

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ТКАЧ ОЛЕНА ПЕТРІВНА

УДК 539.216.2; 621.799.14; 537.622

**ПРОЦЕСИ ФАЗОУТВОРЕННЯ, ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА
ГАЛЬВАНОМАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ
ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ Pd/Fe**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2012

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук, доцент
Однодворець Лариса Валентинівна,
Сумський державний університет,
доцент кафедри прикладної фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Татаренко Валентин Андрійович,
Інститут металофізики імені Г. В. Курдюмова
НАН України (м. Київ),
в.о. заступника директора з наукової роботи;

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 в
конструкційних матеріалах.

Захист відбудеться « 11 » травня 2012 р. о 14⁰⁰ 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 ознайомитися у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розіслано « 10 » квітня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. О. Журба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток магнітоелектроніки і сенсорного приладобудування тісно пов'язаний із пошуком нових функціональних матеріалів у вигляді магнітонеоднорідних багатошарових плівок, мультишарів та гранульованих сплавів. Плівкові системи на основі феромагнітних (Fe, Co) і парамагнітних (Pd, Pt) шарів – це цікаві об'єкти з точки зору їх практичного використання для створення носіїв інформації з високою щільністю магнітного запису, елементів магніто-оптичних систем та спінової електроніки. При формуванні таких приладових систем особлива увага приділяється стабільності робочих характеристик під дією різних фізичних полів (температури, деформації та магнітного поля). Оскільки в багатошарових плівках і мультишарах суттєву роль відіграють розмірні ефекти, то змінюючи кількість фрагментів і товщину окремих шарів, можна отримувати плівкові матеріали з наперед заданими електричними і магнітними параметрами. Особливості фізичних властивостей систем Pd/Fe обумовлені також тим фактом, що Pd, будучи парамагнітним елементом, за наявності феромагнетика (наприклад, атомів Fe) проявляє феромагнітні властивості.

На сьогодні отримана значна інформація про структурні та магнітні властивості багатошарових плівкових матеріалів на основі Pd і Fe, у той час як залишаються невивченими питання про можливість спостереження в таких плівкових системах розмірних ефектів щодо електрофізичних (питомий опір, термічний коефіцієнт опору (ТКО), коефіцієнт тензочутливості (КТ)) та гальваномагнітних (магнітоопір (МО), анізотропний магнітоопір (АМО), гігантський магнітоопір (ГМО), магніто-оптичний ефект Керра (МОКЕ) і стала Холла (СХ)) властивостей. Мова йде про дослідження взаємного зв'язку між фазовим складом та ТКО, КТ, МО і СХ багатошарових нанорозмірних плівкових систем Pd/Fe, отриманих методом пошарової конденсації і термовідпалених у вакуумі в інтервалі температур 300 – 900 К. Вищезазначене свідчить про актуальність теми роботи та доцільність комплексного дослідження процесів фазоутворення, електрофізичних і гальваномагнітних властивостей багатошарових плівкових систем Pd/Fe.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету в рамках держбюджетних тем № 0106U001942 «Формування кристалічної структури і електрофізичних властивостей плівкових матеріалів на основі багатошарових металевих наносистем» (2006 – 2008 рр.), № 0109U001387 «Фазовий склад, електро- і магніто-резистивні властивості плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів» (2009 – 2011 рр.), № 0111U006336 «Електрофізичні властивості багатокомпонентних плівок на основі Fe і Pd, Ag, Au та Ge» (2011 р.) та міжнародного проекту науково-технічного співробітництва № 0109U004806 «Кристалічна структура, електрофізичні і магніто-резистивні властивості нанорозмірних плівкових систем на основі Fe і Pt та Fe і Pd» між Сумським

державним університетом і Інститутом фізики при Університеті ім. Й. Гуттенберга (2009 – 2010 рр.). Здобувач брала участь у проведенні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягала у проведенні комплексних досліджень електрофізичних і гальваномагнітних властивостей, встановленні умов формування неупорядкованої і упорядкованої фаз у плівкових матеріалах, сформованих на основі двошарових фрагментів Pd/Fe, які мали різну (багатошарові плівки) та однакову (мультишари) товщину, в одному технологічному циклі методом пошарової конденсації з наступною термообробкою.

Відповідно до поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- вивчення фазового складу та умов формування (вакуумні умови, товщина фрагментів і окремих шарів, температура відпалювання та ін.) неупорядкованої ГЦК-PdFe і упорядкованої ГЦТ-PdFe фази в багатошарових плівкових системах;
- встановлення взаємозв'язку між фазовим складом та електрофізичними і гальваномагнітними властивостями;
- дослідження гальваномагнітних (МО, МОКЕ і ефект Холла) властивостей багатошарових плівкових систем і мультишарів Pd/Fe;
- здійснення апробації теоретичної моделі Тельє і Тоссе для магнітоопору плівок Pd і Fe з урахуванням поверхневого і зерномежового розсіювання електронів;
- експериментальне вивчення залежностей питомого опору, ТКО і МО мультишарів Pd/Fe від товщини, концентрації та величини магнітної індукції;
- дослідження ефекту Холла та встановлення залежності СХ від кількості фрагментів системи, товщини проміжного шару Pd і температури відпалювання.

Об'єкт дослідження – процеси фазоутворення та вплив температури, деформації і магнітного поля на електрофізичні і гальваномагнітні властивості нанорозмірних багатошарових плівкових систем.

Предмет дослідження – фазовий склад, електрофізичні та гальваномагнітні властивості багатошарових плівок і мультишарів Pd/Fe.

Методи дослідження. Формування плівкових систем методом пошарової вакуумної конденсації металів із подальшою термообробкою; резистивний метод вимірювання опору зразків; методи просвічуючої електронної і атомно-силової мікроскопії (АСМ), електроннографії, рентгенографії та енергодисперсійного рентгенівського аналізу; метод вторинно-іонної мас-спектрометрії (ВІМС); магніторезистивні вимірювання при паралельній, перпендикулярній і поперечній геометріях; МОКЕ; чотириточковий метод вимірювання холлівської різниці потенціалів.

Наукова новизна одержаних результатів. Проведені в роботі комплексні дослідження процесів фазоутворення, електрофізичних і гальваномагнітних властивостей багатошарових плівкових систем на

основі Pd і Fe дозволили отримати такі нові результати:

1. Встановлено, що в плівкових системах на основі Pd і Fe відбувається часткове структурне упорядкування ГЦК-PdFe фази і зменшення температури фазового переходу ГЦК-PdFe \rightarrow ГЦТ-PdFe, у порівнянні з масивними зразками ($T_0 = 1060$ К) приблизно на 300 К (для мультишарів) та 200 К (для двошарових зразків), в результаті конденсаційно-стимульованої дифузії при пошаровому осадженні Pd і Fe.
2. Уперше показано, що формування упорядкованої фази ГЦТ-PdFe в мультишарах Pd/Fe приводить до збільшення величини ТКО (до 6 разів) і МО (в 2 – 5 разів) у порівнянні з ГЦК-PdFe фазою.
3. Отримано, що додатковий шар Cu, ефективна товщина якого не перевищує 10% від загальної товщини мультишарів $[Cu/Pd/Fe]_n/P$, приводить до збільшення величини МО в 2,8 – 3,0 рази (свіжосконденсовані зразки) і в 1,1 – 2,6 рази (відпалені до $T = 780$ К), що пов'язано з утворенням гранул Fe в плівці Cu.
4. Уперше встановлено, що величина сталої Холла для мультишарів Pd/Fe залежить від кількості фрагментів (загальної товщини), товщини шару Pd та інтервалу відпалювання плівкових систем і монотонно зменшується від $5,5 \cdot 10^{-9}$ до $3,7 \cdot 10^{-9}$ м³/Кл при збільшенні загальної товщини системи від 10 до 40 нм.
5. Уперше на прикладі одношарових плівок Pd і Fe як компонент мультишарів здійснена апробація класичної теоретичної моделі Тельє і Тоссе для поздовжнього магнітоопору з урахуванням поперечного і зерномежового розсіювання електронів.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані розмірні залежності та результати апробації теоретичної моделі Тельє і Тоссе для магнітоопору одношарових плівок дають можливість прогнозування гальваномагнітних властивостей мультишарів, що може бути використане в галузі сенсорної техніки для розробки чутливих елементів багатофункціональних сенсорів магнітного поля, температури і деформації. Використаний у роботі метод пошарової конденсації з наступною термообробкою може бути застосований при отриманні плівкових сплавів з неупорядкованою або упорядкованою структурою в системах феромагнетик / благородний метал. Результати проведених досліджень поглиблюють розуміння фізичних процесів у плівкових матеріалах в умовах фазоутворення, впливу температури, деформації і магнітного поля на їх електрофізичні і гальваномагнітні властивості та були впроваджені в навчальний процес Сумського державного університету при викладанні дисципліни «Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні».

