

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Макуха Зінаїда Миколаївна

УДК538.975; 537.312.9; 537.312.8 (043.3)

**МАГНІТОДЕФОРМАЦІЙНИЙ ЕФЕКТ У ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛАХ
НА ОСНОВІ ФЕРОМАГНІТНИХ І НЕМАГНІТНИХ МЕТАЛІВ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2016

Дисертацією є рукопис.

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

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

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

доктор фізико-математичних наук, професор
Чепурних Геннадій Кузьмич,
Інститут прикладної фізики НАН України (м. Суми),
провідний науковий співробітник відділу моделювання
радіаційних ефектів та мікроструктурних перетворень у
конструкційних матеріалах.

Захист відбудеться « 03 » червня 2016 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 Сумського державного університету
за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус БЩ,
ауд. 307. e-mail: d55.051.02@sumdu.edu.ua.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного
університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2,
а також на сайті інституційного репозитарію СумДУ. Режим доступу:
<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/44626>

Автореферат розіслано « 29 » квітня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. В. Чешко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження електрофізичних, тензорезистивних, магнітних, магнітооптичних властивостей плівкових матеріалів викликane рядом актуальних питань фізики твердого тіла. На сьогодні накопичений значний теоретичний та експериментальний матеріал щодо магнітних і тензорезистивних властивостей плівкових систем на основі феромагнітних (Co і Fe) та немагнітних (Cu, Ag, Au, Pt) металів, але маловивченими залишаються питання зміни властивостей таких систем при одночасній дії деформації і зовнішнього магнітного поля. Дослідження магнітодеформаційного ефекту (МДЕ) у коефіцієнті тензочутливості та магнітооптичних властивостях дозволить визначити взаємний вплив магнітного поля та деформації зразків на їх електрофізичні, магнітні й магнітооптичні властивості, зокрема на поведінку електричного опору, коерцитивної сили, магнітного коефіцієнту тензочутливості, зміну доменної структури при різних величинах деформації розтягу.

На момент постановки задачі відомі досить обмежені експериментальні результати щодо вивчення МДЕ в тонких плівках: поведінка опору феромагнітних одношарових плівок Ni, Co і Fe, товстоплівкових металевих сплавів на основі Fe та напівпровідникових плівок р-типу провідності при одночасній дії деформації та магнітного поля, а також результати дослідження впливу деформації на магнітооптичні й магнітні властивості плівок Co. Одержані результати не дають однозначного пояснення щодо впливу магнітного поля на тензорезистивні властивості або деформації на магнітні характеристики тонких плівок. Тому доцільними є експериментальні дослідження магнітодеформаційного ефекту у плівкових магнітних та немагнітних матеріалах при різних значеннях деформації й зовнішнього магнітного поля. Розробка феноменологічної моделі магнітодеформаційного ефекту дозволить встановити закономірності поведінки коефіцієнта тензочутливості та прогнозувати тензорезистивні, магнітні й магнітооптичні властивості плівок при одночасній дії деформації та магнітного поля.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету в рамках держбюджетних тем № 112U001381 «Електрофізичні і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів із спин-залежним розсіюванням електронів» (2012 – 2014 рр.) і № 0115U000689 «Вплив процесів гранулізації і спин-залежного розсіювання електронів на фізичні властивості плівкових твердих розчинів» (2015 – 2017 рр.); міжнародного співробітництва між Сумським державним університетом та Інститутом фізики Університету ім. Й. Гутенберга (м. Майнц, Німеччина) в рамках програми МОН України «Навчання студентів і аспірантів та стажування наукових і науково-педагогічних

працівників у провідних вищих навчальних закладах та науково-педагогічних установах за кордоном» (2012–2013 рр.).

Дисертант брала участь у проведенні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень та під час підготовки звітів.

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи полягала у встановленні закономірностей між структурно-фазовим станом та магнітодеформаційними і магнітооптичними властивостями плівкових матеріалів на основі Co, Cu (Ag або Au) та Fe і Pt; визначенні взаємного впливу магнітного поля та деформації на величину опору, коерцитивну силу (B_c), магнітну доменну структуру.

Відповідно до мети роботи були поставлені та вирішені такі задачі:

– досліджено структурно-фазовий стан вищезазначених плівкових зразків із метою подальшої коректної інтерпретації результатів деформаційних досліджень;

– вивчено тензоефект та магнітодеформаційний ефект у коефіцієнті тензочутливості, встановлено основні закономірності поведінки коефіцієнтів тензочутливості (КТ) та магнітних коефіцієнтів тензочутливості залежно від товщини зразка, матеріалу й типу системи;

– досліджено магнітооптичні властивості та магнітодеформаційний ефект у МОКЕ, встановлено вплив деформації на магнітні характеристики зразків (коерцитивна сила, індукція насичення) та кут повороту Керра;

– розроблено феноменологічну модель магнітодеформаційного ефекту для двохшарових плівкових структур; розраховано магнітні коефіцієнти тензочутливості, що дало можливість кількісно оцінити вплив величини магнітного поля на значення коефіцієнта тензочутливості; розраховано важливу тензометричну характеристику $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_l \partial B}$ (де ε_l – поздовжня деформація;

B – індукція магнітного поля).

Об'єкт досліджень – деформаційний та магнітодеформаційні ефекти у коефіцієнті тензочутливості й магнітооптичному ефекті Керра в одно- та багатшарових плівках.

Предмет досліджень – структурно-фазовий стан, електрофізичні та магнітооптичні властивості плівок Co та плівкових систем Co/Cu, Co/Ag, Co/Au і [Fe/Pt]_n (n – число фрагментів, що змінювалось у межах (2–8)) при деформації або одночасній дії деформації і магнітного поля.

Методи досліджень – експериментальні методи: пошарова конденсація у вакуумі, просвічуюча електронна мікроскопія (ПЕМ) та електронографія, тензометрія, магнітооптичний ефект Керра (МОКЕ), магнітодеформаційні вимірювання; теоретичні методи: аналітичні методи для розробки та аналізу феноменологічної моделі, розробка програмного забезпечення для комп'ютерної обробки результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. Проведені в роботі комплексні дослідження тензо- та магнітодеформаційних ефектів в електрофізичних властивостях та МОКЕ в одно- та багатощарових плівках на основі Co, Cu (Ag або Au) та Fe і Pt дозволили одержати такі нові результати:

1. Уперше проведені експериментальні дослідження магнітодеформаційного ефекту в коефіцієнті тензочутливості одношарових плівок Co та плівкових систем Co/Cu і Co/Ag; за експериментальними результатами розраховані величини магнітного коефіцієнта тензочутливості і тензометричної характеристики.

2. На прикладі одношарових плівок Co встановлено, що при поздовжній деформації в області пластичності спостерігається збільшення коефіцієнта тензочутливості в магнітному полі ($\beta_{\gamma B} > 0$), а в області пружності – його зменшення ($\beta_{\gamma B} < 0$) порівняно з величиною коефіцієнта тензочутливості за відсутності магнітного поля.

3. Запропонована феноменологічна модель магнітодеформаційного ефекту для випадку двошарової плівкової системи типу «біпластина», в рамках якої проаналізовано можливі варіанти залежності коефіцієнта тензочутливості від магнітного поля.

4. Уперше проведені дослідження МДЕ в МОКЕ плівок Co та плівкових систем Co/Cu, Co/Ag, Co/Au і [Fe/Pt]_n. Встановлена залежність коерцитивної сили, індукції насичення, кута повороту Керра від величини прикладеної деформації, зокрема експериментально показано, що деформація приводить до зростання B_c для плівкових систем Co/Au та до зменшення для Co/Cu.

Практичне значення одержаних результатів. Наведені в роботі результати дослідження МДЕ є цінними з точки зору поглиблення розуміння фізичних процесів, що відбуваються у плівкових матеріалах при одночасній дії деформації та магнітного поля. Одержані нові наукові результати мають прикладну цінність із точки зору можливості подальшого застосування їх для розроблення (удосконалення) чутливих елементів багатofункціональних датчиків із одночасним контролем двох та більше величин, наприклад, деформації, переміщення, магнітного поля і т. п.

