3)/\text{Cu}(6-12)/\text{Au}(40)/\text{Cr}(3)/\text{П}$. У випадку першої системи ставилося завдання з'ясувати роль спін-залежного розсіювання (СЗР) електронів на «магнітних» інтерфейсах в умовах штучного їх розмиття у процесі опромінення іонами Au^{+15} . Методика експерименту була ідентична тій, яку використовували М. Концевич та ін. і В. Коренівський та ін., які опромінювали мультишари Fe/Cr відповідно іонами Ar^+ або Xe^+ . Рис. 13 ілюструє вплив дози опромінення на величину ГМО мультишару $[\text{Fe}(2)/\text{Cr}(1,2)]_{20}/\text{П}$.

Результати аналізу спектрів КЕМС показали, що спектри ядер ^{57}Fe від неопромінених плівкових систем являють собою зеєманівський секстет із різною інтенсивністю резонансних ліній із надтонкою структурою. Надтонке магнітне

поле B_{ef} має величини 7, 23, 30 і 33 Тл. Компоненти $B_{ef} = 30$ і 23 Тл відповідають атомам Fe на інтерфейсах, а компонента $B_{ef} = 7$ Тл відповідає атомам Fe,

Таблиця 7

Таблиця 8

Розмірна залежність другої похідної

Розмірна залежність γ_1 для плівок α -Fe

$\partial^2 \rho / \partial \xi \partial B \cdot 10^6, \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{Тл}^{-1}$					α -Fe				
$d, \text{ нм}$	α -Fe		$d, \text{ нм}$	Со		$d, \text{ нм}$	$\gamma_1(0)$	γ_1'' (0,1 Тл)	γ_1^\perp (0,1 Тл)
	геом.	⊥ геом.		⊥ геом.	геом.				
45	-3,7	-12,1	20	-2,4	20	4,7	3,6	4,8	
50	-3,2	-10,9	37	-6,7	25	4,4	3,6	4,7	
85	-1,5	-6,1	52	4,3	45	4,1	3,0	4,2	
100	-1,3	-6,0	65	4,5	65	3,4	2,1	3,5	
			100	1,2	70	3,3	2,2	3,3	
					85	2,9	2,0	2,9	
					100	2,8	2,0	2,0	

які продифундували у шар Cr. Після опромінення спектри КЕМС дещо видозмінюються (зокрема, збільшується концентрація компонент $B_{ef} = 7$ і 23 Тл від 5 і 33 Тл до 22 і 52 Тл при дозі $5 \cdot 10^{16}$ іон/м²), що пояснюється утворенням т. р. - (α - Fe, Cr). Крім цього, були проведені дослідження з метою встановлення d_{Cr} , при якій має місце антиферромагнітна взаємодія між шарами Fe. Було встановлено, що при $d_{Cr} \cong 1,2$ нм спостерігається перший пік міжшарової антиферромагнітної обмінної взаємодії через шар Cr. Петлі гістерезису у цьому випадку мають характерні особливості: при $H < H_1 \cong 200$ Ер магнітні моменти шарів Fe антипаралельні, при $H < H_2 \cong 700$ Ер вони розорієнтовані, а при $H > H_2$ – відбувається ферромагнітне упорядкування. При $d_{Cr} \cong 1,3, 1,4$ і $1,6$ нм реалізується ферромагнітна взаємодія. У випадку плівкової системи на основі Au, Cu і Со за

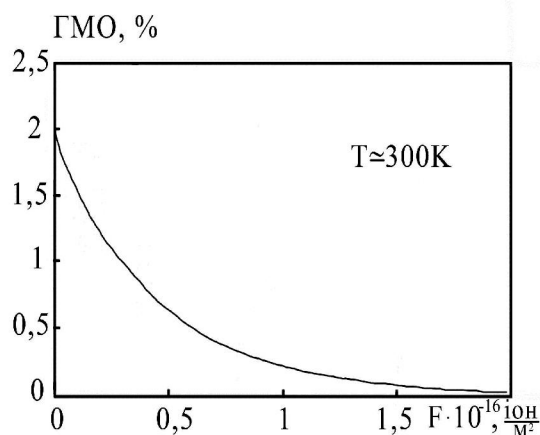
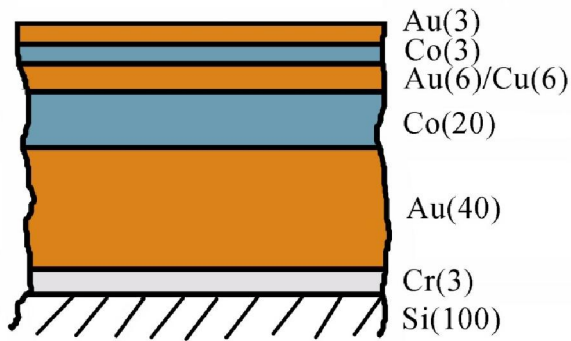


Рис. 13. Залежність ГМО від дози опромінення іонами Au^{+15}

певних умовах спостерігається величина ГМО = 1,2%, але після термообробки при 700 К його величина зменшується до 0,9% (якщо $d_{Cu} = 6$ нм) або до 0,12% ($d_{Cu} = 20$ нм), що пояснюється збільшенням середнього розміру гранул і, як наслідок цього, – зменшенням їх концентрації. Отримані результати дозволили запропонувати спін-вентиль (рис. 14), наноструктура, фазовий склад і магніторезистивні характеристики наведені у *третьому підрозділі*. Особливість цієї наноструктури полягає у тому, що шари Со отримувалися при різних температурах: нижній – при $T_n \cong 950$ К, причому його коерцитивність у 5-6 разів вища порівняно з верхнім шаром, отриманим при $T_n \cong 300$ К.



При формуванні наноструктури враховували результати дослідження шарів Co методами рентгенівської дифракції, рефлексометрії, МОКЕ, намагніченості, коерцитивності, а також таких структурних характеристик, як температурна залежність величини макронапружень і середнього розміру ГЦК- і ГЦП- кристалітів.

Рис. 14. Наноструктура запропонованого спіну-вентилля

П'ятий розділ «Дифузійні процеси в багатошарових нанорозмірних плівкових системах» складається із трьох підрозділів. У першому і другому підрозділах наведені результати дослідження процесів конденсаційно- та іонно-стимульованої дифузії (КСД і ІСД), які проходять безпосередньо у процесі конденсації (рушійна сила КСД – теплота конденсації) або під дією первинного пучка іонів вторинно-іонних мас-спектрометрів. При термообробці плівкових систем проходить термодифузія (ТД). Використовуючи методи ВІМС і ОЕС, можна отримати дифузійні профілі (прикладі на рис. 15 і 16) для КСД, КСД+ІСД або КСД+ІСД+ТД і на їх основі розрахувати ефективні коефіцієнти дифузії (D), а, побудувавши залежність $D(T)$ в координатах $(\ln D - 1/T)$, розрахувати енергію активації дифузії (Q) і записати рівняння дифузії.

Розрахунок D і D_T здійснювався за співвідношеннями

$$\Delta x (КСД + ІСД + ТД) \cong (D \cdot \tau_n)^{1/2} \quad (\text{розрахунок } D),$$

$$[\Delta x(КСД + ІСД + ТД) - \Delta x(КСД + ІСД)] \cong (D \cdot \tau_v)^{1/2} \quad (\text{розрахунок коефіцієнта термодифузії } D_T),$$

де $\tau_n \cong \tau_{КСД} + \tau_{ІСД} + \tau_{ТД}$, а $\tau_v \cong \tau_{ТД}$.