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних джерел; автором особисто були отримані зразки, проведені дослідження електрофізичних і гальваномагнітних властивостей плівок, електроннографічні, рентгенографічні та мікроскопічні дослідження, обробка, розрахунок і аналіз отриманих результатів. Постановку задач досліджень і

узагальнення експериментальних результатів проведено спільно з науковим керівником доц. Олександром Л. В. В обговоренні результатів досліджень брали участь проф. Проценко І. Ю. і проф. Чорноус А. М. При консультаціях проф. Маршалек М. (Інститут ядерної фізики ПАН, м. Краків) проведені вимірювання ефекту Холла в мультишарах і дослідження методом АСМ. Особисто автором підготовлені статті [3, 7], тези доповідей [10, 12, 13, 18] і окремі розділи статей [1, 2, 4 - 6, 9]. Матеріали робіт [8, 11, 14 - 17, 19 - 22] обговорювалися разом із співавторами. Основні наукові результати доповідалися особисто автором на наукових конференціях.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: 76 Jahrestagung der Deutsche Physikalische Gesellschaft und DPG-Frühjahrstagung, (Берлін, 2012 р.); III, IV, V Міжнародних конференціях «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур» (Харків, 2009, 2010, 2011 рр.); XIII Міжнародній конференції «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем» (Івано-Франківськ, 2011 р.); Всеукраїнській конференції молодих вчених «Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології (СММТ-2008)» (Київ, 2008 р.); International Conference «Functional Materials ICFM' 2009» (Сімферополь, 2009 р.); III Международной школе-семинаре молодых ученых «Рост кристаллов» (Харків, 2009 р.); International workshop «Magnetic phenomena in micro- and nano- structures» (Донецьк, 2010 р.); II Науковій міжнародній конференції «Сучасні проблеми конденсованого стану» (Київ, 2010 р.); X Міжнародній конференції «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, 2011 р.); XLVI Zakopane School of Physics International Symposium (Краків, Польща, 2011 р.); Міжнародних конференціях студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЄВРИКА» (Львів, 2009, 2011 рр.); Науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету ЕлІТ (Суми, 2010 р.).

Публікації. Результати дисертації відображені у 22 публікаціях: 7 статтях у періодичних фахових наукових виданнях, 3 статтях у матеріалах конференцій, 12 тезах доповідей на наукових конференціях.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Вона викладена на 158 сторінках, із них 88 сторінок основного тексту, 67 рисунків і 14 таблиць, в тому числі 52 рисунки і 8 таблиць на окремих аркушах. Список використаних джерел налічує 196 найменувань на 21 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні задачі досліджень, визначені новизна і практичне значення роботи, наведені відомості про апробацію отриманих результатів, зазначені методи досліджень, особистий внесок здобувача і структура роботи.

У першому розділі „Фазовий склад і магніторезистивні властивості плівок на основі Pd і Fe (літературний огляд)” проаналізовано питання стосовно фазового складу двокомпонентних матеріалів на основі Pd і Fe, які мають необмежену розчинність у рідкому стані, а при охолодженні кристалізуються з утворенням неупорядкованого твердого розчину.

Кристалічна решітка неупорядкованої ГЦК-PdFe та упорядкованої ГЦТ-PdFe ($L1_0$) структури схематично зображені на рис. 1. Огляд публікацій з питань кристалічної структури і фазового складу систем на основі Pd і Fe показує, що формування упорядкованої фази у масивних зразках відбувається при концентрації паладію $c_{Pd} = 48 - 60$ ат.% та $T = 1060$ К.

Теоретична модель Тельє і Тоссе для МО одношарових металевих плівок дозволяє більш коректно врахувати процеси не тільки поверхневого, але й зерномежового розсіювання електронів. Під дією зовнішнього магнітного поля відбувається зміна величини середньої довжини вільного пробігу (СДВП) і коефіцієнтів дзеркальності та проходження межі зерна.

Проведений огляд літературних даних щодо гальваномагнітних властивостей багатошарових плівкових систем вказує на те, що вони залежать від ряду факторів: умов осадження, кількості та товщини окремих шарів системи. Характер розмірної і температурної залежностей СХ визначається зонною структурою матеріалу, механізмами розсіювання електронів провідності на магнітних моментах і процесами розсіювання, пов'язаними із спин-орбітальною взаємодією. У багатошарових плівках порівняно з одношаровими з'являються додаткові механізми розсіювання носіїв заряду на межі поділу окремих шарів або магнітних інтерфейсах.

У другому розділі „Методика проведення експериментальних досліджень” сформульована мета дисертаційної роботи, задачі досліджень, обґрунтовано вибір металів для формування плівкових систем, описані методи одержання зразків, дослідження процесів фазоутворення, електрофізичних і гальваномагнітних властивостей багатошарових плівок і мультишарів на основі Pd і Fe.

Плівкові системи Pd/Fe були отримані методом термічного випарування шляхом пошарової конденсації з використанням надвисоковакуумного і високовакуумного обладнання (тиск залишкової атмосфери $10^{-7} - 10^{-5}$ Па). Зразки формувались на основі двошарових фрагментів Pd/Fe, які мали різну товщину у багатошарових плівкових системах загального типу та однакову товщину в мультишарах – періодичних плівкових системах. Необхідно вказати, що у зв'язку з високою дифузійною рухливістю атомів, спричиненою конденсаційно-стимульованою дифузією і наперед заданими нами малими

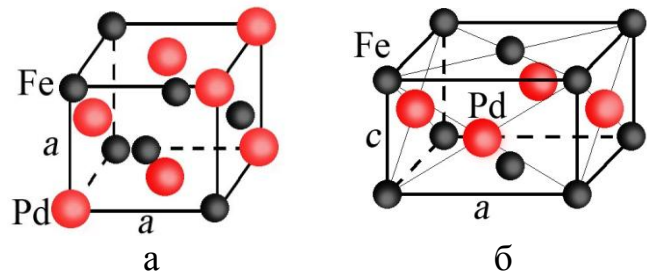


Рис. 1. Кристалічні решітки неупорядкованої ГЦК (а) та упорядкованої ГЦТ (б) фаз сплаву FePd

товщинами окремих шарів, у зразках в процесі конденсації формується твердий розчин і відбувається розмиття структурних інтерфейсів. Таким чином, використовуючи таку методику, вдається отримувати твердий розчин по всій товщині зразка у вигляді неупорядкованої ГЦК-PdFe і упорядкованої ГЦТ-PdFe структур.

Для дослідження процесів фазоутворення і кристалічної структури використовувалися методи електронної мікроскопії і дифракції швидких електронів (ПЕМ-125 К) та рентгенографічного аналізу (рентгенівський дифрактометр PANalytical X'Pert Powder). Дифузійні процеси були вивчені методом ВМС (прилад МС-7201М). Для визначення концентрації атомів плівкових систем застосовувався метод енергодисперсійного спектрального аналізу; вивчення топології поверхні зразків здійснювалося методом АСМ.

Розрахунок ТКО (β) і коефіцієнта поздовжньої тензочутливості (γ) здійснювався на основі температурних залежностей питомого опору (ρ) і деформаційних залежностей опору в інтервалі пружної деформації ($\Delta\varepsilon_l = 0 - 1\%$) впродовж п'яти деформаційних циклів за схемою «навантаження \leftrightarrow зняття навантаження», відповідно. Дослідження магніторезистивних властивостей проводилося в трьох геометріях: перпендикулярній ($B \perp I, II$), паралельній ($B // I, II$) та поперечній ($I \perp B // II$), де B – індукція магнітного поля; I – електричний струм і II – підкладка. Для розрахунку магнітоопору використовувалось співвідношення

$$MO = \frac{R_B - R_0}{R_0} = \frac{\Delta R}{R_0},$$

де R_B та R_0 – опір зразка у зовнішньому магнітному полі та при його відсутності.

Вивчення магніто-оптичних властивостей мультишарів $[Pd/Fe]_n$ проведено методом МОКЕ. Ефект Холла було досліджено за чотириточковою схемою з використанням методики Ван-дер-Пау, яка дозволяє вимірювати величину питомого опору та СХ (R_H) в зразках довільної геометричної форми.

Третій розділ „Процеси фазоутворення і електрофізичні властивості двошарових плівкових систем і мультишарів на основі Pd і Fe” складається з чотирьох підрозділів.

У першому підрозділі наведені результати досліджень процесів фазоутворення в плівкових зразках, сформованих на основі Pd і Fe у вигляді дво- і багатошарових плівок або мультишарів, при пошаровій конденсації металів та термообробці в інтервалі температур $\Delta T = 300 - 900$ К.

Унаслідок конденсаційно-стимульованої дифузії, яка сприяє протіканню твердофазної реакції, в плівках при пошаровій конденсації відбувається формування неупорядкованої ГЦК-PdFe фази на основі твердого розчину і зменшення температури фазового переходу ГЦК-PdFe \rightarrow ГЦТ-PdFe у порівнянні з масивними зразками приблизно на 300 К (для мультишарів) та на 200 К (для двошарових зразків). Таке зменшення можна пояснити більш інтенсивними дифузійними процесами в мультишарах, в яких товщина

окремих шарів має менше значення у порівнянні з двошаровими системами. Ілюстрація фазового переходу представлена на рис. 2 і в табл. 1.