Фундаментальне значення одержаних результатів полягає у розширенні спектра відомих деформаційних ефектів, подальшому розвитку уявлень про взаємозв'язок між особливостями структурно-фазового стану, електрофізичними, деформаційними та магнітооптичними властивостями для різних типів плівкових систем. Розроблена феноменологічна модель дозволяє прогнозувати поведінку коефіцієнта тензочутливості при одночасній дії на зразок магнітного поля й деформації та розширює використання багатощарових плівкових систем в електронному приладобудуванні та сенсорній техніці як елементів мікросхем та сенсорів деформації й магнітного поля.

Особистий внесок здобувача полягав у самостійному пошуку й аналізі

літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень. Дисертант особисто отримувала зразки, досліджувала їх структурно-фазовий стан, магнітооптичні, деформаційні та магнітодеформаційні властивості в коефіцієнті тензочутливості та магнітооптичному ефекті Керра, проводила обробку результатів. Постановка задач дослідження, обговорення та узагальнення одержаних результатів проводилися спільно з науковим керівником д.ф.-м.н., проф. І. Ю. Проценком. В обговоренні результатів роботи брали участь д.ф.-м.н. Л. В. Одноворець, к.ф.-м.н. І. В. Чешко, к.ф.-м.н. О. П. Ткач. Вимірювання магнітооптичного ефекту проводилося в Інституті фізики Університету ім. Й. Гутенберга за консультацією проф. С. О. Непійка (м. Майнц, Німеччина).

Особисто автором підготовлений текст статті [3], окремі розділи статей [1, 2, 4–7], статті у працях конференцій [19] і тези доповідей [10–13, 17]. Основні наукові результати доповідалися особисто автором на наукових семінарах та конференціях.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати оприлюднені та обговорені на таких наукових конференціях: Міжнародній конференції «Фізичні явища в твердих тілах» (м. Харків, 2011, 2013 р.), XVI Міжнародному молодіжному форумі «Радиоелектроника и молодежь в XXI веке» (м. Харків, 2012 р.), Науково-технічній конференції «Фізика, Електроніка, Електротехніка, ФЕЕ-2012» (м. Суми, 2012–2014 рр.), Міжнародній конференції молодих учених «Low temperature physics» (м. Харків, 2012 р.), VI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (м. Запоріжжя, 2012 р.), Міжнародній практичній конференції «Nanotechnology and nanomaterials» (м. Буковель, 2013 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте» (м. Одеса, 2012 р.), Міжнародній конференції «Nanomaterials: Applications and Properties» (м. Алушта, 2012 р.).

Публікації. Наукові результати відображені в 19 публікаціях: 8 статтях у періодичних наукових журналах, зокрема у 6 фахових і 3 у виданнях, що індексуються БД Scopus, 3 статтях і 8 тезах доповідей у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 181 найменувань на 18 сторінках. Дисертацію викладено на 152 сторінках, із них 98 сторінок основного тексту; робота містить 72 рисунки і 19 таблиць, із них 26 рисунків та 12 таблиць на 30 окремих аркушах.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи,

відмічений зв'язок роботи із науковими програмами і темами, сформульовані мета й основні задачі дослідження, висвітлено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, наведена інформація про особистий внесок здобувача, апробацію одержаних результатів, структуру та зміст дисертаційної роботи.

У першому розділі «Магнітодеформаційний ефект опору і МОКЕ у плівкових матеріалах (літературний огляд)» наведений огляд літературних даних щодо накопичених результатів дослідження тензорезистивних, магнітних та магнітодеформаційних властивостей плівкових матеріалів на основі магнітних та немагнітних матеріалів.

У першому підрозділі проаналізовано та узагальнено відомі результати теоретичних та експериментальних досліджень тензорезистивних властивостей у металевих плівках. Встановлено, що на сьогодні накопичено значний обсяг даних, підтвердженням чого є досить велика кількість пристроїв, реалізованих на основі даного ефекту.

У другому підрозділі наведений огляд відомих досліджень щодо впливу магнітного поля на КТ. Встановлено, що при прикладенні зовнішнього магнітного поля спостерігаються збільшення значення γ_I для одношарових плівок Fe, Ni, Co ($B = 100$ мТл) та систем Ni/Ag ($B = 200$ мТл), Fe/Cr ($B = 100$ мТл); та зменшення γ_I для напівпровідникових плівок р-типу провідності ($B = 3$ Тл) і товстоплівкових аморфних сплавів на основі Fe ($B = 75\text{--}190$ мТл).

У третьому підрозділі розглянуто питання впливу деформації зразків на їх електрофізичні й магніторезистивні властивості. Встановлено, що розтяг (стиснення) зразків значній мірі впливає на значення магнітоопору (МО), гігантського магнітоопору (ГМО), коерцитивну силу, магнітну анізотропію, а також змінює магнітну доменну структуру плівки.

У четвертому підрозділі проаналізовано особливості магнітооптичних властивостей у магнітних (Co, Fe) та немагнітних (Cu, Ag, Au) матеріалах, вплив типу підкладки, температури відпалювання на вищезазначені властивості.

У другому розділі «Методика і техніка експерименту» описані методи одержання й дослідження МДЕ в КТ і МОКЕ плівкових зразків на основі Co, Cu (Ag або Au) та Fe і Pt, а також їх структурно-фазового стану.

Плівкові зразки одержувались методом термічного випаровування у високому та надвисокому вакуумі ($10^{-4}\text{--}10^{-7}$ Па). Товщина в процесі осадження контролювалася методом кварцового резонатора та методом оптичної інтерферометрії після конденсації.

Дослідження тензорезистивних та магнітодеформаційних властивостей проводилися в автоматичному режимі. Керування процесом відбувалося з комп'ютера за допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі LabVIEW. Це підвищило точність вимірювань опору й деформації, дозволило проводити необмежену кількість вимірювань.

Зразки поміщали між полюсами постійного магніту (напрямок магнітного поля перпендикулярний до площини зразка). Величина магнітного поля становила 30 мТл.

Вивчення магнітооптичних властивостей проводилося на установці для дослідження магнітооптичного ефекту Керра в меридиальній геометрії вимірювання (вектор намагніченості в площині зразка та паралельний площині падаючого світла). Методологія дослідження МДЕ в МОКЕ полягала у вимірюванні кута повороту площини поляризації падаючого світла при різних значеннях деформації зразка. Вимірювання проводились у двох геометріях: поперечній «*t*» (вектор магнітного поля лежить у площині зразка і перпендикулярний до деформації) та поздовжній «*l*» (напрямок магнітного поля і деформації паралельні). Плівки деформувалися за допомогою спеціального пристрою, що дозволив проводити розтяг зразків до 10 %. Максимальне значення магнітного поля становило 150 мТл.

Були проведені додаткові дослідження впливу магнітного поля на електрофізичні властивості (термічний коефіцієнт опору). Величина магнітного поля становила 45 мТл.

Як підкладки були використані пластини полістиролу із попередньо нанесеними контактними площадками (деформаційні дослідження) та пластини ситалу (електрофізичні та магнітооптичні дослідження).

Структурно-фазовий стан вивчався методами електронної мікроскопії та електроннографії (ПЕМ-125 К, Jeol JSM 6400).

Третій розділ «Магнітодеформаційний ефект у коефіцієнті тензочутливості у плівкових матеріалах» складається з трьох підрозділів.

У *першому підрозділі* наведені результати досліджень структурно-фазового стану плівкових систем на основі Co, Cu (Ag або Au) та Fe і Pt. Встановлено, що одношарові плівки Co у свіжосконденсованому стані мають ГЦП структуру за параметром ґратки, що співпадає з даними для масивних матеріалів.

Проведені електроннографічні дослідження свідчать, що у свіжосконденсованому стані у системах Co/Ag і Co/Au індивідуальність шарів зберігається, а у Co/Cu і Fe/Pt – утворюється твердий розчин.