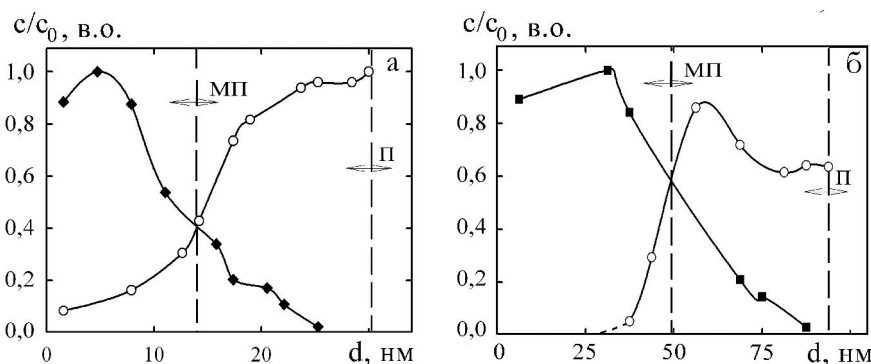


Рис. 15. Дифузійні профілі, отримані методом ВІМС, у відпалених до 600 К плівкових системах $Ag(20)/Co(10)/П(a)$ та $Au(30)/Co(40)/П$ (б). МП – межа поділу

Результати розрахунків D , D_k і D_T узагальнені у табл. 9 і 10. Їх порівняння свідчить про те, що ІСД майже на порядок збільшує коефіцієнт взаємної дифузії. Крім того, значна відмінність між D_k і D_T пояснюється ефектом насичення меж нанозерен атомами нижнього шару ще на стадії конденсації, і тому D_T може відповідати об'ємній дифузії атомів із меж в об'єм зерна.

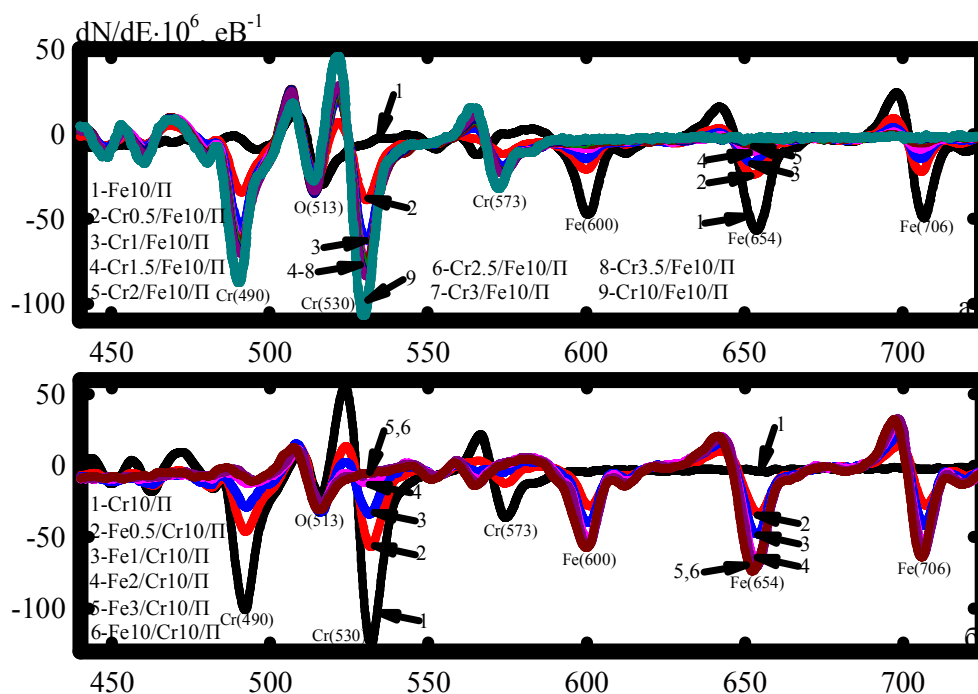


Рис. 16. Приклади оже-спектрів для плівок Cr/Fe/P (а) та Fe/Cr/P (б)

У третьому підрозділі наведені результати дослідження зерномежової (D_b) і об'ємної (D_v) дифузії атомів методом низькотемпературної резистометрії та на основі розрахунків за теоретичними співвідношеннями для D_b і D_v .

Величина D_b , отримана із експериментальних даних про зміну опору базової плівки при нанесенні на неї тонкого покриття (d_n до 1нм), має порядок $10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$, що добре узгоджується із величиною D_k (табл.10). Розрахункові дані наведені у табл. 11, вони дуже добре узгоджуються із D_k і D_m (табл. 10). Узагальнюючи результати досліджень, можна стверджувати, що зерномежова дифузія проходить за механізмом КСД, а об'ємна, за своєю суттю, це – термодифузія.

Таблиця 9

Величина ефективних коефіцієнтів дифузії (КСД + ІСД + ТД)

Дифузійна пара	$D \cdot 10^{18}, \text{ м}^2/\text{с}$	$T_0, \text{ К}$	Дифузійна пара	$D \cdot 10^{18}, \text{ м}^2/\text{с}$	$T_0, \text{ К}$
Co→Ag	2,8	300	Co→Cu	4,4	300
Ag→Co	1,3		Cu→Co	3,5	
Co→Au	0,9		Fe→Cr	2,0	
			Cr→Fe	0,4	
Co→Ag	3,3	600	Co→Cu	16	600
Ag→Co	2,0		Cu→Co	3,3	
Co→Au	3,2		Au→Co	3,6	
Co→Ag	4,3	900	Co→Cu	15	900
Ag→Co	2,5		Cu→Co	4,0	
Co→Au	4,2		Fe→Cr	0,8	
			Cr→Fe	0,1	

Коефіцієнти D_K і D_T у двошарових плівкових системах

Плівкова система після конденсації (нм)	КСД		ТД	
	l_K , нм	$D_K \cdot 10^{19}$, м ² /с	$l_T - l_K$, нм; T_g , К	$D_T \cdot 10^{19}$, м ² /с
Cu(10)/Cr(10)/П	7,0	2,0	3; 566 К	0,072
Cr(10)/Cu(10)/П	3,5	1,0	<6,5; 673 К	< 0,017
Cr(5)/Fe(10)/П	≤ 2,5	≤ 0,9	≥1; 673 К	≥ 0,002
Fe(10)/Cr(10)/П	≤ 3,0	≤ 0,5	≥2,0; 673 К	≥ 0,004
Cu(10)/Fe(10)/П	3,0	0,30	-	-
Fe(10)/Cu(10)/П	2,2	0,25	-	-

l_K, l_T – дифузійний пробіг атомів із нижнього шару у верхній

Обговорюється також можливий процес, що обумовлює спостережуваний нами ефект розшарування т. р.- (α - Fe, Cr) при його відпалюванні до $T_g > 700$ К (це проявляється в тому, що при збільшенні температури величина D зменшується). До певної міри аналогічне розшарування має місце і в плівкових системах на основі Cu і Co з тією відмінністю, що при $T_g > 900$ К т. р.- (Cu, Co)

Таблиця 11 розпадається із виділенням кристалітів Cu. Проведений аналіз показує, що розшарування у т. р.- (α - Fe, Cr) необхідно трактувати як квазіспінодальний розпад твердого розчину.