Значення параметра кристалічної решітки неупорядкованої фази залежить

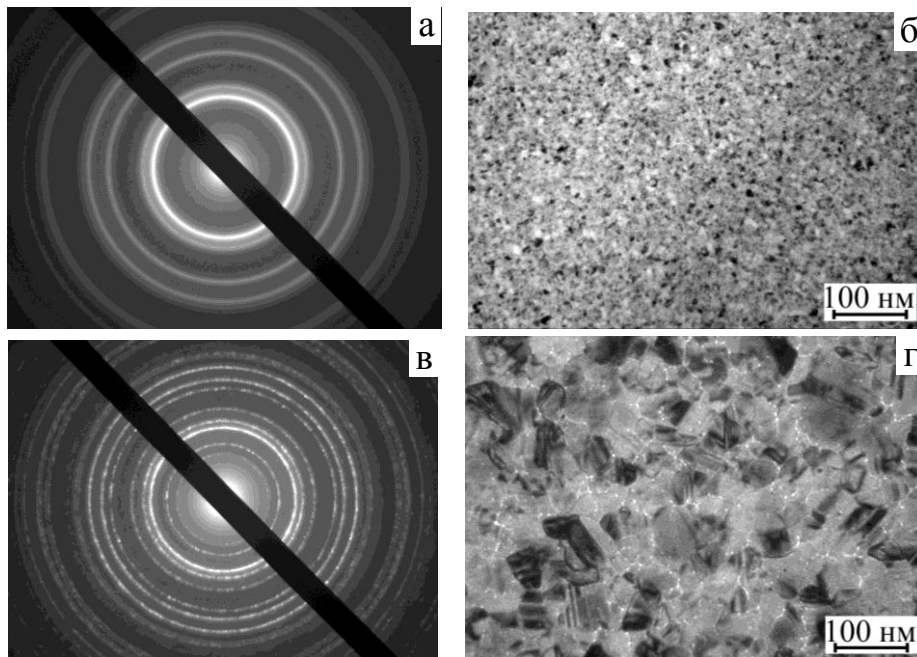


Рис. 2. Дифракційні картини і мікроструктура мультишару $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_5/P$, отриманого при 300 К (а, б) та відпаленого до 780 К (в, г)

Таблиця 1

Розшифрування електронограм від мультишару $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_5/P$

№ пор.	$T_B = 300\text{ K}$					$T_B = 780\text{ K}$					
	$I, \text{ в.о.}$	$d_{hkl}, \text{ нм}$	hkl	фаза	$a, \text{ нм}$	$I, \text{ в.о.}$	$d_{hkl}, \text{ нм}$	hkl	фаза	$a, \text{ нм}$	$c, \text{ нм}$
1	С.	0,224	111	ГЦК-PdFe	0,388	сер.	0,366	001	L1 ₀ -FePd		0,366
2	сер.	0,194	200	-«-	0,388	сер.	0,275	110	-«-	0,388	
3	сер.	0,137	220	-«-	0,387	С.	0,217	111	-«-	-	-
4	сер.	0,117	311	-«-	0,388	сер.	0,194	200	-«-	0,388	
5	сер.	0,112	222	-«-	0,388	д. сл.	0,184	002	-«-		0,368
6	д. сл.	0,097	400	-«-	0,388	сер.	0,171	201	-«-	-	
7	сл.	0,089	331	-«-	0,389	д. сл.	0,154	112	-«-	-	
8	сл.	0,087	420	-«-	0,389	сер.	0,137	220	-«-	0,387	
9	д. сл.	0,079	422	-«-	0,387	сер.	0,128	221	-«-	-	
10	д. сл.	0,075	511	-«-	0,390	д. сл.	0,125	003	-«-		0,368
\bar{a} (ГЦК-PdFe) = (0,388±0,005) нм					\bar{a} (L1 ₀ -FePd) = (0,388 ± 0,003) нм; \bar{c} (L1 ₀ -FePd) = (0,367 ± 0,005) нм						
$a_0(\text{Pd}) = 0,389 \text{ нм}; a_0(\text{Fe}) = 0,286 \text{ нм};$ $a_0(\text{L1}_0\text{-FePd}) = 0,385 \text{ нм}; c_0(\text{L1}_0\text{-FePd}) = 0,372 \text{ нм}$											
С. – сильна; сер. – середня; сл. – слабка; д. сл. – дуже слабка											

від концентрації атомів Fe в системі і має значення $\bar{a} = 0,388$ нм ($c_{Fe} = 45 - 50$ ат.%), яке близьке до параметра решітки плівки Pd ($\bar{a} = 0,389$ нм), що свідчить про формування ГЦК-PdFe фази на її основі. При збільшенні концентрації атомів Fe до $c_{Fe} = 70 - 85$ ат.% має місце викривлення ГЦК-решітки, яке проявляється в тому, що лінія (111) зміщується в бік більших кутів, (200) – в бік менших кутів, а лінія (220) розщеплюється на три лінії. Кількісною характеристикою цього викривлення може бути порівняння між собою, наприклад, величини $a_{111} = 0,386$ нм і $a_{200} = 0,398$ нм для викривленої ГЦК-решітки та $a_{111} = 0,388$ нм і $a_{200} = 0,388$ нм для ГЦК-PdFe. Із величини параметрів кристалічної решітки упорядкованої фази ГЦТ-PdFe слідує, що величина $(c/a - 1) = 0,047 - 0,048$, що відповідає ступеню упорядкування $S = 0,86 - 0,90$.

Узагальнення результатів рентгенографічних і електронографічних досліджень представлені у вигляді штрих-діаграми (рис. 3).

Методом ВІМС проведені дослідження дифузійних процесів у багатошарових плівкових системах. Відносно велике значення коефіцієнтів дифузії $D_{Pd \rightarrow Fe} = 2,7 \cdot 10^{-18}$ м²/с і $D_{Fe \rightarrow Pd} = 1,1 \cdot 10^{-18}$ м²/с пояснюється зерномежовим механізмом взаємної дифузії атомів і високою дисперсністю плівок Pd і Fe.

Використовуючи неруйнівний метод рентгенівської рефлектометрії, на прикладі мультишарів $[Pd(0,6)/Fe(0,9)]_{10}/\Pi$ і $[Pd(1,1)/Fe(1,1)]_5/\Pi$ була визначена шорсткість шарів $\sigma = 0,11$ нм, що становить не більше 15% від товщини окремих шарів системи.

У підрозділі також розглянуті умови формування гідридної фази паладію. Встановлено, що утворення PdH_x відбувається в умовах технологічного вакууму ($10^{-3} - 10^{-4}$ Па) при швидкостях конденсації $\omega_{Pd} < 1$ нм/с в інтервалі температур 900 – 1100 К.

У другому підрозділі наведені результати досліджень електрофізичних властивостей одношарових плівок Pd і Fe, результати яких можуть бути використані для прогнозування властивостей багатошарових плівкових систем і мультишарів.

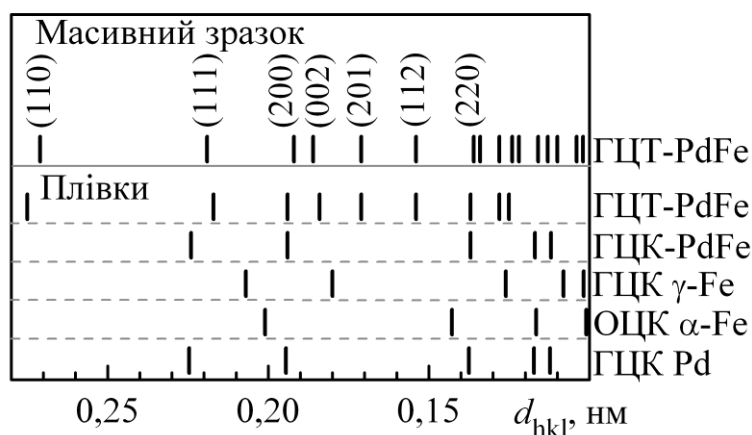


Рис. 3. Узагальнена штрих-діаграма дифракційних досліджень

кою Венда було встановлено, що плівки Pd мають більшу дефектність

систем і мультишарів. Питомий опір і ТКО одношарових плівок Fe і Pd після термостабілізації збільшується при зростанні температури, у той час як при першому відпалюванні в зразках відбуваються процеси заліковування дефектів кристалічної будови типу «вакансія – інорідний атом» або «дефект пакування». Згідно з розрахунками за методикою Венда було встановлено, що плівки Pd мають більшу дефектність

порівняно з плівками Fe з точки зору концентрації дефектів і спектра енергії активації їх заліковування.