Плівкова система Co/Cu втрачає індивідуальність шарів у процесі конденсації, на електроннограмах фіксуються кільця т.р. (Cu, Co), утвореного на основі ГЦК ґратки Cu. При цьому не всі атоми Co йдуть на утворення т.р., на електроннограмах фіксуються лінії, які є результатом відбиття від кристалографічної площини ГЦП-Co. На відміну від Co/Cu, плівкові системи Co/Ag та Co/Au мають обмежену взаємну розчинність атомів при проміжних температурах. У свіжосконденсованому стані – двофазні. Після термообробки до 700 К спостерігається зменшення параметра кристалічної решітки, що можна інтерпретувати як утворення обмеженого твердого розчину на основі ґраток ГЦК-Ag та ГЦК-Au відповідно із деяким

виділенням надлишкового ГЦП-Co.

Одношарові плівки на Fe і Pt мають кристалічну решітку, що відповідає масивним зразкам (ОЦК-Fe і ГЦК-Pt). Після відпалювання плівок Pt змін у структурно-фазовому стані, на відміну від плівок Fe, не спостерігається. Після термообробки на електронограмах від плівок Fe можуть з'являтися кільця та точкові рефлекси від Fe_3O_4 . Як відомо, початок процесу окиснення є величиною розмірною залежною, тому в нашій роботі підібрані такі товщини і температури відпалювання, при яких після термообробки утворення оксидної фази не спостерігається.

У плівковій системі Fe/Pt на стадії конденсації спостерігається утворення неупорядкованого твердого розчину на основі ГЦК ґратки Pt. Відпалювання до 800 К стимулює проходження рекристалізаційних процесів, заліковування дефектів та збільшення зерен.

У *другому підрозділі* наведені результати експериментальних досліджень тензорезистивного та магнітодеформаційного ефектів у плівкових структурах на основі феромагнітного Co та немагнітних Cu й Ag; описана феноменологічна модель МДЕ у КТ для двошарових плівкових систем.

Були проведені дослідження для двох областей деформації: пружної $\Delta\varepsilon_\ell = (0 - \varepsilon_{\ell\text{пер}}) \%$ та пластичної $\Delta\varepsilon_\ell = (\varepsilon_{\ell\text{пер}} - 2) \%$ ($\varepsilon_{\ell\text{пер}}$ – значення ε_ℓ , при яких відбувається перехід «пружна–пластична деформація»). Межа переходу «пружна–пластична деформація» була визначена шляхом встановлення перегину або зміни кута нахилу деформаційної залежності $\Delta R/R(0) = f(\varepsilon_\ell)$. Потрібно відмітити, що величина $\varepsilon_{\ell\text{пер}}$ розмірною залежна й індивідуальна для кожного матеріалу.

Аналізуючи експериментальні залежності $\Delta R/R(\varepsilon_\ell)$ для одношарових плівок Co, одержаних при $\Delta\varepsilon_\ell = (0-1) \%$ та $\Delta\varepsilon_\ell = (0-2) \%$ (рис. 1), встановлено, що в усіх випадках спостерігається відмінність I циклу деформації від наступних, причому всі подальші цикли практично повторюють один одного, що свідчить про завершення релаксаційних процесів у зразках уже на

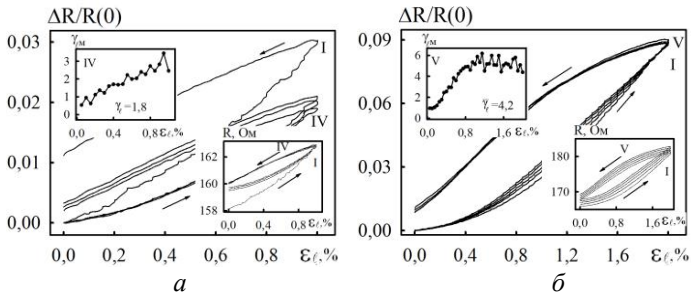


Рис. 1. Залежність $\Delta R/R(0)$ та R і γ_{lm} (на вставках) від ε_ℓ для VII деформаційного циклу для плівки Co(35)/Pt при $\Delta\varepsilon_\ell = (0-1) \%$ та $\Delta\varepsilon_\ell = (0-2) \%$

I деформаційному циклі. Зразки характеризуються невеликим значенням КТ близько одиниці (табл. 1).

Таблиця 1

Середнє значення γ_l для I-VII деформаційних циклів для одношарових плівок Co в інтервалі $\Delta\varepsilon_z=(0-1)$ %

№	Зразок	№						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
1.	Co (12)	1,7	1,4	1,2	1,2	1,2	1,1	1,05
2.	Co (17)	1,1	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
3.	Co (19)	1,9	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5
4.	Co (21)	2,5	1,9	1,7	1,8	1,6	1,5	1,5
5.	Co (35)	2,8	2,0	1,9	1,8	-	-	-

Необхідно відмітити, що КТ зростає зі збільшенням товщини, що суперечить класичній (фуксівській) розмірній залежності і свідчить про пластичну деформацію зразків.

Дослідження тензорезистивного ефекту плівок Co в області пружності (при деформації до 0,4 %) показали, що КТ має менші значення порівняно зі зразками, що деформувалися в області пластичності.

У процесі дослідження тензорезистивних властивостей одношарових плівок Ag в інтервалі деформації $\Delta\varepsilon_l = (0-1)$ % та $\Delta\varepsilon_l = (0-2)$ % встановлено, що значення коефіцієнта тензочутливості знаходиться в межах $\gamma_l = (1,1-3,5)$ од. для $\Delta\varepsilon_l = (0-1)$ % та $\gamma_l = (1,0-4,9)$ од. для $\Delta\varepsilon_l = (0-2)$ %. Спадний характер графіка $\gamma_l(d)$ (рис. 2) відповідає класичній розмірній залежності з пружним механізмом деформації зразків, що описується класичною теорією на основі моделі Маядаса і Шацкеса, а зростаючий – не є типовим, що можна

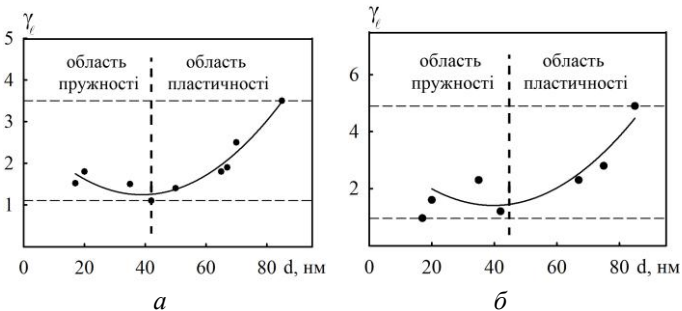


Рис. 2. Залежність середнього значення γ_l від товщини плівок Ag при деформації $\Delta\varepsilon_l = (0-1)$ % (а) та $\Delta\varepsilon_l = (0-2)$ % (б) для VII деформаційного циклу

пояснити проявом ефекту пластичності, локалізацією дефектів на межах зерен, що приводить до значного збільшення чутливості до деформації ($\Delta R/\Delta \varepsilon_l$) і відповідно до зростання КТ.

Крім одношарових плівок Co і Ag, були досліджені тензорезистивні властивості двошарових плівкових систем Co/Ag (рис. 3). Встановлено, що КТ має вищі значення порівняно з одношаровими плівками, наприклад, для Ag(35)/П $\gamma_l = 1,5$ при $\varepsilon_l = (0-1) \%$ та 2,3 при $\varepsilon_l = (0-2) \%$, для Co(35)/П $\gamma_l = 1,8$ при $\varepsilon_l = (0-1) \%$, 4,2 при $\varepsilon_l = (0-2) \%$, а для двошарової плівкової системи Ag(35)/Co(40)/П γ_l дорівнює 2,5 та 5,0 при деформації до 1% та до 2% відповідно. Зі збільшенням загальної товщини плівкової системи спостерігається зростання значення КТ, що пояснюється, як було розглянуто вище, пластичною деформацією зразків та зростанням внеску зерномежового механізму розсіювання електронів провідності у загальне значення опору.