T_g , К	$D_v \cdot 10^{19}$, м ² /с		$D_b \cdot 10^{19}$, м ² /с	
	Cu→Fe	Fe→Cu	Cu→Fe	Fe→Cu
300	0,40	0,40	2,3	8,2
700	0,04	0,08	1,8	0,4

Шостий розділ «Магніто-оптичні і еліпсометричні дослідження властивостей і процесів у нанорозмірних плівкових системах» містить три підрозділи. У *першому* наведені результати дослідження методом МОКЕ магніто-оптичних властивостей окремих фрагментів і в цілому наноструктури спін-вентиля, схема якого зображена на рис. 14. Цей метод дозволяє контролювати коерцетивність плівок, дифузійні процеси і твердофазні реакції біля інтерфейсів і по всьому об'єму плівкової системи. Рис. 17 ілюструє коерцетивність плівки Co, отриманої при різних температурах підкладки. При утворенні твердих розчинів атомів Co в Cu, Ag або Au при термовідпалюванні петля гістерезису різко змінюється, що проілюстровано на рис. 18 на прикладі як різних фрагментів, так і самого спін-вентиля. Було також помічено, що при заміні у спін-вентилі шару Cu(6) на Au(6) його термічна стабільність погіршується.

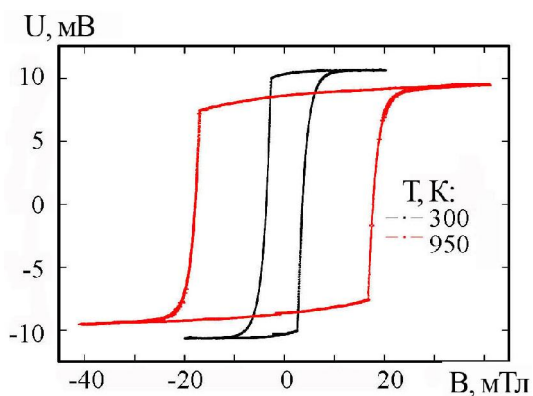


Рис. 17. Величина МОКЕ у плівці Co (40), отриманій при $T_n \approx 300$ (1) і 950 K (2)

У другому підрозділі наведені результати еліпсометричних досліджень оптичних характеристик (фазовий (Δ) і амплітудний (ϕ) кути) наноструктур спін-вентиля залежно від температури термообробки. Було отримано, що ці залежності мають лінійний характер і кут Δ зменшується, а ϕ збільшується при відпалюванні спін-вентиля від 300 до 750 K. Величина кутів дуже чутлива до структурно-фазового стану плівкових систем (наприклад, ГЦП \rightarrow ГЦК перехід у

шарі Co; утворення твердих розчинів біля інтерфейсів), але до $T_s \approx 700$ K зміна кутів Δ і ϕ залежно від T_s , кількості шарів, загальної концентрації атомів Co незначна, що свідчить про відсутність помітних змін в оптичній щільності окремих шарів.

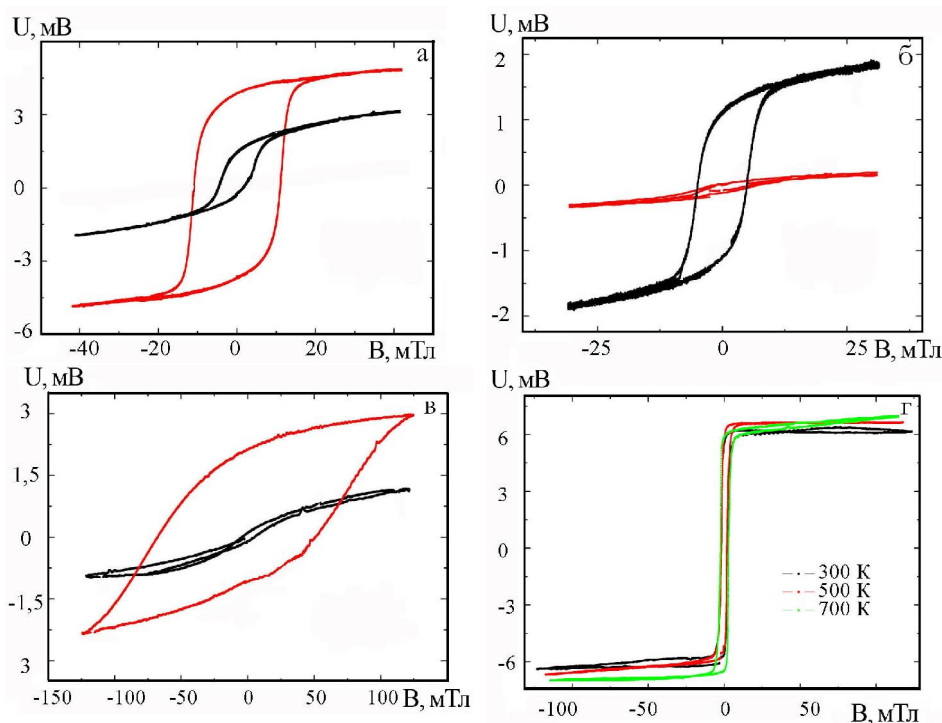


Рис. 18. Величина МОКЕ для двошарових фрагментів: Ag(35)/Co(30)/ (а); Au(50)/Co(50)/ (б); Cu(25)/Co(30)/ (в); Au(5)/Co(3)/Cu(6)/

Co(20)/Au(40)/Cr(3)/Pt (г), де шар Co отриманий при $T_n \approx 950$ K. Температура T_s :

1 - 300 і 2 - 700 K

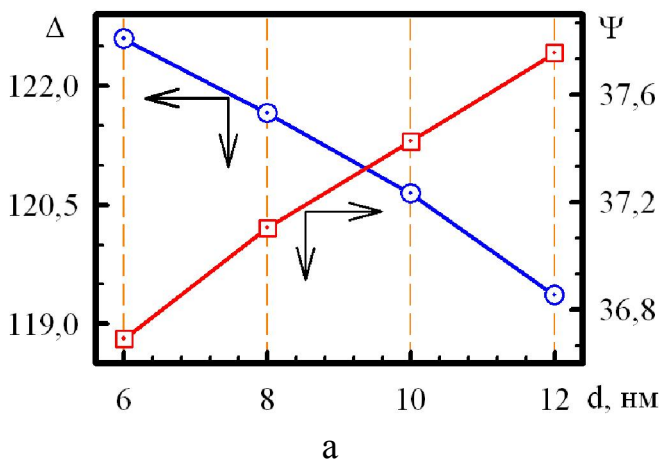
У третьому підрозділі запропонована методика використання генетичних алгоритмів (ГА) для розв'язування оберненої задачі еліпсометрії – визначення показників заломлення і товщини кожного шару спін-вентильної наноструктури, в якій мають місце процеси розмиття інтерфейсів і/або утворення проміжних шарів. ГА реалізуються за допомогою таких мов програмування, як C, C++, LabVIEW, Java та ін. Запропоноване в роботі програмне забезпечення було розроблено у середовищі LabVIEW, мова програмування якого, за своєю суттю, графічна і підтримує концепцію dataflow. Усі програмні конструкції в LabVIEW (цикли, структури Event, Case, масиви,

кластери та ін.) реалізуються у вигляді графічних піктограм. Графічний підхід до програмування має велику перевагу при створенні паралельного програмного забезпечення з великою кількістю одночасно працюючих потоків. Розроблене програмне забезпечення було застосовано для визначення показника заломлення ($n+ik$) та товщини окремих шарів у спін-вентильній структурі Au/Co/Cu/Co/SiO₂/Si на основі експериментальних значень кутів φ і Δ . В опціях користувача є також такі параметри: кут падіння, довжина хвилі, розмір популяції, кожна із яких може бути розв'язком оберненої задачі, crossover, weighting. Крім того, можна задати формулу розрахунку cost function (cf), яка являє собою сумарну похибку і відхилення згенерованої популяції щодо заданої моделі і зазначених експериментальних кутів Δ і φ . Нами запропоновано співвідношення для cf у загальному вигляді:

$$cf = A(|\Delta - \Delta_{експ}|)^{n_1} + B(|\Psi - \Psi_{експ}|)^{n_2} + C(|\Delta n|)^{n_3} + D(|\Delta k|)^{n_4} + E(|\Delta d|)^{n_5},$$

де A–E і n_1 – n_5 – вагові параметри, що задають величину внеску в сумарну cf відхилення $\Delta_{роз}$ і $\varphi_{роз}$ від їх експериментальних значень та відхилення розрахункових параметрів n , k і d від інтервалів n_{min} – n_{max} , k_{min} – k_{max} та d_{min} – d_{max} .