У *третьому підрозділі* наведені результати досліджень терморезистивних властивостей двошарових плівок і мультишарів на основі Pd і Fe. Проведені розрахунки величини β на основі моделі для двокомпонентного плівкового сплаву:

$$\beta \cong \frac{\beta_1}{1 + \frac{c_2 \rho_2}{c_1 \rho_1}} + \frac{\beta_2}{1 + \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}}, \quad (1)$$

де β_1 і β_2 , ρ_1 і ρ_2 , c_1 і c_2 , d_1 і d_2 – ТКО, питомий опір, концентрація атомів і товщина одношарових плівок Fe і Pd, відповідно.

Отримано задовільну відповідність експериментальних і розрахункових результатів, що підтверджує формування твердого розчину в двошарових у вихідному стані зразках (табл. 2).

При переході до мультишарів відбувається зменшення концентрації дефектів у результаті їх автозаліковування у нижніх шарах при конденсації кожного наступного шару, що і відображається на температурній залежності $\rho(T)$ вже при I-му термостабілізаційному циклі (рис. 4 а, б). Характер $\rho(T)$ визначається відношенням товщини окремих шарів фрагменту: при зміні d_{Pd}/d_{Fe} від 0,22 до 1,22 зміна кута нахилу на першому термостабілізаційному циклі відбувається в інтервалі температур 580 – 700 К. Про концентраційну залежність електрофізичних властивостей можна судити із залежності для ТКО мультишарів $[Pd/Fe]_n$ (рис. 4).

Дослідження морфології поверхні методом АСМ після відпалювання плівкових систем до $T > 900$ К свідчать про її острівцеподібний характер унаслідок руйнування структурної суцільності плівки.

У *четвертому підрозділі* наведені результати досліджень тензорезистивних властивостей плівкових систем на основі Pd і Fe, які можуть використовуватися як чутливі елементи сенсорів для контролю напружено-деформованого стану механічних конструкцій, вимірювання тиску, температури, ваги та інших неелектричних величин.

Отримано розмірні залежності КТ для одношарових плівок Pd

Таблиця 2

Порівняння експериментальних та розрахункових значень ТКО

Зразок	c_{Fe} , ат. %	$\beta_{екс} \cdot 10^4$, K ⁻¹	$\beta_{роз} \cdot 10^4$, K ⁻¹ співвідн. (1)	$[(\beta_{роз} - \beta_{екс})/\beta_{роз}]$, %
Pd(5)/Fe(40)/П	90,8	5,20	4,76	9
Pd(30)/Fe(5)/П	17,1	4,15	3,54	17
Pd(30)Fe(10)/П	29,2	5,40	4,19	28
Pd(40)/Fe(40)/П	55,3	3,45	2,65	30

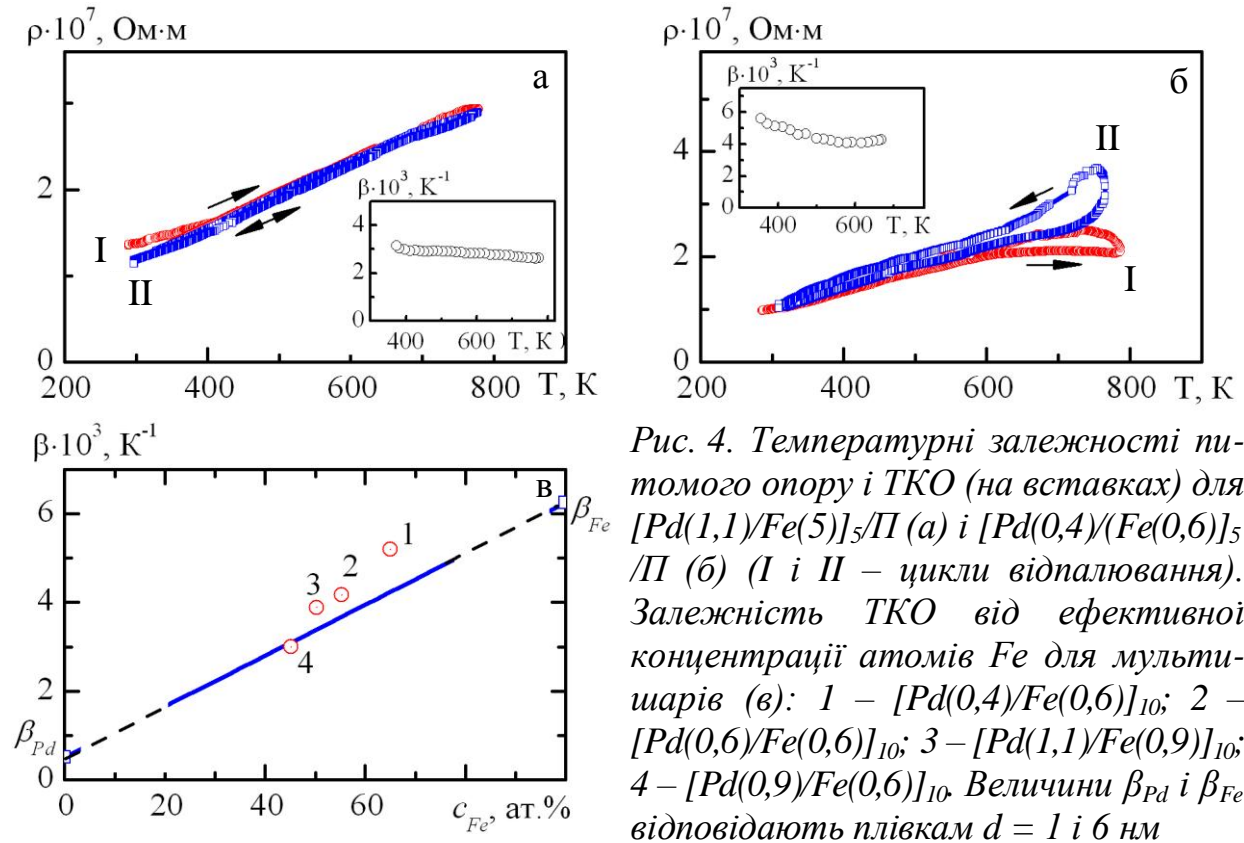


Рис. 4. Температурні залежності питомого опору і ТКО (на вставках) для $[Pd(1,1)/Fe(5)]_5/\Pi$ (а) і $[Pd(0,4)/Fe(0,6)]_5/\Pi$ (б) (I і II – цикли відпалювання). Залежність ТКО від ефективної концентрації атомів Fe для мультишарів (в): 1 – $[Pd(0,4)/Fe(0,6)]_{10}$; 2 – $[Pd(0,6)/Fe(0,6)]_{10}$; 3 – $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_{10}$; 4 – $[Pd(0,9)/Fe(0,6)]_{10}$. Величини β_{Pd} і β_{Fe} відповідають плівкам $d = 1$ і 6 нм

Fe як компонент мультишару, на основі яких встановлено, що величина КТ при $d \rightarrow \infty$ дорівнює $\gamma_{\infty} = 1,5$ (Pd) і $2,7$ (Fe) одиниць. У багатошарових зразках має місце відносно велике значення КТ ($\gamma = 6 - 15$ одиниць) (рис. 5) у порівнянні з одношаровими плівками Pd і Fe, що є типовою ситуацією для плівкових сплавів, у яких може стабілізуватися гранульований стан, утворюються магнітні інтерфейси, інтерметалеві включення. На основі лінеаризованого співвідношення Тельє, Тоссе і Пішар були визначені параметри електроперенесення плівок: величина СДВП, яка становить $\lambda_0 \cong 20$ нм (Pd) і 5 нм (Fe) та деформаційні коефіцієнти СДВП – $\eta_l = 2,54$ (Pd) і $12,62$ (Fe). Ці

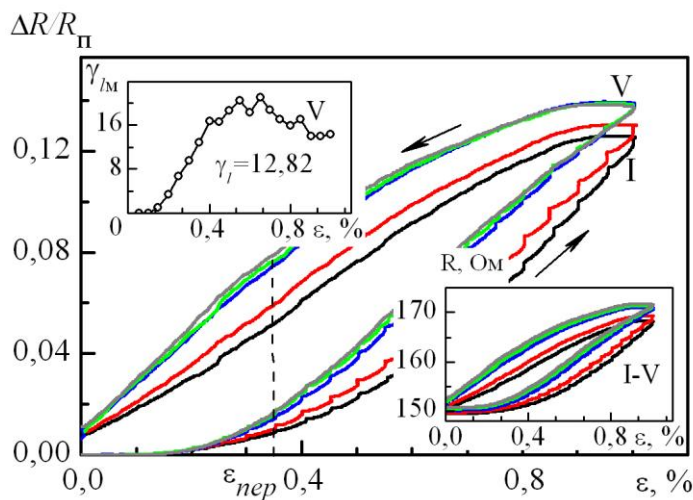


Рис. 5. Деформаційна залежність для мультишару $[Pd(5)/Fe(5)]_3/\Pi$

тензометричні характеристики були використані нами в розділі 4 при апробації теоретичної моделі для поздовжнього магнітоопору.

Четвертий розділ «Гальваномагнітні властивості мультишарів на основі Pd і Fe» складається із чотирьох підрозділів.