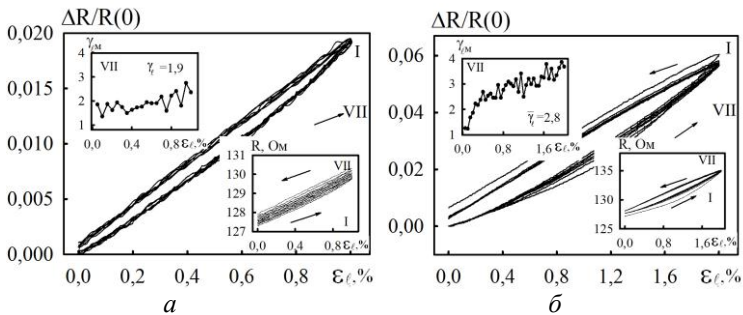


Рис. 3. Залежність $\Delta R/R(0)$ та R і γ_{lm} (на вставках) від ε_l для VII деформаційного циклу при $\Delta \varepsilon_l = (0-1) \%$ (а) та $\Delta \varepsilon_l = (0-2) \%$ (б) для плівок Ag(8)/Co(13)/П

Дослідження МДЕ у КТ одношарових плівок Co в області пружності та пластичності (рис. 4, 5) дозволили визначити вплив магнітного поля на КТ.

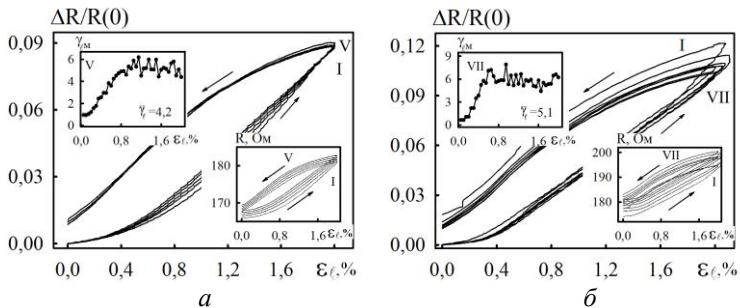


Рис. 4. Залежність $\Delta R/R(0)$ та R і γ_{lm} (на вставках) від ε_l без (а) та при дії магнітного поля (б) при $\Delta \varepsilon_l = (0-2) \%$ для плівки Co(35)/П

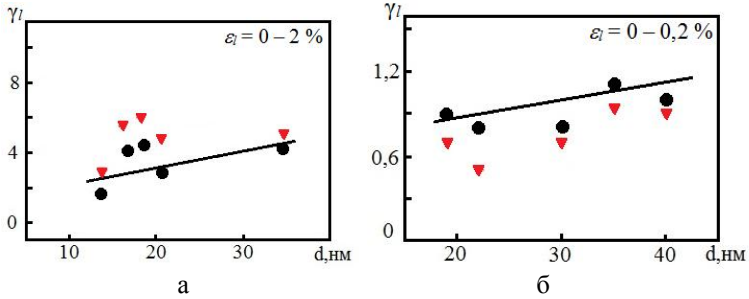


Рис.5. Розмірна залежність γ_l від товщини для плівок Co(d)/П без (●) та при дії магнітного поля ($B=30\text{мТл}$) (▼) при деформації $\Delta\epsilon_l = (0-2)\%$ (а) та $\Delta\epsilon_l = (0-0,2)\%$ (б). Лінія відповідає середньому значенню γ_l

Установлено, що у зв'язку з посиленням ефекту зерномежового розсіювання та чутливості до деформації в області пластичності значення γ_l мають більшу величину, ніж в області пружності. Середнє значення коефіцієнта тензочутливості в магнітному полі збільшується на 25 % (пластична деформація) та зменшується на 22 % (пружна деформація). Кількісно МДЕ був оцінений розраховувавши середнє значення магнітного коефіцієнта тензочутливості (МККТ) за такою формулою:

$$\beta_{\gamma_{lB}} = \frac{1}{\gamma_l(0)} \left(\frac{\Delta\gamma_l}{\Delta B} \right)_{\epsilon_l}, \quad (1)$$

де $\Delta\gamma_l = \gamma_l(B) - \gamma_l(0)$ – зміна КТ при внесенні зразка в магнітне поле; $\gamma_l(0)$ – значення поздовжнього КТ при $B = 0$; $\gamma_l(B)$ – значення поздовжнього КТ при $B = 30$ мТл; ΔB – зміна індукції прикладеного магнітного поля. Середнє значення МККТ становило $-7,4$ та $8,3$ Тл $^{-1}$ для областей пружної та пластичної деформації відповідно.

Дослідження МДЕ у двошарових плівкових системах на основі Co та Ag ($\Delta\epsilon_l = (0-2)\%$) (рис. 6) дозволили дійти висновку, що КТ системи зростає в зовнішньому магнітному полі, як і у випадку одношарових плівок Co в цьому ж самому інтервалі. Це обумовлено тим, що збільшення опору при деформації перекидає його зменшення при внесенні зразка в магнітне поле.

Проведені дослідження МДЕ системи Co/Cu ($\Delta\epsilon_l = (0-0,4)\%$) (рис.7). Встановлено, що МДЕ у цій системі проявляється краще, ніж в одношарових плівках Co, про що свідчить більше значення магнітного коефіцієнта тензочутливості 12 Тл $^{-1}$ ($-7,4$ Тл $^{-1}$ для Co(d)/П при $\Delta\epsilon_l = (0-0,2)\%$ та $-11,8$ Тл $^{-1}$ для Co(d)/П П при $\Delta\epsilon_l = (0-0,4)\%$).

Розроблена феноменологічна модель для двошарових плівкових систем. За основу було взято співвідношення для МДЕ у КТ (1).

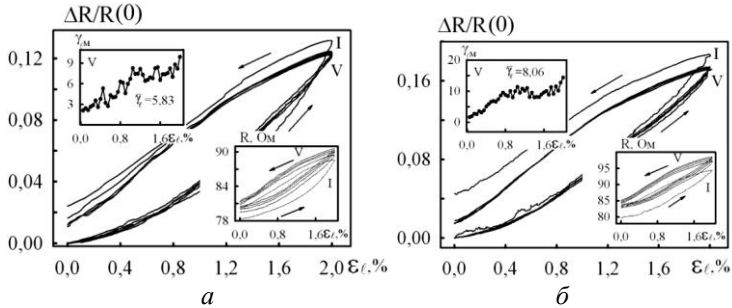


Рис. 6. Залежність $\Delta R/R(0)$, R та γ_{lm} (на вставках) від ε_f без (а) та при дії магнітного поля (б) для плівки $Ag(12)/Co(25)/\Pi$ при $\Delta\varepsilon_f = (0-2)\%$

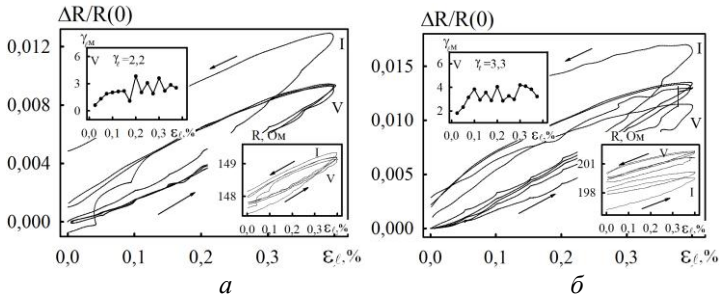


Рис. 7. Залежність $\Delta R/R(0)$, R та γ_{lm} (на вставках) від ε_f без (а) та при дії магнітного поля (б) для плівки $Co(20)/Cu(30)/\Pi$ при $\Delta\varepsilon_f = (0-0,4)\%$

Після підстановки в (1) співвідношення для КТ двошарових плівкових систем та диференціювання γ_l по B можна одержати таку формулу (при цьому членами, пов'язаними з магнітострикцією ($M_i^k = d\ln d_i/dB$), знехтували):

$$\beta_{\gamma B}^k = \beta_{\gamma 1B}^k \cdot \gamma_{11} + \beta_{\gamma 2B}^k \cdot \gamma_{12} - \frac{\gamma_{11} \rho_1 d_2 (\beta_{\gamma 1B} + \beta_{\rho B}) + \gamma_{12} \rho_2 d_1 (\beta_{\gamma 2B} + \beta_{\rho B})}{(\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1)} +$$

$$+ \frac{\beta_{\rho 1B} \rho_1 d_2 \mu_2 + \beta_{\rho 2B} \rho_2 d_1 \mu_1}{(\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1)} + \frac{(\beta_{\rho 1B} \rho_1 d_2 + \beta_{\rho 2B} \rho_2 d_1) (\gamma_{12} \rho_2 d_1 + \gamma_{11} \rho_1 d_2)}{(\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1)^2} -$$

$$- \frac{(\beta_{\rho 1B} \rho_1 d_2 + \beta_{\rho 2B} \rho_2 d_1) (\rho_1 d_2 \mu_2 + \rho_2 d_1 \mu_1)}{(\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1)^2}, \quad (2)$$

де, $\beta_{\rho B}$ – магнітний коефіцієнт опору для двошарових плівок, індекс k – відповідає поздовжній, поперечній або перпендикулярній геометрії вимірювання.