Рис. 19 ілюструє результати розрахунків на прикладі спін-вентильної структури Au(3)/Co(3)/Cu(6-12)/Co(20)/SiO₂/Si/.



n=1 k=0	Вакуум
n= 0,185 - 0,209 k= -2,90 - -3,27	Au d= 2 - 4 нм
n= 1,835 - 2,069 k= -3,91 - -4,41	Co d= 2 - 4 нм
n= 0,234 - 0,264 k= -3,21 - -3,61	Cu d= 4 - 14 нм
n= 1,835 - 2,069 k= -3,91 - -4,41	Co d= 18-22 нм
n= 1,370 - 1,544 k= 0	a-SiO₂ d= 0 - 5 нм
n= 3,954 - 4,459 k= -0,40 - -0,44	a-Si

б

Рис. 19. Залежність кутів Δ і Ψ від товщини півки Cu (а) та модель спін-вентильної структури (б) із зазначенням Δn , Δk і Δd

Таким чином, використання ГА у комплексі із дифракційними і спектральними методами дозволяє отримати інформацію щодо дифузійних процесів і твердофазних реакцій і правильно інтерпретувати результати з електрофізичних та магніторезистивних властивостей.

Сьомий розділ «Узагальнена характеристика фізичних процесів у наноструктурованих плівкових матеріалах» складається із чотирьох підрозділів, у першому із яких проаналізовані фізичні процеси в тензорезисторах при

пружній і пластичній деформації. До них у першу чергу відносять процеси дифузії та фазоутворення; розсіювання електронів на зовнішніх поверхнях плівки, межах зерен та інтерфейсах за наявності або відсутності магнітного поля; процеси зміни коефіцієнтів розсіювання і величини СДВП при пружній або пластичній деформації; особливості генерації та анігіляції одиночних дислокацій при їх переміщенні вздовж інтерфейсу та ін. Здійснено порівняння експериментальних величин $\varepsilon_{\text{пер}}$ від пружної або пластичної деформації для одно- і двошарових плівок Cr, Cu, Fe, Cu/Cr, Fe/Cr з аналогічними результатами для інших плівкових систем. Узагальнені літературні дані щодо трьох механізмів повзучості у моно- і полікристалічних плівках.

У *другому підрозділі* проаналізовано маловивчене питання про особливості тензоефекту в тензорезисторах на основі суміші провідна фаза – діелектрик згідно з концепцією про КТ на проміжку СДВП електрона ($\gamma_{\lambda_0} = \Delta r/r \cdot \varepsilon_{\lambda_0}$, де r – опір цього проміжку). Розрахунки свідчать про те, що такі системи мають підвищену величину КТ (порядок $10\text{-}10^2$ одиниць). Результати реалізації даної концепції представлені у четвертому підрозділі на прикладі масиву наночастинок із середнім розміром $2r_0 \cong \lambda_0$.

У *третьому підрозділі* обговорюється кореляція між величинами ТКО, КТ, МО, ГМО і МОКЕ та процесами взаємної дифузії атомів, фазоутворення та інтерфейсним розсіюванням електронів. При аналізі враховані також результати теоретичних розрахунків на основі розроблених теоретичних моделей та магніто-оптичні властивості. Відмічається важливість результатів дослідження МДЕ, на основі яких установлені його анізотропний характер і аналогія з АМО.

У *четвертому підрозділі* акцентується увага на перспективі застосування малих частинок (МЧ) у сенсорній техніці та спінтроніці, а нанорозмірних плівкових зразків – у мікро- і наноробототехніці. Наведені результати дослідження електрофізичних властивостей МЧ Au, Cu і Ni, отриманих методом диспергування, згідно з якими величина ТКО залежно від ефективної товщини плівки може бути від'ємною, додатною або близькою до нуля, а величина КТ близька до 100 одиниць.

Узагальнені результати сьомого розділу були використані при формуванні загальних висновків.

ВИСНОВКИ

У дисертації розвинутий напрям досліджень стосовно фізичних процесів у плівкових матеріалах із спін-залежним розсіюванням електронів та їх взаємозв'язку з електрофізичними, магніторезистивними і магнітооптичними властивостями. У роботі вперше проведені комплексні експериментальні та теоретичні дослідження впливу таких фізичних процесів, як зміна параметрів розсіювання електронів провідності на зовнішніх поверхнях, межах зерен, інтерфейсах та гранулах при дії температурних, механічних і магнітних полів; міжшарова зерномежова дифузія атомів і фазоутворення; формування шорсткості інтер-

фейсів, їх розмиття і перемішування атомів біля них, структурних перетворень, які обумовлюють перехід від ГМО до звичайного МО на електрофізичні і магніторезистивні властивості багат шарових плівкових систем, мультишарів та гранульованих сплавів, на намагніченість і еліпсометричні характеристики спін-вентильної наноструктури.

Узагальнені висновки роботи можна сформулювати таким чином:

1. Установлена кореляція між фізичними процесами, вивченими методами електронної мікроскопії, електронної і рентгенівської дифракції та методами ВІМС і ОЕС, і електрофізичними властивостями (ТКО і КТ в області пружної та пластичної деформації) плівкових систем, що дозволило вперше зробити такі узагальнювальні висновки:

– у системах на основі Cu і Cr зберігається індивідуальність окремих шарів, а у системах на основі Fe і Cu може стабілізуватися метастабільний т.р. в області інтерфейсу;

– у системах на основі Fe і Cr та Co і Cu утворюються т. р. із необмеженою розчинністю Cr у Fe або Fe у Cr та Co у Cu у процесі конденсації (Fe/Cr) або при термообробці до 700 К (Co/Cu); у випадку надлишкової концентрації атомів Fe або Cr утворюються розбавлені т.р. (Fe, Cr) або (Cr, Fe), що не сприяє стабілізації гранульованого стану, хоча при цьому можливе утворення «магнітних» інтерфейсів завдяки антиферромагнітній орієнтації магнітних моментів атомів Cr і Fe у вузькому прошарку т.р. біля інтерфейсу; у системі на основі Cu і Co при надлишку атомів Co може сформуватися система [т.р. (Cu, Co)] / Co/ П;

– у системах на основі Co і Ag або Au утворюються обмежені т.р. при температурах відпалювання $T_g \geq 700$ К зі стабілізацією гранульованого стану; у випадку надлишкової концентрації однієї з компонент має місце той самий ефект, що і у плівковій системі Cu/Co;