У першому підрозділі наведені результати дослідження магніторезистивних властивостей (МО, АМО і ГМО) плівкових систем, сформованих

у вигляді багат шарових плівок і мультишарів Pd/Fe. Встановлено, що в багат шарових плівках при $d_{\text{Fe}} > d_{\text{Pd}}$ ($c_{\text{Fe}} = 55 - 80$ ат.%) спостерігається анізотропність польових залежностей, яку можна пояснити анізотропними властивостями шарів Fe, що характеризуються від'ємним магніто-резистивним ефектом у паралельній геометрії і позитивним МО – в поперечній та перпендикулярній геометріях вимірювання.

Другий підрозділ присвячений питанням температурної, концентраційної і розмірної залежностей МО. При переході від одношарових плівок до мультишарів з'являються додаткові механізми розсіювання електронів – межі поділу (у випадку збереження їх індивідуальності) або магнітні інтерфейси (при формуванні твердого розчину), коли розсіювання електронів відбувається не на фактичних межах поділу шарів, а на магнітних моментах атомів феромагнітного і немагнітного матеріалів ¹⁾. У такому випадку може реалізуватися спін-залежне розсіювання електронів і система буде мати антиферомагнітне упорядкування.

Дослідження методом МОКЕ вказують на те, що магніто-оптичні властивості суттєво залежать від двох типів упорядкування – атомного і магнітного. Зокрема, коерцитивність та її анізотропія змінюється при переході від структурно-розупорядкованої ГЦК-фази ($B_c \cong 10$ мТл) до упорядкованої ГЦТ-фази (B_c збільшується до 140 мТл). Крім того поле насичення (B_s) залежить від товщини шару Pd і Fe. Необхідно підкреслити, що при товщинах шарів Fe, які відповідають концентрації $c_{\text{Fe}} = 45 - 50$ ат.%, спостерігається відносно велике значення поля насичення $B_s > 1$ Тл (рис.6 а, б).

У свіжосконденсованих і відпалених до 780 К мультишарах $[\text{Pd/Fe}]_n/\text{П}$ МО має ознаки гігантського магнітного опору (рис. 6). Його величина при збільшенні кількості фрагментів n від 3 до 10 зростає в 2–4 рази. В упорядкованій ГЦТ-фазі у порівнянні із свіжосконденсованими системами величина МО збільшується в 3 – 3,5 рази і становить 0,35 – 0,40%.

Отримано, що додатковий шар Cu в мультишарах $[\text{Pd/Fe}]_n/\text{П}$ впливає на величину магнітоопору. Так, наприклад, у плівкових системах $[\text{Pd}(1,1)/\text{Fe}(0,9)]_5/\text{П}$ при його наявності МО збільшується в 2,8 – 3,5 рази (свіжосконденсовані зразки) і в 3,5 – 4,0 рази (термостабілізовані зразки).

Результати апробації класичної теоретичної моделі Тельє і Тоссе для поздовжнього МО з урахуванням поверхневого і зерномежового розсіювання електронів для одношарових плівок Pd і Fe представлені у *третьому підрозділі*. Кінцева формула для розрахунку має такий вигляд:

$$\frac{\sigma}{\sigma_g} = 1 - \frac{3}{16k} f(\alpha) \left\{ 2 - \frac{k_r^2 \cdot [f(\alpha)]^2 \cdot \left\{ 1 + \exp \left[-2\pi k \cdot [k_r \cdot f(\alpha)]^{-1} \right] \right\}}{[k_r \cdot f(\alpha)]^2 + 4k^2} \right\}, \quad (2)$$

¹⁾ Coehoorn R. Relation between interfacial magnetism and spin-dependent scattering at non-ideal Fe/Cr and Fe/V interface / R. Coehoorn // J. Magn. Magn. Mat. – 1995. – V. 151. – P. 341–353.

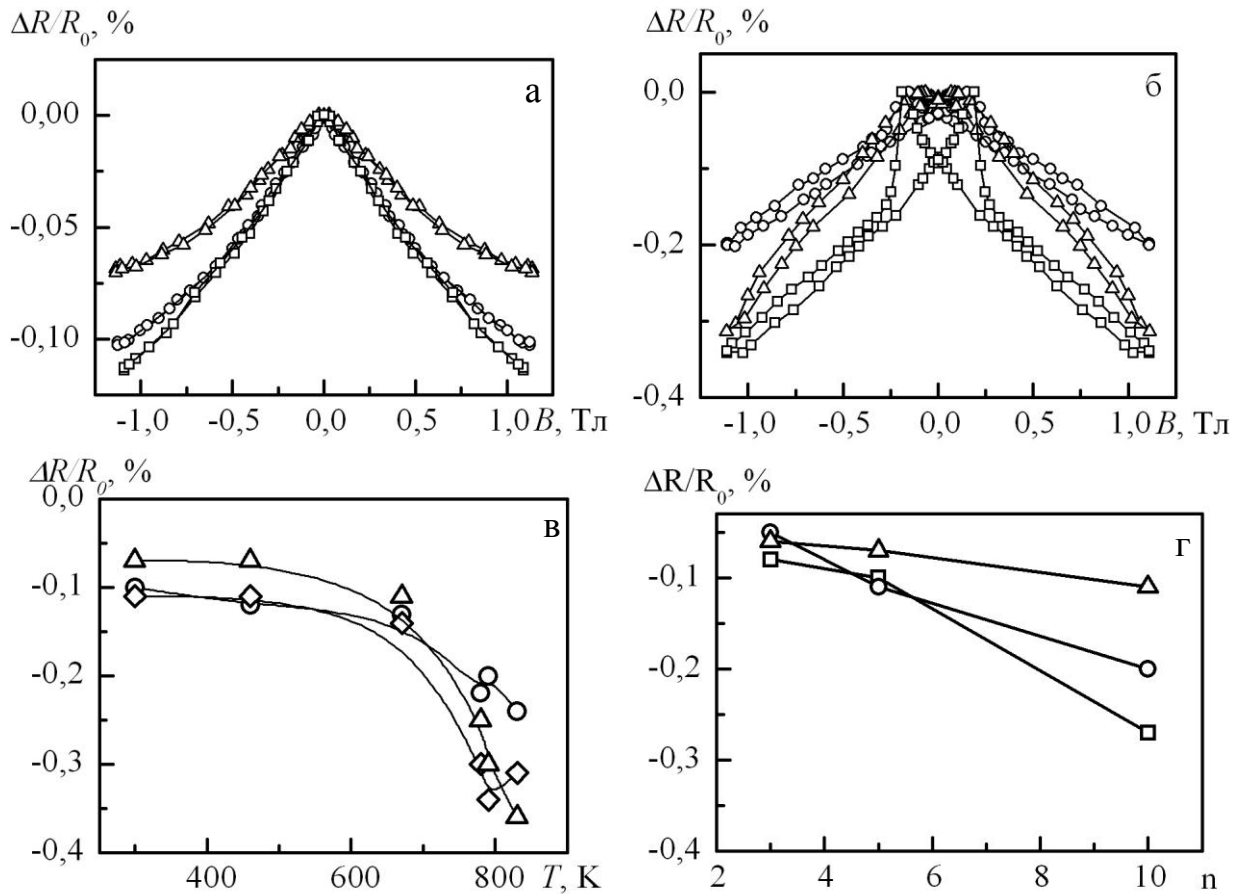


Рис. 6. Польові при $T=300$ (а) і 780 К (б), температурні (в) та розмірні (г) залежності МО для мультишарів $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_n/\Pi$ (а, б) і $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_n/\Pi$ (в, г) при $n = 3, 5$ і 10 . Геометрії вимірювання: паралельна (○), перпендикулярна (△) і поперечна (□). Загальна концентрація атомів Fe – 50 ат.%

де $f(\alpha) = 1 - 3/2\alpha + 3\alpha^2 - 3\alpha^3 - \ln(1+1/\alpha)$ – функція зерномежового розсіювання; $k = d/\lambda_0$ – зведена товщина; $\sigma_g = \sigma_0 f(\alpha)$; $k_r = d/r_L$; $r_L = m\nu/(eB)$ – радіус ларморівської орбіти; ν – швидкість електрона.

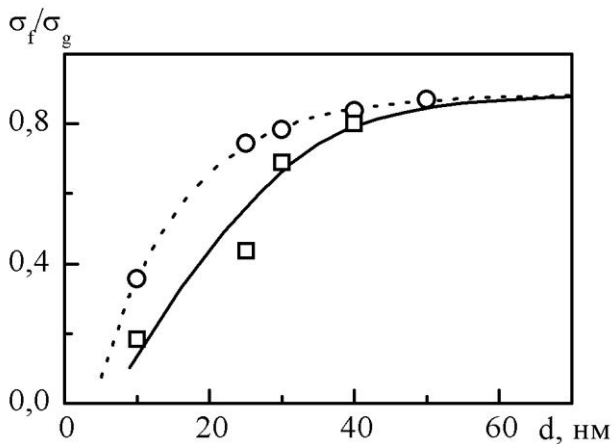


Рис. 7. Розмірна залежність відносної провідності для плівок Fe(10 – 40): □ – експериментальні та ○ – розрахункові дані

При апробації співвідношення (2) експериментальні дані перебудувалися у координатах σ_f/σ_g від товщини плівки (суцільна лінія на рис. 7). Величина функції зерномежового розсіювання становила $f(\alpha) \cong 0,43$ (Pd) і $0,40$ (Fe). Оскільки умови експерименту задовольняють нерівності $k/k_r \gg 1$ (слабкі поля), то розрахункові дані за співвідношенням (2) дають результати, які мало відрізняються від експериментальних як для Pd,

так і Fe (пунктирна лінія на рис. 7).