Для двох граничних випадків формулу (2) можна спрощено записати так:

$$1) d_2 \ll d_1, \beta_{\gamma_1 B}^k \cong \beta_{\gamma_{11} B}^k \gamma_{11} + \beta_{\rho_2 B}^k \mu_1;$$

$$2) d_2 \gg d_1, \beta_{\gamma_1 B}^k \cong \beta_{\gamma_{12} B}^k \gamma_{12} + \beta_{\rho_1 B}^k \mu_2.$$

У *третьому підрозділі* оцінено внесок поверхневого та зерномежового розсіювання в питомий опір і термічний коефіцієнт опору (ТКО) плівок Ag; проаналізовано вплив магнітного поля на електрофізичні властивості плівкових матеріалів. Відомо, що значення опору та питомого опору, обумовлене зерномежовим розсіюванням електронів (ρ_{gb}), визначається ступенем дисперсії кристалітів. Плівки Ag мають відносно великі розміри зерен (до 40 нм), а при відпалюванні збільшуються до 5–6 разів. Середнє значення ρ_{gb} становило $0,32 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, а опір, обумовлений поверхневим розсіюванням електронів (ρ_d) – $(0,37-4,1) \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Роль електронного розсіювання на поверхні зменшується з ростом товщини плівки, розсіювання на межах зерен дає головний внесок у величину питомого опору, що підтверджується зростаючим характером залежності ρ_{gb} / ρ_d . Магнітне поле незначно впливає на величину ТКО.

Четвертий розділ «Магнітодеформаційний ефект у МОКЕ у плівкових матеріалах» складається із трьох підрозділів.

У *першому підрозділі* наведені результати вивчення магнітних та магнітооптичних властивостей плівкових систем на основі Co, Cu (Ag або Au) та Fe і Pt та особливості МДЕ в МОКЕ у цих системах.

Для свіжосконденсованих плівок Co характерна прямокутної форми петля гістерезису з малою величиною B_c . Конденсація шару Cu на Co приводить до зменшення коерцитивної сили та залишкової намагніченості системи. Такі зміни можна пояснити наявністю діамагнітного матеріалу, зміною у фазовому стані системи (утворенням твердого розчину) за рахунок проходження процесів конденсаційно-стимульованої дифузії.

У плівкових системах Co/Ag та Co/Au при осадженні немагнітного шару на Co спостерігається зменшення вихідного сигналу МОКЕ, при цьому коерцитивність залишається практично незмінною. Осадження верхнього шару Co зменшує коерцитивність зразків і практично не впливає на величину залишкової намагніченості. У результаті термовідпалювання петлі гістерезису звужуються і стають більш пологими.

Якщо порівнювати двошарові плівки Fe(32)/Pt(d)/П та мультишари [Fe(32)/Pt(d)]_n/П, то збільшення товщини парамагнітного шару Pt або кількості фрагментів *n* у мультишарових структурах приводить до відчутного зменшення коерцитивної сили у зразках. Так, наприклад, у плівці Fe(32)/Pt(d)/П B_c зменшується із 33 мТл ($d \approx 3$ нм) до 26 мТл ($d \approx 15$ нм), а для [Fe(3)/Pt(3)]_n/П – із 38 мТл ($n=2$) до 30 мТл ($n=8$).

Дослідження МДЕ у МОКЕ показали, що петля гістерезису змінює вигляд зі зміною товщини плівок та у процесі деформації. Зокрема, із прямокутної стає більш пологою (рис. 8). Коерцитивна сила у здеформованих плівках Co/Au зростає, а для Co, Co/Cu, Fe/Pt – спадає. У процесі деформації густина магнітних доменів збільшується, вони роздрібнюються та витягуються вздовж прикладеного поля, що і призводить до зміни коерцитивної сили.

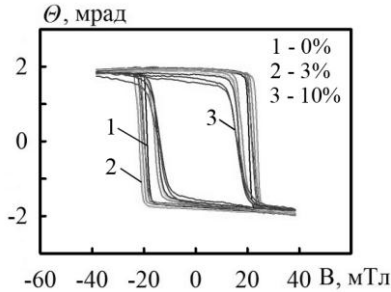


Рис. 8. Залежності МОКЕ-сигналу від прикладеного магнітного поля для Co(36)/П при різних значеннях ε_t

Крім того, встановлено, що значення кута повороту Керра зменшується у процесі деформації для плівок Co, Co/Au, Co/Cu (t - геометрія), Fe/Pt (l - геометрія) та зростає для Co/Ag, Fe/Pt (t - геометрія) (рис. 9).

Для плівок Fe/Pt значення коефіцієнта γ_t^{MOKE} зростає із збільшенням загальної концентрації атомів Fe, у той самий час величина $\gamma_t^{MOKE} = \frac{1}{\theta(0)} \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta\varepsilon} \right)$ (де $\theta(0)$ – кут повороту площини поляризації при деформації $\varepsilon_{t,i} = 0$; $\theta(\varepsilon_{t,i})$ – кут повороту площини поляризації при деякій деформації $\varepsilon_{t,i}$) не залежить від значення ε_t .

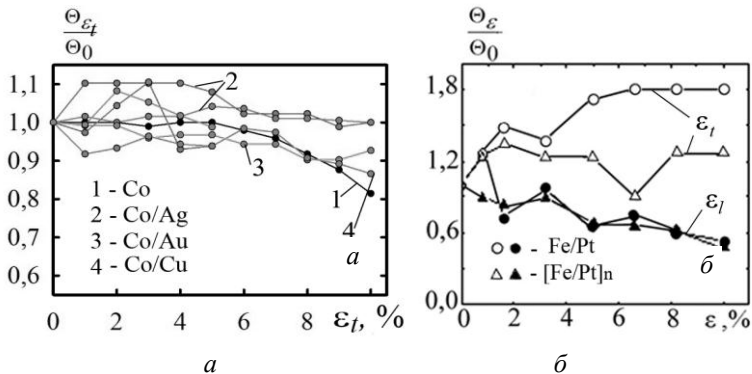


Рис. 9. Відношення кута повороту площини $\theta_{\varepsilon t}/\theta_0$ поляризації від деформації $\varepsilon_{t,i}$ для плівок Co та Co/Cu (Ag або Au) (а) й Fe/Pt (б)

Коефіцієнт γ_i^{MOKE} варіюється в межах від 8 од. (для Fe(32)/Pt(3)/П) до 2,5 од. (Fe(32)/Pt(10)/П) та від 3 од. (для Fe(3)/Pt(3)]₈/П) до 1,2 од. (для Fe(3)/Pt(10)]₈/П).

У *другому підрозділі* проведені узагальнення одержаних експериментальних результатів дослідження тензорезистивного та магнітодеформаційних ефектів у КТ та МОКЕ, розрахована величина $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_i \partial B}$, що характеризує ступінь впливу на

питомий опір одночасно двох факторів: деформації та магнітного поля (табл. 2).