– уперше проведені дослідження ефекту тензочутливості в області пружної та пластичної деформації свідчать про значний внесок зерномежових процесів у величину ТК при пластичній деформації, у той час як реалізація гранульованого стану не дає якогось помітного внеску як при пружній, так і пластичній деформації;

– уперше проведений теоретичний аналіз дозволив пояснити природу максимумів на залежності γ_{lm} від ε_l , поява яких відбувається в умовах нелінійних процесів деформації, тобто коли

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_1^2} = \text{const} .$$

2. Здійснена експериментальна перевірка напівфеноменологічних і феноменологічних моделей для ТКО і КТ багат шарових плівкових систем, в яких ураховуються:

– температурна залежність не тільки для СДВП, але й для коефіцієнтів дзеркальності та проходження меж зерен і інтерфейсів; розбіжність напівфеноменологічної моделі з експериментальними результатами для ТКО становить не більше 30%;

– стабілізація гранулярного стану в матриці т. р. (Cu, Co), (Ag, Co) та (Au, Co); модель задовільно узгоджується з експериментальними даними для ТКО, але

має недолік, пов'язаний із необхідністю експериментального визначення таких величин, як середній радіус гранул, середня довжина фрагментів т. р., їх концентрація і т.п.;

– утворення проміжного шару т. р. біля інтерфейсу (системи на основі Co і Cu, Ag або Au при $T_e < 700$ K), який у граничних випадках може утворитися по всій товщині плівкової системи (багат шарові плівки або мультишари на основі Fe і Cr) або локалізуватися біля інтерфейсу у вигляді тонкого прошарку (система Cu/Cr і частково Fe/Cu); модель добре узгоджується із експериментальними даними для ТКО і КТ, а також дозволяє прогнозувати електрофізичні властивості для широкого інтервалу товщини окремих шарів.

3. Проведені комплексні дослідження фізичних процесів і магніторезистивних властивостей у мультишарах на основі Fe і Cu або Cr та Co і Au (Cu), що дозволило встановити деякі нові особливості ефектів МО і ГМО:

– оскільки у мультишарах Fe/Cr не реалізується гранульований стан, то їх магніторезистивні властивості повністю визначаються наноструктурою: при формуванні шляхом відповідної технології конденсації мультишарів із стабільними інтерфейсами реалізується ефект ГМО, а при утворенні по всьому об'єму зразка в процесі конденсації або термообробки гомогенного т. р. (α -Fe, Cr) реалізується АМР - ефект, величина якого залежить від концентрації атомів Fe і спонтанної намагнічуваності окремих областей т. р. (α -Fe, Cr);

– зникнення ефекту ГМО при опроміненні мультишарів Fe/Cr іонами Au^{+15} , що спричиняє перемішування атомів Fe і Cr, підтверджує попередній висновок;

– у мультишарах Fe/Cu ефект ГМО реалізується частково завдяки антиферомагнітній взаємодії між шарами Fe, а частково завдяки СЗР електронів на гранулах Fe, які локалізуються біля інтерфейсів;

– класичні моделі МО необхідно доповнювати положенням про польову залежність коефіцієнта дзеркальності зовнішніх поверхонь, коефіцієнтів проходження межі зерен і доменів та інтерфейсів; уперше запропонована відповідна теоретична модель для МО.

4. Уперше запропоновано поняття магнітний коефіцієнт коефіцієнта тензочутливості, побудована елементарна теорія і отримано загального вигляду співвідношення, яке пов'язує між собою β_B і важливу тензометричну характеристику

ку $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_i \partial B}$, величина якої порядку $10^{-5} - 10^{-6}$ Ом·м Тл⁻¹.

5. Вивчено магнітодеформаційний ефект тензочутливості в феромагнітних плівках α -Fe, Ni і Co, який полягає у збільшенні величини γ_1 в магнітному полі при перпендикулярній геометрії вимірювання в межах 0,7 - 9% (α -Fe); 25 - 34% (Ni) та 8 - 17% (Co) або зменшенні γ_1 при поздовжній геометрії вимірювання в межах 26-28 % (α -Fe); ефект має анізотропний характер, кількісною характеристикою якого є коефіцієнт анізотропного магнітодеформаційного ефекту.

6. Уперше проведені комплексні дослідження дифузійних процесів у плівкових матеріалах із спин-залежним розсіюванням електронів методами ВІМС, ОЕС, низькотемпературного резистометричного і розрахункового на основі за-

пропонованої класичної моделі для провідності двошарових полікристалічних плівок в умовах дифузії атомів:

- установлені тип дифузії, величини дифузійних пробігів атомів, ефективні коефіцієнти дифузії й енергії активації та рівняння дифузії;
- експериментально встановлено, що при пошаровій конденсації багатошарових плівкових систем має місце зерномежова КСД, яка може проходити на один-два порядки більш інтенсивно у порівнянні із ТД, що пояснюється дифузійним насиченням МЗ і слабким відтоком інорідних атомів із МЗ у їх об'єм. На основі температурних залежностей ефективного коефіцієнта дифузії (сумарний ефект КСД+КСД+ТД) розраховані рівняння дифузії для різних дифузійних пар (Ag і Со; Au і Со та Cr і Fe);
- визначені внески зерномежових КСД і ТД у загальний дифузійний процес;
- установлено, що у випадку дифузійної пари Cr і Fe ефективний коефіцієнт дифузії зменшується при збільшенні температури, що пояснюється процесом розшарування гомогенного т. р.- (α - Fe, Cr), який утворився у процесі конденсації.

7. Уперше проведені дослідження методами МОКЕ і нуль-еліпсометрії із використанням генетичного алгоритму для розв'язування оберненої задачі, які дозволили вивчити оптичні і магнітні характеристики фрагментів спін-вентильної структури на основі шарів Со, Au (Cu) і Cr, в якій має місце ГМО до 1,2%, що в кінцевому результаті дозволило запропонувати наноструктуру і технологію її формування та установити температурні інтервали функціонування.

8. Проведені дослідження електрофізичних і магніторезистивних властивостей наноструктурованих плівок (масив МЧ) Au, Cu і Ni, отриманих методом температурного диспергування, згідно з якими ТКО таких систем може мати як від'ємні, так і додатні значення, а КТ мати величину порядку 10^2 одиниць.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Однодворець Л. В. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів в умовах фазоутворення: монографія / Л. В. Однодворець, С. І. Проценко, А. М. Черноус; [за заг. ред. І. Ю. Проценка].- Суми: Наукове видання Вид-ва СумДУ, 2011.- 203с. ISBN 978-966-657-364-6.
2. Diffusion processes in nanoscale two-layer film systems based on Fe and Cu or Fe and Cr / [S. I. Protsenko, O. V. Synashenko, Y. Zabala, M. Marszalek] // J. Surf. Investigation. X-ray, Synch. Neutron Techniq.- 2011.- V.5, №4.- P.787-790.
3. Механічні властивості мікронних і нанорозмірних металевих плівок / [О.П. Ткач, Л. В. Однодворець, С. І. Проценко, Д. В. Великодний, К. В. Тищенко, І. Ю. Проценко] //Ж. нано- електрон. фізики.- 2010.-Т.2, №1.-С.51-59.
4. Electrophysical properties of Ni/V and Cr/Fe multilayer films / [L. Odnodvorets, S. Protsenko, O. Synashenko, D. Velykodnyi, I. Protsenko] // Cryst. Res. Technol.-2009.- V. 44, №1.-P.74-81.