За результатами аналізу розмірної залежності відносної провідності можна зробити висновок, що теоретична модель Тельє і Тоссе задовільно узгоджується із експериментальними даними і більш коректно враховує процеси зерномежового розсіювання (маядасівський механізм) порівняно із поверхневим (фуксівський механізм) розсіюванням електронів.

У четвертому підрозділі подані результати дослідження ефекту Холла в мультишарах на основі Pd і Fe. Температурна і розмірна залежності напруги Холла (U_H) наведені на рис. 8. Отримано, що термообробка систем $[Pd/Fe]_n/\Pi$ в температурному інтервалі 300 – 780 К приводить до зміни величини U_H в 1,5 – 2 рази (при $B = 1$ Тл) та кута нахилу польової залежності, що пов'язано із процесами фазоутворення в системах. Поява гістерезису при $T = 780$ К свідчить про виникнення перпендикулярної анізотропії, яка характерна для упорядкованої фази $L1_0$ (рис. 8 а). При збільшенні загальної товщини зразка від 10 до 20 нм величина U_H змінюється в 3 – 3,5 рази (рис. 8 б).

Для встановлення внеску процесів атомного і магнітного упорядкування у твердих розчинах та інтерфейсного розсіювання електронів у величину R_H нами було використане співвідношення для СХ для двошарового фрагменту, який моделюється як паралельне з'єднання окремих шарів, у вигляді:

$$R_H = (d_1 + d_2) \cdot \left(\frac{R_{H1}\rho_2^2 d_1 + R_{H1}\rho_1^2 d_2}{(\rho_2 d_1 + \rho_1 d_2)^2} \right), \quad (3)$$

де R_{H1} і R_{H2} , d_1 і d_2 , ρ_1 і ρ_2 – сталі Холла 1-го і 2-го шарів плівкової системи, товщини шарів та їх питома провідність, відповідно.

Співвідношення (3) нами розповсюджено на випадок довільної кількості паралельно з'єднаних фрагментів, з яких складається мультишар. Одержана лише якісна відповідність експериментальних і розрахованих на основі співвідношень, аналогічних співвідношенню (3), результатів (рис. 9).

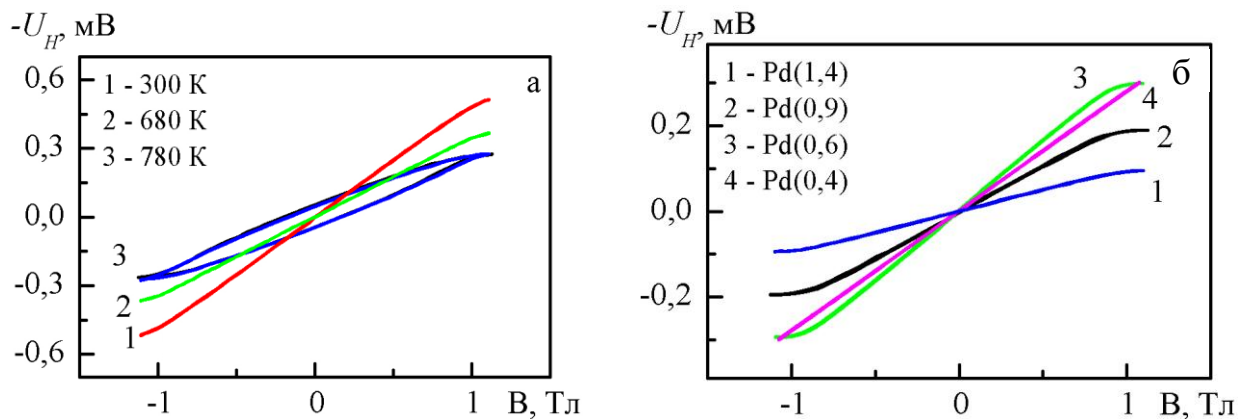


Рис. 8. Залежності напруги Холла від магнітної індукції (а) та товщини немагнітного шару (б) для системи $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_5/\Pi$ ($\Delta T = 300 - 780$ К) та $[Pd(x)/Fe(0,6)]_{10}/\Pi$ ($T = 300$ К)

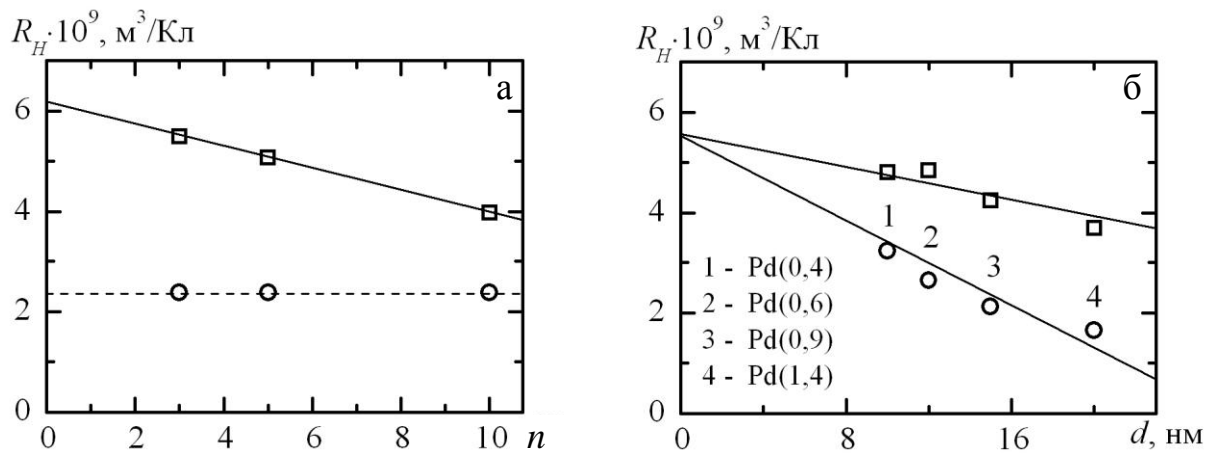


Рис. 9. Залежність сталої Холла від кількості фрагментів (а) для плівкової системи $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_n/\Pi$ і загальної товщини (б) для $[Pd(x)/Fe(0,6)]_{10}/\Pi$: \square – експериментальні та \circ – розрахункові результати

Установлено, що для СХ характерна розмірна залежність. При зміні загальної товщини мультишару від 10 до 20 нм величина R_H зменшується від $4,84 \cdot 10^{-9}$ до $3,70 \cdot 10^{-9}$ м³/Кл. Розрахунок величини $(R_H^{екс} - R_H^{поз})/R_H^{поз}$ показує, що залежно від кількості фрагментів і загальної товщини мультишару, вона змінюється в межах від 50 до 130%, що говорить про невідповідність співвідношення (3) для плівкових систем у вигляді твердих розчинів, в яких має місце часткове або повне атомне і магнітне упорядкування, значне розмиття структурних і недосконала структура магнітних інтерфейсів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведені комплексні дослідження процесів фазоутворення, електрофізичних і гальваноманітних властивостей у двошарових плівкових системах і мультишарах на основі Pd і Fe, які мають особливості структурно-фазового стану у зв'язку із процесами упорядкування атомів при збільшенні температури.

1. Дослідження фазового складу плівкових систем на основі Pd і Fe у процесі термообробки до $T = 780$ К (мультишари) та 850 К (двошарові зразки) дозволили визначити умови формування (температура і концентрація атомів) неупорядкованої ГЦК- PdFe і упорядкованої ГЦТ-PdFe фаз; установлено, що в мультишарах реалізуються умови стабілізації магнітних інтерфейсів.