Тензометрична характеристика визначається за методикою, запропонованою в роботі [1*], в якій для одношарової плівки одержано співвідношення:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_i \partial B} = \rho (\beta_{\gamma_{iB}} \cdot \gamma_i^R + \beta_B \cdot \gamma_i^P). \quad (3)$$

де, γ_i^R і γ_i^P – величина КТ, одержана на основі залежності $R(\varepsilon_i)$ або $\rho(\varepsilon_i)$ відповідно.

Продиференціювавши γ_i по B (вираз 1) та підставивши значення опору для плівкових систем типу «біпластина» $\rho_{1,2}$ чи твердий розчин $\rho_{m.p.}$, одержимо формули для МККТ та для другої похідної:

$$\frac{\partial^2 \rho_{1,2}}{\partial \varepsilon_i \partial B} = \rho_{1,2} (\beta_{\gamma_{iB}} \cdot \gamma_{1,2}^R + \overline{\beta_B} \cdot \gamma_{1,2}^P) \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \rho_{m.p.}}{\partial \varepsilon_i \partial B} = \rho_{m.p.} (\beta_{\gamma_{iB}} \cdot \gamma_{m.p.}^R + \overline{\beta_B} \cdot \gamma_{m.p.}^P) \quad (5)$$

де, $\overline{\beta_B}$ – середнє значення магнітного коефіцієнта опору ($\overline{\beta_B} = \frac{\beta_{B1}^P + \beta_{B2}^P}{2}$).

Узагальнені результати досліджень та розрахунків тензометричної характеристики наведені в табл. 2. Найбільшого значення величина $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_i \partial B}$

набуває в інтервалі пластичної деформації (при ε_i до 2 %) плівок Co, тобто чутливість величини питомого опору до магнітного поля й деформації є найбільшою щодо решти досліджуваних зразків. Порівняння тензометричних характеристик двошарових (або двокомпонентних) плівкових систем, розрахованих за формулами (3), (4) або (5), залежно від типу плівкової системи показало добре співпадання значень, із чого можна зробити висновок, що ключову роль відіграє загальна товщина плівкової системи, а не товщина окремих шарів або концентрація компонент.

У *третьому підрозділі* розглянуто прикладний аспект наших досліджень, що полягає у застосуванні плівкових немагнітних матеріалів (Ag та Au) не

Таблиця 2

Розрахунок тензометричної характеристики $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_i \partial V}$

№	Зразок (товщина, нм)	$\rho(0),$ 10^{-7} Ом·м	$\gamma_l(0)$	$\gamma_l(B)$	$\beta_{\gamma_{l, \text{всер.}}^k}$ Тл ⁻¹	$\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_i \partial V},$ Ом·(м·Тл) ⁻¹ (3)	$\frac{\partial^2 \rho}{\partial \varepsilon_i \partial V},$ Ом·(м·Тл) ⁻¹ (4 або 5)
пружна+пластична деформація $\Delta \varepsilon_l = (0-2) \%$							
1.	Co(14)	8,16	1,6	3	8,3	$2,28 \cdot 10^{-5}$	-
2.	Co(17)	4,71	4,1	5,7		$2,06 \cdot 10^{-5}$	-
3.	Co(21)	4,27	2,9	4,8		$1,54 \cdot 10^{-5}$	-
4.	Co(35)	2,17	4,2	5,1		$0,88 \cdot 10^{-5}$	-
пружна деформація $\Delta \varepsilon_l = (0-0,2) \%$							
1.	Co(19)	4,52	0,9	0,7	-7,4	$-4,17 \cdot 10^{-7}$	-
2.	Co(22)	3,57	0,8	0,5		$-1,23 \cdot 10^{-7}$	-
3.	Co(30)	4,5	0,8	0,7		$-9,75 \cdot 10^{-7}$	-
4.	Co(35)	2,4	1,1	1,0		$-11,2 \cdot 10^{-7}$	-
5.	Co(40)	2,12	1,0	0,9		$-8,64 \cdot 10^{-7}$	-
пружна деформація $\Delta \varepsilon_l = (0-0,4) \%$							
1.	Co(30)	4,85	1,4	1,1	-11,8	$-3,69 \cdot 10^{-6}$	-
2.	Co(40)	3,22	2,2	1,1		$-5,77 \cdot 10^{-6}$	-
пружна деформація $\Delta \varepsilon_l = (0-0,4) \%$							
1.	Co(30)/Cu(10)	6,44	1,3	1,9	12	$1,95 \cdot 10^{-5}$	$9,55 \cdot 10^{-5}$
2.	Co(30)/Cu(20)	2,76	2,2	3,3		$1,87 \cdot 10^{-6}$	$8,20 \cdot 10^{-6}$
3.	Co(30)/Cu(40)	0,55	1,6	2		$1,54 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$
4.	Co(30)/Cu(50)	0,62	2,7	3,3		$2,44 \cdot 10^{-6}$	$2,07 \cdot 10^{-6}$
пружна+пластична деформація $\Delta \varepsilon_l = (0-2) \%$							
1.	Co(50)/Ag(40)	0,21	8,2	8,7	2,1	$1,35 \cdot 10^{-6}$	$9,84 \cdot 10^{-7}$
2.	Co(25)/Ag(12)	0,32	5,8	8,1	13,2	$2,38 \cdot 10^{-6}$	$2,51 \cdot 10^{-6}$
3.	Co(25)/Ag(5)	1,42	2,5	3,6	14,7	$6,67 \cdot 10^{-6}$	$5,37 \cdot 10^{-6}$
4.	Co(20)/Ag(5)	2,92	2,4	3,3	12,5	$6,52 \cdot 10^{-6}$	$8,55 \cdot 10^{-6}$

лише як розділяючих шарів у спін-вентильних структурах та різного роду датчиках, а і як тест-об'єктів для емісійних мікроскопів. Мікрополя, що майже завжди наявні на поверхні досліджуваних зразків, деформують траєкторії електронів, які формують зображення у фотоемісійному електронному мікроскопі (ФЕЕМ). Це призводить до спотворення зображення та зниження роздільної здатності мікроскопа. Тест-об'єкти, у яких власні мікрополя зумовлені контактною різницею потенціалів, здатні

скомпенсувати вплив шкідливих полів спеціально створеним рельєфом поверхні зразка (тест-об'єкта). Найбільш придатною структурою для формування такого тест-об'єкта виявилася структура Au(0–500 нм)/Ag(330 нм)/Si, що формувалась у клиноподібному вигляді верхнього шару Au із градієнтом товщини вздовж довжини, висота якої змінювалась від 0 до h_{max} .

На деякій висоті h спостерігалася компенсація шкідливих полів, тобто контактна різниця потенціалів $\Delta\varphi = \varphi_{Au} - \varphi_{Ag} = const$ компенсується ефективним потенціалом, що визначається висотою рельєфу щілини. При зміні напруги на екстракторі $U_{екстр}$ відбувається зсув $\Delta\varphi$ уздовж щілини, тобто при зменшенні $U_{екстр}$ компенсація відбувається при більших товщинах плівки Au. Для полікристалічних Au і Ag середня зміна роботи виходу становить приблизно 0,25 eV, отже, компенсація шкідливих мікрополів настає на висоті 56; 71 та 100 нм при $U_{екстр}$ 9; 7 та 5 кВ відповідно.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведені дослідження взаємозв'язку між особливостями структурно-фазового стану та магнітодеформаційними ефектами в коефіцієнті тензочутливості, магнітоопорі та магнітооптичному ефекті Керра в області пружної та пластичної деформацій у плівкових матеріалах на основі феромагнітних та немагнітних металів.