5. Annealing behaviour of structural and magnetic properties of evaporated Co thin films / [M. Jergel, I. Cheshko, Y. Halahovets, P. Siffalovic, I. Mat'ko, R. Senderak, **S. Protsenko**, E. Majkova, S. Luby] // J. Phys. D: Appl. Phys.- 2009.- V. 42- P. 135406- 135414.
6. Electrophysical properties of Cu/Cr and Fe/Cr films systems within elastic and plastic deformation range / [**S. I. Protsenko**, D. V. Velykodnyi, V.A. Kheraj, M.S. Desai, C.J. Panchal, I.Yu. Protsenko] // J. Mater. Sci.- 2009.- V. 44, №18.- P. 4905-4910.
7. Магнітооптичні та магніторезистивні властивості спин-клапаних структур на основі Co, Cu і Au / [И. В. Чешко, **С. И. Проценко**, Л. В. Однорець, P. Siffalovic] // Письма в ЖТФ.- 2009.- Т. 35, Вып. 19.- С. 53-60.
8. **Проценко С.І.** Магнітодеформаційний ефект в тонких металевих плівках / [С.І. Проценко] // Ж. нано- електрон.фізики.- 2009.- Т.1, №2.- С. 7-10.
9. Зерномежева дифузія в плівках Cu і Ni з тонким металевим покриттям / [Т. П. Говорун, **С. І. Проценко**, В. О. Пчелінцев, А. М. Черноус] // Ж. нано-електрон.фізики.- 2009.- Т.1, №4.- С. 42-53.
10. Магніторезистивні властивості многослойних наноразмерних пліночних систем / [О. В. Сынашенко, Е. П. Ткач, И. П. Бурык, Л. В. Однорець, **С. И. Проценко**] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, полупроводники.- 2009.- №18.- С. 169-174.
11. Великодний Д.В. Тензорезистивні властивості двошарових плівкових систем Cu/ Cr і Fe/Cr / [Д. В. Великодний, **С. І. Проценко**, І. Ю. Проценко] // Металлофіз. новіші технол.- 2008.- Т. 30, № 12.-С. 1659-1666.
12. Auger electron spectroscopy analysis of interface roughness of Fe/Cr bilayers / [M. Marszalek, V. Tokman, **S. Protsenko**, M. Kas, A. Polit, Y. Zabala, K. Marszalek] // Vacuum.-2008.- V.82.- P.1051-1056.
13. **Проценко С.І.** Феноменологічна модель електрофізичних властивостей плівкових гранульованих сплавів / [**С. І. Проценко**, І. В. Чешко, Л. В. Однорець] // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка.- 2008.- №1.- С. 22-27.
14. Чешко І.В. Магнітооптичні та магніторезистивні властивості плівкових функціональних елементів на основі Co, Cu та Au / [І. В. Чешко, **С. І. Проценко**, П. Шіффаловіч] // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка.- 2008.- №2.- С. 106-110.
15. Ефект тензочутливості в металевих плівкових матеріалах (огляд) / [Л. В. Однорець, **С. І. Проценко**, А. М. Черноус, І. Ю. Проценко] // Успехи физ. мет.-2007.- Т. 8, № 2.- С. 109-165.
16. Структурно-фазовий стан, стабільність інтерфейсів та електрофізичні властивості двошарових плівкових систем (огляд) / [**С.І. Проценко**, І.В. Чешко, Д. В. Великодний, О. В. Синашенко, Л. В. Однорець, І. М. Пазуха, І. Ю. Проценко] // Успехи физ. мет.-2007.- Т. 8, №4.- С. 247-278.
17. Дифузійні процеси в нанокристалічних двошарових плівкових системах на основі металів / [В. В. Бібік, Т. М. Гричановська, М. Маршалек, О. Б. Проценко, **С. І. Проценко**] // Металлофіз. новіші технол.- 2006.- Т. 28, № 6.-С. 707-715.

18. Проводимость двухслойных моно-и поликристаллических слоев металла в условиях взаимной диффузии / [Л. В. Дехтярук, **С. И. Проценко**, И.В. Чешко, И. М. Пазуха] // ФТТ.-2006.- Т. 48.- Вып. 10.-С. 1729-1739.
19. Пазуха І.М. Вплив інтерфейсного розсіювання на електрофізичні властивості плівкових матеріалів / [І. М. Пазуха, **С. І. Проценко**] // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка.- 2005.- №8 (80).- С. 148-153.
20. Swift heavy-ion modification of the interface structure in Fe/Cr multilayers / [М. Кас, М. Toulemonde, J. Jaworski, J. Juraszek, R. Kruk, **S. Protsenko**, V. Tokman, M. Marszalek] // Vacuum.-2005.- V. 78.- P.661-665.
21. **Проценко С.І.** Внесок температурних ефектів у термічний коефіцієнт опору багат шарових плівкових систем / [**С. І. Проценко**, О. В. Синашенко, А. М. Черноус] // Металлофиз. новейшие технол.- 2005.- Т. 27, № 12.-С. 1621-1633.
22. The strutura and phase composition of Co/Cu bilayers- sensing elements for manetoresistive application/ [K. Marszalek, M. Marszalek, **S. Protsenko**, A. Chornous] // Materialy IX Konferencja Gzujniki Optoelektronicze I Elektronicze.- Krakow - Zakopane: IFJ PAN, 2006.- P. 161-164.
23. Структурно-фазовий стан і стабільність інтерфейсів двошарових плівкових систем / [Л. В. Однодворець, **С. І. Проценко**, І. М. Пазуха, В. А. Соломаха, І. В. Чешко] // Наноматеріали. Т.2. Сборник докладов Харьковской нанотехнологической Ассамблеи.- Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008.- С. 55-63.
24. Великодний Д.В. Тензорезистивные свойства двухслойных пленок Cu/Cr в области пластической деформации / [Д. В. Великодний, А. И. Кучма, **С. И. Проценко**]// Харьковская нанотехнологическая Асамблея - 2007.- Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007.- С. 124-126.
25. Структурно-фазовий стан і електрофізичні властивості двошарових плівкових систем / [Є. Майкова, І. Ю. Проценко, **С. І. Проценко**, І. В. Чешко] // Матеріали Міжнародної конференції [„Сучасні проблеми фізики твердого тіла”], (Київ, 8-11 жовтня 2007р.)- С.178.
26. Фазоутворення в двошарових плівках Co/Au, Co/Ag і Cu/Fe / [Є. Майкова, **С. Проценко**, І. Чешко, Н. Шумакова] // Фізика і технологія тонких плівок та наносистем. Т.2 [МКФТТПН -ХІ], (Івано-Франківськ, 7-12 травня 2007 р.), 2007.- С. 115.
27. Структура і електрофізичні властивості двошарових плівок Co/(Au, Ag, Cu) та Cu/Cr / [Є. Майкова, **С. І. Проценко**, І. М. Пазуха, І. Ю. Проценко, І. В. Чешко] // Тези конференції НАНСИС 2007, (Київ, 21-23 листопада 2007 р.), 2007.- С. 372.

2. Наукові праці апробаційного характеру

28. Магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових систем на основі Fe і Pd / [О. П. Ткач, Л. В. Однодворець, С. Непійко, **С. І. Проценко**] // ФІП.- 2009.- Т.7, №3.- С. 256-261.
29. Федченко Е.В. Использование генетического алгоритма для обработки экспериментальных данных / [Е. В. Федченко, **С. И. Проценко**] //Моделювання та інформаційні технології. Т.3.- Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова, 2010.- С. 258-266.