2. Експериментальні дослідження електрофізичних властивостей плівкових матеріалів на основі Pd і Fe дозволили встановити таке:

- при зміні загальної товщини плівкової системи від 5 до 80 нм в інтервалі температур 300 – 850 К величина ТКО становить $(3,8 - 7,5) \cdot 10^{-4}$ К⁻¹ (двошарові плівкові системи, в яких товщина шару заліза $d_{Fe} = 5 - 40$ нм) та $(1,8 - 3,0) \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ (мультишари, в яких $d_{Fe} = 0,6 - 5$ нм). Відміна у величині ТКО пояснюється формуванням неупорядкованої ГЦК-PdFe фази на основі твердого розчину під час осадження плівок за рахунок конденсаційно-стимульованої дифузії;

- на основі розмірних залежностей питомого опору для одношарових плівок Pd і Fe здійснено розрахунок у дифузному наближенні величини СДВП ($\lambda_0 \cong 20$ нм (Pd) і 5 нм (Fe)), а в рамках лінеаризованої моделі Тельє, Тоссе і Пішар – деформаційного коефіцієнта СДВП ($\eta_{\lambda g} = 2,54$ (Pd) і 12,62 (Fe)), які можуть бути використані для прогнозування електрофізичних властивостей багатошарових плівок;

- в області пружної деформації величина КТ для одношарових плівок складає 1,6 – 2,2 ($d_{Pd} = 5 - 90$ нм) і 3,5 – 8,2 ($d_{Fe} = 10 - 60$ нм) одиниць; для двошарових плівкових систем Pd(x)Fe(10)/П при $x = 5 - 30$ нм - від 6,0 до 8,8 одиниць. При переході до багатошарових плівок КТ має відносно велике значення ($\gamma_i = 6 - 15$ одиниць) у порівнянні з одношаровими плівками Pd і Fe тієї ж товщини, що є типовою ситуацією для плівкових сплавів.

3. Дослідження МО в багатошарових плівках і мультшарах на основі Pd і Fe в паралельній, перпендикулярній і поперечній геометріях дозволили визначити наступне:

- у багатошарових плівках при $d_{Fe} > d_{Pd}$ ($c_{Fe} = 55 - 80$ ат.%) спостерігається анізотропність польових залежностей, яку можна пояснити анізотропними властивостями шарів Fe;

- у свіжесконденсованих і відпалених до 780 К мультшарах $[Pd/Fe]_n/П$ ($n = 3, 5$ і 10) МО має ознаки гігантського магнітного опору, в упорядкованій ГЦТ-фазі величина МО збільшується в 3 – 3,5 рази і становить 0,35 – 0,40%;

- варіювання кількості фрагментів у зразках $[Pd(1,1)/Fe(0,9)]_n/П$ від 3 до 10 приводить до збільшення величини МО на 0,05 – 0,19%, що, можливо, обумовлено додатковим розсіюванням електронів на магнітних інтерфейсах; у процесі термообробки при температурі 780 К величина МО збільшується на 0,02 – 0,16% і зростає величина коерцитивної сили, що можна пояснити процесами атомного і магнітного упорядкування та рекристалізаційними процесами;

- при зміні товщини шару Pd від 0,4 до 1,4 нм спостерігається збільшення МО на 0,06 – 0,14% (свіжосконденсовані мультшари) та на 0,35 – 0,50% (відпалені до 780 К). У перпендикулярній геометрії величина МО має менше значення, ніж у паралельній і поперечній;

- додатковий шар Cu, ефективна товщина якого не перевищує 10% від загальної товщини мультшарів $[Cu/Pd/Fe]_n/П$, приводить до збільшення величини МО в 2,8 – 3,0 рази (свіжосконденсовані зразки) і в 1,1 – 2,6 рази (відпалені до $T = 780$ К), що пов'язано з утворенням гранул γ -Fe в плівці Cu.

4. Дослідження методом МОКЕ показали, що магніто-оптичні властивості мультшарів $[Pd/Fe]_n$ суттєво залежать не тільки від атомного (неупорядкована або упорядкована фази), але й від магнітного (орієнтація магнітних моментів) упорядкування, що обумовлює зміну коерцитивності та її анізотропії при переході ГЦК-PdFe \rightarrow ГЦТ-PdFe і залежність величини поля насичення від товщини шару Pd.

5. Уперше на прикладі одношарових плівок Pd і Fe як компонент мультшарів проведена апробація класичної теоретичної моделі Тельє і

Тоссе для поздовжнього магнітоопору, яка враховує поверхневе (фуксівський механізм) і зерномежове (маядасівський механізм) розсіювання електронів; отримано задовільне узгодження із експериментальними даними, що відкриває можливість для прогнозування магніторезистивних властивостей у багатошарових плівкових системах Pd/Fe.

6. За результатами досліджень гальваномагнітних властивостей мультишарів встановлено, що величина СХ монотонно зменшується в інтервалі $(5,5 - 3,7) \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$ зі збільшенням товщини зразка від 10 до 40 нм і залежить від декількох факторів: загальної товщини зразка (кількості фрагментів для мультишару), товщини шару Pd та інтервалу термообробки. У зв'язку з утворенням твердих розчинів по всьому об'єму зразка отримана лише якісна кореляція між експериментальними і розрахованими на основі співвідношення для паралельного з'єднання n двошарових фрагментів результатами, що пояснюється значним розмиттям структурних інтерфейсів та недосконалою структурою магнітних інтерфейсів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Особенности тензорезистивного эффекта в тонких металлических пленках в области упругой и пластической деформации / [И. П. Бурый, Д. В. Великодний, Л. В. Ордворец, И. Е. Проценко, **Е. П. Ткач**] // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, Вып. 2. – С. 75–81.
2. Апробація теоретичної моделі розмірного ефекту в магнітоопорі / [Д. М. Кондрахова, **О. П. Ткач**, Л. В. Ордворец, І. Ю. Проценко] // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2011. – Т. 9, Вып. 4. – С. 801–807.
3. Эффект Холла в мультишарах на основі Pd і Fe / [**О. П. Ткач**, О. С. Грищук, Т. П. Говорун, Л. В. Ордворец] // Ж. нано- електрон. фіз. – 2011. – Т. 3, № 4. – С. 131–137.
4. Механічні властивості нанорозмірних і нанокристалічних металевих плівок/ [**О. П. Ткач**, К. В. Тищенко, Л. В. Ордворец, С. І. Проценко, Д. В. Великодний, І. Ю. Проценко] // Ж. нано- електрон. фіз. – 2010. – Т. 2, №1. – С. 51–59.
5. Магніторезистивні властивості многослойных наноразмерных пленочных систем / [О. В. Сынашенко, **Е. П. Ткач**, И. П. Бурый, Л. В. Ордворец, С. И. Проценко, Н. И. Шумакова] // ВАНТ. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2009. – № 6. – С. 169–174.
6. Магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових систем на основі Fe і Pd / [**О. П. Ткач**, Л. В. Ордворец, S. Neričko, С. І. Проценко] // ФИП. – 2009. – Т.7, № 3. – С. 256–261.
7. Фазообразование и электрофизические свойства пленочных систем на основе Fe и Pd / [**Е. П. Ткач**, Л. В. Ордворец, S. Neričko, И. Е. Проценко, G. Schönhense] // Матеріали III Міжнар. конф. [“Фізико-хімічні основи

формування і модифікації мікро- та наноструктур”], (Харків, 21–23 жовтня 2009 р.). – С. 138–142.

2. Наукові праці апробаційного характеру

8. Hall effect in nanodimensional multilayers based on island films of Pd and Fe / [S. A. Nepijko, D. Kutnyakhov, O. Tkach, L. Odnodvoretz, I. Protsenko, G. Schönhense] // 76 Jahrestagung der Deutsche Physikalische Gesellschaft und DPG-Frühjahrstagung, (Berlin, 25 - 30 March 2012). – MA 20.10.

9. Електрофізичні і магніторезистивні властивості наноструктурованих плівкових матеріалів / [О. В. Власенко, Д. М. Кондрахова, Л. В. Однодворець, О. В. Пилипенко, І. Ю. Проценко, **О. П. Ткач**, Ю. М. Шабельник] // Матеріали V Міжнар. конф. [“Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур”], (Харків, 12–14 жовтня 2011 р.). – С. 304–309.

10. Crystalline structure and magnetoresistivity properties of Fe/Pd films / [**О. П. Ткач**, Y. Zabala, L. V. Odnodvoretz, M. Marszałek] // Materials of [“XLVI Zakopane School of Physics International Symposium”], (Zakopane, 16–21 May 2011). – P. 147.

11. Magnetoresistive properties of multilayers based on Fe/Cu and Fe/Pd / [D. M. Kondrahova, O. V. Synashenko, I. Yu. Protsenko, **О. П. Ткач**, L. V. Odnodvoretz] // Materials of XIII Int. conf. [“Physics and technology of thin films and nanosystem”], (Ivano-Frankivsk, 16–21 May 2011). – С. 134.

12. **Ткач О.П.** Гальваномагнітні властивості мультишарів Fe/Pd / [О. П. Ткач, Л. В. Однодворець] // Матеріали X Міжнар. конф. [“Фізичні явища в твердих тілах”], (Харків, 6–9 грудня 2011 р.). – С. 89.

13. **Ткач О.П.** Магніторезистивні властивості мультишарової плівкової системи Fe/Pd / [О. П. Ткач, Л. В. Однодворець] // Матеріали Міжнар. конф. студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [“ЕВРИКА-2011”], (Львів, 18–20 травня 2011 р.). – С. А38.

14. Электрофизические и магниторезистивные свойства наноразмерных пленочных систем на основе Fe и Pd или Fe и Cu / [**Е. П. Ткач**, О. В. Сынашенко Л. В. Однодворец, А. В. Пилипенко, И. Е. Проценко] // Матеріали IV Міжнар. конф. [“Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур”], (Харків, 6–8 жовтня 2010 р.). – С. 38–42.