Основні результати дисертації можна сформулювати так:

1. Уперше проведено дослідження магнітодеформаційного ефекту в коефіцієнті тензочутливості одно- та багатошарових плівок на основі феромагнітного Co та немагнітних Cu і Ag:

– в інтервалі пружної деформації для одношарових плівок Co відбувається зменшення коефіцієнта тензочутливості на 22 % у магнітному полі, порівняно з КТ за відсутності магнітного поля;

– в області пластичної деформації для плівок Co(d)/П спостерігається збільшення коефіцієнта тензочутливості на 25 % при дії магнітного поля, порівняно з КТ за відсутності магнітного поля;

– у плівкових системах Co/Ag та Co/Cu спостерігається зростання КТ у магнітному полі, зокрема для Co/Cu відносна зміна КТ становить 35,8 % при $\Delta\varepsilon_l = (0-0,4)$ %;

– установлено, що магнітодеформаційні властивості краще проявлять двошарові плівкові системи, порівняно з одношаровими плівками Co, оскільки мають вище значення МККТ, зокрема середнє значення МККТ для Co/Cu становить 12 Тл⁻¹ в області пружної деформації та 13,5 Тл⁻¹ для Co/Ag в області пластичної деформації, а для Co(d)/П -7,4 Тл⁻¹ та 8,3 Тл⁻¹ в області пружності й пластичності відповідно.

2. Уперше запропонована феноменологічна модель магніто-деформаційного ефекту для двошарових плівкових систем, що дозволяє встановити кореляцію між магнітним коефіцієнтом опору та коефіцієнтом тензочутливості.

3. Результати дослідження магнітооптичного ефекту Керра полягають у такому:

- утворення в системі Co/Cu твердого розчину на стадії конденсації компонент приводить до зменшення коерцитивної сили, порівняно з одношаровими плівками Co як компоненти системи Co/Cu. Значення B_c змінюється від 8,2 до 4,9 мТл при осадженні на шар Co шару Cu;

- збереження в системах Co/Ag та Co/Au індивідуальності шарів на стадії конденсації та утворення обмеженого твердого розчину після відпалювання до 700 К приводить до зменшення коерцитивної сили в середньому на 57 %;

- спостерігається зменшення коерцитивної сили у двошарових плівкових системах Fe(32)/Pt(d)/П та мультишарах $[\text{Fe}(32)/\text{Pt}(d)]_n/\text{П}$ при збільшенні товщини парамагнітного шару Pt або кількості фрагментів. Наприклад, для Fe(32)/Pt(d)/П B_c зменшується з 33 мТл ($d = 3$ нм) до 26 мТл ($d = 15$ нм), а для $[\text{Fe}(3)/\text{Pt}(3)]_n/\text{П}$ – із 38 мТл ($n = 2$) до 30 мТл ($n = 8$), що можна пояснити формуванням невпорядкованих твердих розчинів.

4. Уперше проведено дослідження магнітодеформаційного ефекту в МОКЕ при деформації до 10 %:

- встановлено, що деформація зразків приводить до зміни коерцитивності та кута повороту Керра; коерцитивна сила зростає у плівках на основі Co і Au та зменшується у Co і Cu у поперечній геометрії вимірювання, зокрема для Au(6)/Co(36)/П з 17,3 до 20,1 мТл, для Co(6)/Au(6)/Co(36)/П із 13,9 до 20,92 мТл та спадає для Co(25)/Cu(4)/Co(7)/Ag(3) із 23,19 до 15,2 мТл;

- спостерігається зменшення кута повороту Керра у деформованому стані порівняно з недеформованим, що може бути пояснено зменшенням (роздрібненням) доменів у процесі прикладення навантаження;

- у системі Fe/Pt значення B_c в t - геометрії вимірювання МОКЕ спадає, а в l -геометрії – зростає. На відміну від B_c величина залишкової намагніченості не змінюється зі збільшенням деформації, а значення індукції насичення спадає монотонно.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1*. Проценко С. І. Магнітодеформаційний ефект у тонких металевих плівках / С. І. Проценко // Ж. нано- та електрон. фіз. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 7 – 10.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Деформаційний, магніторезистивний і магнітодеформаційний ефекти у плівкових матеріалах на основі магнітних металів / **З. М. Макуха**, Д. В. Подуремне, К. В. Тищенко, І. Ю. Проценко // ФІП. – 2015. – Т. 13, № 3. – С. 356 – 362.
2. Магнітооптичні властивості гранульованих плівкових систем на основі Co та Cu, Ag і Au / Д. М. Кондрахова, **З. М. Макуха**, О. П. Ткач, І. Ю. Проценко, О. В. Кузовлев // ФІП. – 2014. – Т. 12, № 4. – С. 542 – 549.
3. Макуха З. М. Магнітодеформаційний ефект у двошарових плівках Co/Cu / **З. М. Макуха**, І. Ю. Проценко // ФІП. – 2014. – Т. 12, № 2. – С. 279 – 284.
4. Strain Effect on Magneto-optical and Magnetic Properties of Film System Based on Fe and Pt / I. V. Cheshko, **Z. M. Makukha**, L. V. Odnodvoretz, M. O. Shumakova, D. V. Velykodnyi, I. Yu. Protsenko // Universal J. Mater. Sci. – 2013. – V. 1, № 2. – P. 13 – 17.
5. Strain effects in film materials based on metals / **Z. M. Makukha**, L. V. Odnodvoretz, I. Yu. Protsenko, N. I. Shumakova // International J. Phys. Res. – 2013. – V. 1, № 2. – P. 55–59.
6. Тензорезистивні властивості тонкоплівкових систем на основі Ag і Co / І. М. Пазуха, **З. М. Макуха**, Ю. М. Шабельник, І. Ю. Проценко // Ж. наноелектрон. фіз. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 03020-1 – 03020-4.
7. Magneto-strain effect in double-layer film system / **Z. M. Makukha**, S. I. Protsenko, L.V. Odnodvoretz, I. Yu. Protsenko // J. Nano- Electron. Phys. – 2012. – V. 4, № 2. – P.02043-1 – 02043-3.

2. Наукові праці апробаційного характеру

8. Фазовий склад, магніторезистивні та електрофізичні властивості плівкових систем на основі Co і Ag та Fe і Ge / О. В. Власенко, **З. М. Макуха**, Ю. М. Шабельник, Л. В. Однодворець, І. Ю. Проценко // Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції [«Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»], (Запоріжжя, 19–21 вересня 2012 р.). – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – С. 323–324.
9. Дегтярьов Д. О. Тензорезистивні властивості плівкових систем на основі Ag та Co / Д. О. Дегтярьов, С. В. Пустовіт, **З. М. Макуха** // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету ЕЛІТ [«ФЕЕ-2012»], (Суми, 16–21 квітня 2012 р.). – Суми, 2012. – С. 101.

10. Makukha Z. M. Elastic strain properties of multilayer film systems based on Co and Ag / **Z. M. Makukha**, I. Yu. Protsenko // Book of abstracts of III International Conference of Young Scientists [«Low temperature physics»], (Kharkiv, 14–18 May 2012). – Kharkiv: ILTPE, 2012. – P. 187.

11. Макуха З. М. Тензорезистивні властивості плівок срібла / **З. М. Макуха** // Матеріали XV Міжнародного молодіжного форуму [«Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»], (Харків, 17–19 квітня 2012 р.), Харків: ХНУРЕ, 2012. – С. 115 – 116.

12. Бутурлім В. Б. Магнітодеформаційний ефект у плівкових системах на основі Co та Cu / В. Б. Бутурлім., **З. М. Макуха** // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету ЕлІТ [«ФЕЕ-2014»], (Суми, 21–26 квітня 2014 р.). – Суми, 2014. – С. 114.

13. Тищенко К. В. Особенности деформационной зависимости коэффициента тензочувствительности в двухслойных пленках / К. В. Тищенко, **З. М. Макуха**, И. Е. Проценко // Матеріали X Міжнародної конференції [«Фізичні явища в твердих тілах»], (Харків, 6–9 грудня 2011р.). – Харків, 2011. – С. 88.

14. Тензоефект у магнітооптичних властивостях плівкових систем Fe/Pt/Π та [Fe/Pt]₈/Π / Д. В. Великодний, І. В. Чешко, **З. М. Макуха**, М. О. Шумакова // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету ЕлІТ [«ФЕЕ–2013»], (Суми, 22–27 квітня 2013 р.). – Суми, 2013. – С. 100.

15. Проценко І. Ю. Деформаційні ефекти в магнітооптичному ефекті Керра в тонких металевих плівках / І. Ю. Проценко, **З. М. Макуха**, М. О. Шумакова // Матеріали XII Міжнародної конференції [«Фізичні явища в твердих тілах»], (Харків, 3–6 грудня 2013 р.). – Харків, 2013. – С. 63.