30. **Protsenko S. I.** Physical processes in multilayer films and spin-valve structures / [S. I. Protsenko] // Матеріали XIII Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок і наносистем. Т.1, МКФТТПН - XIII, (Івано-Франківськ, 16-20 травня 2011).- P.73.
31. Magnetoresistive and magneto optic properties of spin- valves based on Co, Cu and Au / [I. Cheshko, **S. Protsenko**, N. Shumakova, K. Tyschenko] // Міжнародна конференція ЄВРИКА - 2010, (Львів, 19-21 травня 2010).- P. A 40.
32. Magneto optical properties (МОКЕ) of spin- valves based on Co, Cu or Au / [I. Cheshko, D. Kutnyakhov, L. Odnodvoretz, **S. Protsenko**, S. Nepijko, G. Schoenhense] // Book of Abstracts Verhandlungen Ф, (Dresden, 22-27 March 2009).- P. MA 13.15.
33. Магнітооптичні властивості нанокристалічних плівок на основі Co і Cu, Ag та Au / [**С. І. Проценко**, П. Шіфаловіч, Н. І. Шумакова, І. В. Чешко, І. Ю. Проценко] // Фізика і технологія тонких плівок та наносистем. Т.2, МКФТТПН -XII, (Івано-Франківськ, 18-23 травня 2009 р.).- С. 299.
34. Magneto optical properties of film systems based on Co, Cu or Au / [I. Cheshko, L. Odnodvoretz, **S. Protsenko**, O. Synashenko, P. Shiffalovich] // Book of Abstracts XLIV Zakopane School of Physics, (Krakow, 18-23 May 2009).- P.32.
35. Магниторезистивные свойства пленочных материалов со спин-зависимым рассеиванием электронов / [И. В. Чешко, О. В. Сынашенко, **С. И. Проценко**, Н. И. Шумакова] //Тези доповідей 2-ї Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених „Фізика низьких температур”, (Харків, 1-5 червня 2009 р.).- С.110.
36. Однодворець Л. В. ТКО двошарових плівкових систем на основі Cr і Cu та Cr і Fe / [Л. В. Однодворець, І. О. Шпетний, **С. І. Проценко**] // Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції „Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій”, (Запоріжжя, 24-26 вересня 2008 р.).- С. 153-154.
37. Синашенко О. В. Дифузійні процеси в нанорозмірних плівкових системах на основі Fe і Cu та Fe і Cr / [О. В. Синашенко, **С. І. Проценко**] // Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції „Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій”, (Запоріжжя, 24-26 вересня 2008 р.).- С. 154-156.
38. Феноменологічна модель електрофізичних властивостей гранульованих плівкових сплавів / [Л. В. Однодворець, **С. І. Проценко**, Ч. Панчал, І. В. Чешко] // Сборник тезисов докладов Международной конференции „Современные проблемы физики металлов”, (Киев, 7-9 октября 2008 г.).- С.59.
39. Thermally iduced structural transformation in Co films for giant magnetoresistance spin valves / [M. Jergel, I. Cheshko, Y. Halahovets, E. Majkova, P. Siffalovic, **S. Protsenko**] // Book of Abstracts of XXI Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography, (Osaka, 23-31 August 2008).- P. 12.11.34.
40. Вплив деформації та термообробки на електрофізичні властивості багатшарових плівкових систем / [Д. Великодній, І Пазуха, **С. Проценко**, І. Чеш-

ко] // Збірник тез Всеукраїнської конференції ЄВРИКА - 2006, (Львів, 15-17 травня 2006 р.) .-С.А 39.

3. Праці, які додатково відображають наукові результати

41. Проценко І. Ю. Прилади та методи дослідження плівкових матеріалів (навчальний посібник) / І. Ю. Проценко, А. М. Черноус, **С. І. Проценко**.- Суми: Вид-ва СумДУ, 2007.- 264 с. ISBN 978-966-657-156-4.
42. Sensor and microelectronic elements based on nanoscale granular systems [сайт] / [S. A. Nepijko, D. Kutnyakhov, **S. I. Protsenko**, L. V. Odnodvoretz, G. Schonhense] // J. Nanopart. Res.- 2011.- DOI 10.1007/s11051-011-0560-3.
43. Зленко В. О. Одержання малих частинок Cu і Ni методом диспергування / [В. О. Зленко, **С. І. Проценко**] // Металлофиз. новейшие технол.- 2011.- Т.33, №4.- С. 495-500.
44. Ion modification of the magnetotransport properties of Fe/Cr multilayers / [М. Кас, М. Toulemonde, J. Jaworski, J. Juraszek, R. Kruk, **S. Protsenko**, V. Tokman, M. Marszalek] // Mol. Phys. Rep.-2004.- V. 40.- P.84-89.
45. Демиденко М. Г. Исследование оптических, магнито-оптических свойств и структурно-фазового состояния пленочных систем на основе Cr и Fe / [М.Г. Демиденко, **С. И. Проценко**] // 20-я Международная Крымская конференция КрыМиКо.- Москва-Киев-Минск-Севастополь, 2010.- С. 886-887.
46. Micro- and nanorobotics / [R. Safaric, J. Cas, G. Skorc, **S. I. Protsenko**] // XXII International Symposium of Informatics, Comunication and Atomation Technologies (IEEE).- Sarajevo, 2009.- P. 114-119.
47. Демиденко М. Г. Розробка Low-Cost моделі тунельного мікроскопу / [М. Г. Демиденко, **С. И. Проценко**] // Материалы 12-го Международного молодежного форума „Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке”, (Харьков, 1-3 апреля 2008 г.)- С. 287.
48. Демиденко М. Дослідження наноструктурованих поверхонь наночастинок кобальту та острівцевих багаточарових структур / [М. Демиденко, **С. Проценко**] // Тези доповідей Міжнародної конференції ЄВРИКА -2008, (Львів, 19-21 травня 2008 р.)- С. С11.
49. Correlation between structure and optical properties of Au(Ag)/Co film systems / [E. Majkova, **S. Protsenko**, I. Cheshko, L. Odnodvoretz, I. Protsenko, O. Synashenko] // Book of Abstracts XLII Zakopane School of Physics, (Krakow,19-24 May 2008).- P. 23.
50. Магнітооптичні і магніторезистивні властивості плівок на основі Cu і Co / [І. В. Чешко, Н. І. Шумакова, П. Шіффаловіч, **С. І. Проценко**] //Всеукраїнська конференція молодих вчених ”Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології”, (Київ, 12-14 листопада 2008 р. С.- 17.
51. Кореляція між структурно-фазовим станом і електрофізичними властивостями плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів / [О. В. Синашенко, І. М. Пазуха, **С. І. Проценко**, І. В. Чешко] // Матеріали Міжнародної конференції „Сучасні проблеми фізики твердого тіла”, (Київ, 8-11 жовтня 2007р.)- С.158.