15. Crystal structure and magnetoresistance of multilayer films based on Fe and Pd or Cr / [I. V. Cheshko, S. Nepijko, L. V. Odnodvoretz, O. V. Synashenko, **О. П. Ткач**, I. Yu. Protsenko] // Materials of International Workshop [“Magnetic phenomena in micro- and nano- structure 2010”], (Donetsk, 27–29 May 2010). – P. 158–159.

16. Магніторезистивні властивості плівкових матеріалів на основі Fe і Pd та Fe і Cu / [Л. В. Однодворець, О. В. Синашенко, **О. П. Ткач**, І. Ю. Проценко] // Матеріали II наук. Міжнар. конф. [“Сучасні проблеми конденсованого стану”], (Київ, 6–9 жовтня 2010 р.). – С. 17.

17. Electrophysical, magnetoresistive and magneto optic properties of thin films with spin-depended scattering of electrons / [D. V. Velykodnyi, I. V. Cheshko,

S. I. Protsenko, **О. Р. Tkach**, I. Yu. Protsenko] // Materials of Int. conf. [“Functional Materials” (ICFM’ 2009)], (Partenit, 5–10 October 2009). – P. BQ-3P/36.

18. Фазовые переходы в пленочных системах на основе Fe и Pd / [И. В. Чешко, **Е. П. Ткач**, Д. А. Кутняхов, Л. В. Однорец] // Материалы III Междунар. школа-семинар молодых ученых [“Рост кристаллов”], (Харьков, 13–16 сентября 2009 г.). – С. 5.

19. Терморезистивні властивості багатошарових плівкових систем / [О. П. Ткач, Ч. Панчал, В. А. Соломаха, Л. В. Однорець] // Матеріали Всеукр. конф. молодих вчених [“Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології (СММТ–2008)”], (Київ, 12–14 листопада 2008 р.). – С. 39.

3. Праці, які додатково відображають наукові результати

20. Размерные примесные эффекты в кристаллической структуре тонких металлических пленок / [Л. В. Однорец, Н. И. Шумакова, **Е. П. Ткач**, И. Е. Проценко] // Ж. нано- электрон. фіз. – 2009. – №1. – С. 29 – 41.

21. Власенко О.В. Фазовий склад і терморезистивні властивості плівкових матеріалів на основі Fe і Pd / [О. В. Власенко, О. В. Пилипенко, **О. П. Ткач**] // Науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету електроніки та інформаційних технологій Сумського державного університету, (Суми, 19–23 квітня 2010 р.). – С. 117.

22. Особливості процесів фазоутворення в приладових плівкових структурах, отриманих пошаровою конденсацією / [Л. В. Однорець, В. О. Зленко, О. В. Синашенко, **О. П. Ткач**, І. В. Чешко] // Матеріали Міжнар. конф. студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [“ЕВРИКА-2009”], (Львів, 20–21 травня 2009 р.). – С. А17.

АНОТАЦІЯ

Ткач О. П. Процеси фазоутворення, електрофізичні та гальваномагнітні властивості багатошарових плівкових систем Pd/Fe. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2012.

У дисертаційній роботі представлені результати комплексних досліджень процесів фазоутворення, електрофізичних (термічний коефіцієнт опору і коефіцієнт тензочутливості) і гальваномагнітних (магнітоопір, ефект Холла) властивостей багатошарових і мультишарових зразків на основі Pd і Fe, отриманих методом пошарової конденсації з наступною термообробкою.

Дослідження фазового складу плівкових систем на основі Pd і Fe дозволили визначити умови формування неупорядкованої ГЦК-PdFe і упорядкованої ГЦТ-PdFe фаз. Внаслідок термообробки мультишарів до 780 К величина термічного коефіцієнту опору і магнітоопору збільшується, що можна пояснити процесами атомного і магнітного упорядкування.

Уперше на прикладі одношарових плівок Pd і Fe як компонент мультишарів проведена апробація теоретичної моделі Тельє і Тоссе для поздовжнього магнітоопору, яка враховує поверхнєве і зерномежове розсіювання електронів.

Встановлена залежність величини сталої Холла від загальної товщини системи (кількості фрагментів в мультишарі), товщини шару Pd та інтервалу термообробки. Унаслідок розмиття структурних і недосконалих магнітних інтерфейсів отримана лише якісна кореляція між експериментальними і розрахованими на основі співвідношення для паралельного з'єднання двошарових фрагментів результатами.

Ключові слова: мультишари, фазоутворення, упорядкована фаза, термічний коефіцієнт опору, тензочутливість, магнітоопір, ефект Холла.

АННОТАЦІЯ

Ткач Е. П. Процессы фазообразования, электрофизические и гальваномагнитные свойства многослойных пленочных систем Pd/Fe. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2012.

В диссертационной работе представлены результаты комплексных исследований процессов фазообразования, электрофизических (термический коэффициент сопротивления, коэффициент тензочувствительности) и гальваномагнитных (магнитосопротивление, эффект Холла) свойств многослойных пленочных систем и мультислоев на основе Pd и Fe, полученных методом послойной конденсации с последующей термообработкой.

Исследование фазового состава пленочных систем Pd/Fe с различной толщиной слоев в процессе термообработки до $T = 780$ К (мультислои) и 850 К (двухслойные образцы) позволили определить условия формирования (степень вакуума, толщина фрагментов и отдельных слоев, температура отжига и др.) неупорядоченной ГЦК-PdFe и упорядоченной ГЦТ-PdFe фаз.

Исследования электрофизических свойств пленочных образцов Pd/Fe показали, что при изменении общей толщины пленочной системы от 5 до 80 нм величина термического коэффициента сопротивления составляет $(3,8 - 7,5) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (двухслойные системы) и $(1,8 - 3,0) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (мультислои). Данное отличие объясняется формированием неупорядоченной ГЦК-PdFe фазы на основе твердого раствора во время осаждения пленок за счет конденсационно-стимулированной диффузии. Апробация теоретической модели для пленочного сплава подтвердила данные результаты.

По результатам исследования гальваномагнитных свойств показано, что варьирование количества фрагментов в многослойных системах от 3 до 10 приводит к увеличению магнитосопротивления на 0,05 – 0,19%, что обусловлено дополнительным рассеянием электронов на магнитных интерфейсах, которые представляют собою монослои атомов Pd и Fe с

различными магнитными моментами; при отжиге до 780 К величина магнитосопротивления увеличивается на 0,02 – 0,16%, что объясняется атомным и магнитным упорядочением в следствии фазового перехода ГЦК-PdFe→ГЦТ-PdFe. Впервые на примере однослойных пленок Pd и Fe как компонент мультислоев проведена апробация теоретической модели Телье и Тоссе для продольного магнитосопротивления, которая учитывает поверхностное и зернограничное рассеяние электронов; получено удовлетворительное согласование с экспериментальными данными.

Установлено, что значение постоянной Холла для мультислоев Pd/Fe уменьшается при повышении общей толщины мультислоя (количества фрагментов), толщины слоя Pd и интервала отжига пленочных образцов. В связи с размытием структурных и несовершенства магнитных интерфейсов получена лишь качественная корреляция экспериментальных и расчетных на основе соотношения для параллельного соединения двухслойных фрагментов результатов.

Ключевые слова: мультислои, фазообразование, упорядоченная фаза, термический коэффициент сопротивления, тензочувствительность, магнитосопротивление, эффект Холла.

SUMMARY

Tkach O. P. The processes of phase formation, electrophysical and galvanomagnetic properties of multilayer film systems Pd/Fe. – Manuscript.

Thesis for the candidate of physical and mathematical sciences, speciality 01.04.07 – solid state physics. – Sumy State University, Sumy, 2012.

The thesis is preseted to the results of complex investigate of phase formation, electrophysical (thermal coefficient of resistance and strain coefficient) and galvanomagnetic (magnetoresistance, Hall coefficient) properties of multilayers based on Pd and Fe, obtained by layered condensation followed by thermal annealing.

Investigation of phase composition of thin film systems based on Pd and Fe established conditions for the conditions of formation disordered fcc-PdFe and ordered fct-PdFe phases. As a result of annealing to 780 K multilayers value of thermal coefficient of resistance and magnetoresistance increases, which can be explained by processes of atomic and magnetic ordering. The first example of single-layer films of Pd and Fe as a component multilayers, it was made by approbation the theoretical model of Tellier and Tosser for longitudinal magneto-resistance, which takes into account surface and grain-boundary scattering.

The dependence of the Hall coefficient with total thickness of the system (number of fragments in multilayer), Pd layer thickness and interval annealing. Due to the smearing of the structural and magnetic interfaces imperfections obtained only a qualitative correlation between the experimental and calculated on the basis of the ratio for the parallel connection of two-layer fragments of the results.

Key words: multilayers, phase formation, ordered phase, the thermal coefficient of resistance, strain coefficient, magnetoresistance, Hall effect.

Підписано до друку 28.03. 2012.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.- вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №.409

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