3. Праці, що додатково відображають наукові результати

16. Test object for emission electron microscope / S. V. Chernov, **Z. M. Makukha**, I. Y. Protsenko, S. A. Nepijko, H. J. Elmers, G. Schonhense // Appl. Phys A. – 2014. – V. 114, № 4. – P. 1383–1385.

17. Makukha Z. M. Microfield compensation in photoemission electron microscopy / **Z. M. Makukha**, S. V. Chernov, S. A. Nepijko, I. Yu. Protsenko // Book of abstracts practice conference [«Nanotechnology and nanomaterials»], (Bukovel, 25 August – 1 September, 2013). – Bukovel, Ukraine, 2013. – P. 91.

18. Тензо- и магниторезистивные свойства чувствительных элементов датчиков на основе пленочных систем Ag/Co и Ni_xFe_{1-x} / **З. Н. Макуха**, О. В. Сынашенко, Я. Н. Литвиненко, Ю. М. Шабельник, И. Е. Проценко // Матеріали Международной научно-практической конференции [«Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и

транспорте 2012»] (Одесса, 19–30 июня 2012 г.). – Одесса, 2012. – С. 64–75.

19. Synashenko O. V. The influence of electrons scattering at grain boundary and at surface on resistivity and thermal coefficient of resistance of nanocrystalline silver films / O.V. Synashenko, **Z. M. Makukha**, I. Yu. Protsenko // Procc. Conf. [«Nanomaterials: Application and properties»], (Alushta, 17–22 September. 2012). – Sumy, 2012. – V.1, № 2, P. 02NFC22 – 02NFC26.

АНОТАЦІЯ

Макуха З. М. Магнітодеформаційний ефект у плівкових матеріалах на основі феромагнітних і немагнітних металів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2016.

Дисертацію присвячено комплексному дослідженню структурно-фазового стану, тензорезистивних та магнітодеформаційних властивостей у коефіцієнті тензочутливості та МОКЕ плівок на основі феромагнітних (Co, Fe) і немагнітних (Cu, Ag, Au, Pt) металів.

Установлено, що в магнітному полі спостерігається тенденція як до зростання, так і до спадання КТ залежно від інтервалу деформації й типу досліджуваної плівки, порівняно з КТ при деформації за відсутності магнітного поля. Для одношарових плівок Co, здеформованих в області пластичності, КТ зростає на 25 %, а в області пружності – зменшується на 22 %. Двошарові плівкові системи Co/Cu ($\Delta\varepsilon_l = (0-0,4) \%$) та Co/Ag ($\Delta\varepsilon_l = (0-2) \%$) характеризуються додатним магнітодеформаційним ефектом.

Проведено дослідження магнітодеформаційного ефекту в МОКЕ. Встановлено, що деформація зразків призводить до зміни коерцитивності й кута повороту Керра. Зокрема, у поперечній геометрії вимірювання коерцитивна сила зростає у плівках Co/Au і зменшується у плівках Co, Co/Cu, Fe/Pt

Запропоновано феноменологічну модель магнітодеформаційного ефекту в коефіцієнті тензочутливості для двошарових плівкових систем, що дозволила розрахувати величину тензометричної характеристики.

Ключові слова: магнітодеформаційний ефект, коефіцієнт тензочутливості, тензометрична характеристика, МОКЕ, коерцитивна сила.

АННОТАЦИЯ

Макуха З. Н. Магнитодеформационный эффект в пленочных материалах на основе ферромагнитных и немагнитных металлов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2016.

Диссертация посвящена комплексному исследованию структурно-фазового состояния, тензорезистивных и магнитодеформационных свойств в коэффициенте тензочувствительности и МОКЭ пленок на основе ферромагнитных (Co, Fe) и немагнитных (Cu, Ag, Au, Pt) металлов.

Установлено, что в магнитном поле наблюдается тенденция как к возрастанию, так и к уменьшению КТ в зависимости от интервала деформации образцов и типа исследованной пленки по сравнению с КТ при деформации при отсутствии магнитного поля. Для однослойных пленок Co, сдеформированных в области пластичности, величина КТ возрастает на 25 %, а в области упругости – уменьшается на 22 %. Среднее значение магнитного коэффициента тензочувствительности в упругом интервале деформации $\beta_{\gamma, \text{всп.}}^k = -7,4 \text{ Тл}^{-1}$, а в пластическом - $\beta_{\gamma, \text{всп.}}^k = 8,3 \text{ Тл}^{-1}$.

Двухслойные пленочные системы Co/Cu ($\Delta\varepsilon_l = (0-0,4) \%$) и Co/Ag ($\Delta\varepsilon_l = (0-2) \%$) характеризуются положительным магнитодеформационным эффектом. Магнитодеформационные свойства в двухслойных пленках проявляются лучше, чем в однослойных, о чем можно судить из величины среднего значения МККТ, которая для системы Co/Cu равна 12 Тл^{-1} , а для системы Co/Ag – $13,5 \text{ Тл}^{-1}$. Кроме того, следует отметить, что в области пластичности с ростом толщины образцов наблюдается увеличение значения коэффициента тензочувствительности в процессе продольной деформации, что связано с усилением зернограничного рассеивания электронов и увеличением чувствительности к деформации.

Проведены исследования магнитодеформационного эффекта в МОКЭ. Установлено, что деформация образцов приводит к изменению коэрцитивной силы и угла поворота Керра. В частности, в поперечной геометрии измерения коэрцитивная сила увеличивается для пленок Co/Au и уменьшается для пленок Co, Co/Cu, Fe/Pt. Деформация образцов приводит к уменьшению угла поворота Керра, что объясняется уменьшением (дроблением) доменов в процессе приложения растягивающей деформации.

Предложено феноменологическую модель магнитодеформационного эффекта в коэффициенте тензочувствительности для двухслойных пленочных систем, в рамках которой в общем виде проанализирована зависимость коэффициента тензочувствительности от величины магнитного поля. Произведен расчёт тензометрической характеристики, по величине

которой можно судить о влиянии на удельное сопротивление одновременно двух факторов: деформации и магнитного.

Были исследованы однослойные пленки и двухслойные пленочные системы типа «бипластина» или твердый раствор. Установлено, что основную роль играет общая толщина пленочной системы, а не толщина отдельных слоев системы или концентрация атомов компонент.

Ключевые слова: магнитодеформационный эффект, коэффициент тензочувствительности, тензометрическая характеристика, МОКЭ, коэрцитивная сила.

ABSTRACT

Makukha Z. M. Magnetostrain effect in films based on ferromagnetic and nonmagnetic metals. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D) in Physics and Mathematics on specialty 01.04.07 – Solid State Physics. – Sumy State University, Sumy, 2016.

The thesis is devoted to complex research of phase and structural state, strain and magnetostrain properties in strain coefficient and MOKE of films based on ferromagnetic (Co, Fe) and nonmagnetic (Cu, Ag, Au, Pt) metals.

It was found, that in magnetic field the tendency to increase or decrease strain coefficient is observed as compared with strain coefficient measured in conditions of a magnetic field absence. It is depend on strain interval and the type of studying film. For single-layer films the strain coefficient increases to 25 % in the plastic range and decreases to 22 % in the elastic range. Two-layers films system Co/Cu ($\Delta\varepsilon_l = (0-0,4) \%$) and Co/Ag ($\Delta\varepsilon_l = (0-2) \%$) are characterized by a positive magnetostrain effect.

The research of magnetostrain effect in MOKE was carried out. It was found, that the deformation of the samples causes a change in coercivity and Kerr rotation angle. In particular, in transverse geometry measurement the coercive force is increasing in the films Co/Au. The coercive force is decreasing in the films Co, Co/Cu and Fe/Pt.

A phenomenological model magnetostrain effect in support for bilayer film systems that allowed to calculate the value of gauge characteristics.

Key words: magnetostrain effect, strain coefficient, gauge characteristic, MOKE, coercive force.

Підписано до друку 27.04.2016р.
Формат 60х90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 371.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.