52. Великодний Д. В. Автоматизация процесса исследования тензорезистивных свойства тонкопленочных материалов / [Д. В. Великодний, С. И. Проценко] // Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития.- Харьков-Туапсе.- Харьков: ХНУРЭ, 2007.- С. 164-165.
53. Проценко С. І. Розробка Low-Cost тунельного мікроскопу для потреб лабораторій наукових установ і ВНЗ / [С. І. Проценко] // Тези конференції „НАНСИС 2007”, (Київ, 21-23 листопада 2007 р.) .- С. 502.
54. Бібик В. Магніторезистивні і електрофізичні властивості багат шарових плівкових систем Fe/Cr/ [В. Бібик, М. Маршалек, С. Проценко] // Тези конференції „НАНСИС 2007], (Київ, 21-23 листопада 2007 р.)- С. 40.
55. Великодний Д. В. Особливості тензорезистивних властивостей нанорозмірних плівок Cu/Cr при великій кількості деформаційних циклів / [Д. В. Великодний, М. Г. Демиденко, С. І. Проценко] // Фізичні явища в твердих тілах: матеріали 8-ї Міжнародної конференції, 11-13 грудня 2007 р.- Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2007.- С. 72.
56. Эффект гигантского магнитоопору у магнітних сандвічах з полікристалічним спейсером / [Л. В. Дехтярук, М. Маршалек, С. І. Проценко, І. В. Чешко, А. М. Черноус] // Матеріали Ювілейної X Міжнародної конференції „Фізика і технологія тонких плівок”, Т.1, (Івано-Франківськ, 16-21 травня 2005 р.)- С. 246-247.
57. Особенности диффузионных процессов в нанокристаллических пленочных системах / [В. В. Бибик, М. Маршалек, Е. Б. Проценко, С. И. Проценко] // Фізичні явища в твердих тілах: матеріали 7-ї Міжнародної конференції, 14-16 грудня. 2005 р.- Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2005.- С. 62.

АНОТАЦІЯ

Проценко С. І. Фізичні процеси і властивості наноструктурованих плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів. – *Рукопис.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.– Сумський державний університет, Суми, 2011.

Дисертацію присвячено встановленню взаємного зв'язку між електрофізичними (термічний коефіцієнт опору і коефіцієнт поздовжньої тензочутливості), магніторезистивними (магнітоопір, анізотропний магнітоопір, магнітодеформаційний ефект і гігантський магнітний опір), магнітооптичними (магнітооптичний ефект Керра, коерцетивність) властивостями і фізичними процесами у плівкових матеріалах на основі Co і Cu, Ag і Au; Cr і Fe та Cu і Fe із різним структурно-фазовим станом – тверді розчини, плівкові гранульовані сплави, багат шарові плівкові системи та мультишари, в яких зберігається індивідуальність окремих шарів або утворюється проміжний шар біля інтерфейсів. До фізичних процесів відносять такі, як взаємна дифузія атомів і фазоутворення, зміна параметрів електроперенесення (середня довжина вільного пробігу електронів, коефіцієнтів розсіювання і проходження межі зерен та інтерфейсів електронами) під дією температури, магнітного поля, одновісної пружної або пластичної деформації. Запропоновані й апробовані феноменологічні моделі для те-

рмічного коефіцієнту опору, магнітоопору і магнітодеформаційного ефекту, які враховують зазначені фізичні процеси.

Ключові слова: термічний коефіцієнт опору, тензоефект, магнітоопір, гігантський магнітний опір, тверді розчини, гранульовані сплави, дифузія, просвічуюча електронна мікроскопія, вторинно-іонна мас-спектрометрія, оже-електронна спектроскопія, магніто-оптичний ефект Керра.

АННОТАЦИЯ

Проценко С. И. Физические процессы и свойства наноструктурированных пленочных материалов со спин-зависящим рассеянием электронов. – *Рукопись.*

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела.– Сумский государственный университет, Сумы, 2011.

Диссертация посвящена установлению взаимосвязи между электрофизическими (термический коэффициент сопротивления и коэффициент продольной тензочувствительности), магниторезистивными (магнитосопротивление, анизотропное магнитосопротивление, магнитодеформационный эффект и гигантское магнитное сопротивление), магнитооптическими (магнитооптический эффект Керра, коэрцитивность) свойствами и физическими процессами в пленочных материалах на основе Co и Cu, Ag, Au; Cr и Fe или Cu и Fe с различным структурно-фазовым состоянием – твердые растворы, пленочные гранулированные сплавы, многослойные пленочные системы или мультислои, в которых сохраняется индивидуальность отдельных слоев или образуется промежуточный слой возле интерфейсов. К физическим процессам, которые определяют указанные свойства пленочных материалов, прежде всего, относятся взаимная диффузия атомов, которая включает в себя различные типы: конденсационно-стимулированная, ионно- стимулированная и термодиффузия, которые могут протекать по механизму зернограничной или объемной диффузии. Кроме диффузии, на физические свойства оказывают влияние изменение параметров электропереноса (средняя длина свободного пробега электронов, коэффициентов рассеивания на внешних поверхностях пленки и прохождения границы зерен или интерфейсов электронами) под действием температуры, магнитного поля, одноосной упругой или пластической деформации. Предложены и апробированы феноменологические модели для термического коэффициента сопротивления, магнитосопротивления и магнитодеформационного эффекта, которые учитывают все перечисленные выше физические процессы. Полученные соотношения для магнитодеформационного эффекта в однослойных пленках позволяют рассчитать вторую производную удельного сопротивления по деформации и магнитному полю, которая является важной тензометрической характеристикой. Проведенные исследования тензорезистивного эффекта указывают на то, что зернограничное рассеивание электронов дает более значительный вклад по сравнению с процессами рассеивания на гранулах в общую величину коэффициента тензочувствительности. Изучены оптические и магнитные характеристики спин-вентильных структур методами магнитооптического эффек-

та Керра и нуль-елипсометрии с использованием логического алгоритма для решения обратной задачи.

Ключевые слова: термический коэффициент сопротивления, тензоэффект, магнитосопротивление, гигантское магнетосопротивление, твердые растворы, гранулированные сплавы, диффузия, просвечивающая электронная микроскопия, вторично-ионная масс-спектрометрия, оже- электронная спектроскопия, магнито-оптический эффект Керра.

SUMMARY

Protsenko S. I. Physical processes and properties of nanostructural films materials with spin- dependence scattering of electrons.– *Manuscript.*

The thesis for Doctor's degree on physical and mathematical sciences , speciality 01.04.07 – solid state physics.– Sumy State University, Sumy, 2011.

Dissertation is devoted to establishing mutual communication between elektro-physical (thermal coefficient of resistance and gauge factor), magnetoresistive (magnetoresistivity, anisotropy magnetoresistivity, magneto-deformation effect and giant magnetoresistivity) and magneto-optical (Kerr effect, koertsetivity) properties and physical processes in the film materials based on Co and Cu, Ag or Au; Cr and Fe; Cu and Fe with different structural-phase state - solid solutions, alloys granular film, multilayers film systems that contain of individual layers or intermediate layer is formed at the interfaces. To those belonging la physical processes include such as mutual diffusion and phase formation of atoms, changing parameters elektrocurrent (free mean path of electron, scattering coefficient and the coefficient transmithion grain boundaries and interfaces of electrons) under the influence of temperature, magnetic field uniaxially elastic or plastic deformation. Offered and testing phenomenological models for thermal coefficient of resistance, magnetoresistivity and magneto-deformation effec, with take into account the physical processes

Key words: thermal coefficient of resistance, strain deformation effect, magnetoresistivity, giant magnetoresistivity, solid solution, granular alloy, diffusion, transmithion electron microscopy, secondary ion mass- spectroscopy, Auger electron spectroscopy, magneto-optical Kerr effect.

Підписано до друку 2.11. 2011.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 2,4. Обл.- вид. арк. 1,8. Тираж 100 пр. Зам. №.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського- Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12. 2007.