

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**НАНОРОЗМІРНІ ПЛІВКОВІ СТРУКТУРИ З МАГНІТНИМИ І
НЕМАГНІТНИМИ ШАРАМИ ДЛЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
СПІНТРОНІКИ ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ**

1. Владимирський Ігор Анатолійович – доктор фізико-математичних наук, старший дослідник, заступник начальника науково-дослідної частини, доцент кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РЕФЕРАТ

Київ – 2022

Мета роботи – розробка нових сполучень плівкових матеріалів та конфігурацій багатошарових структур на основі Fe/Pt, а також режимів їхньої термічної обробки у різних середовищах в широких температурних інтервалах з метою формування термічно-стабільної фази $L1_0$ -FePt з перспективними для наноелектроніки та спінтроніки властивостями.

Наукова новизна. Вперше встановлено ефект прискорення процесу формування магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePt в області температур $(0,3 - 0,5) T_{пл}$ внаслідок додавання проміжного шару Au до нанорозмірної системи Pt/Fe, що дозволило досягти втричі більшого значення коерцитивної сили плівкового матеріалу.

Вперше на прикладі плівкових систем Pt(15 нм)/Fe(15 нм) та Fe₅₀Pt₅₀(30 нм) на основі встановленої кореляції електрорезистивних, магнітних та структурно-фазових характеристик визначено інтервали термічної стабільності технічно-актуальної фази $L1_0$ -FePt та температуру, до якої зберігається її феромагнітне впорядкування

Вперше виявлено, що закономірності фазоутворення та напрямок дифузійного потоку атомів Me у нанорозмірних системах Pt/Me/Fe (Me – Mn, Tb, Au) за температур до $0,5 T_{пл}$ термодинамічно визначаються співвідношенням ентальпій формування оксидів проміжного Me та Fe: метал проміжного шару з високою спорідненістю до кисню сегрегує на зовнішній поверхні, метал з низькою спорідненістю до кисню – біля підкладки.

Вперше доведено можливість низькотемпературного ($T \sim 0,2 T_{пл}$) формування магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePt у нанорозмірних плівкових системах Pt/Fe та Pt/Me/Fe в процесі ізотермічного відпалу впродовж (24 – 62) годин та збільшення коерцитивної сили до 4 разів внаслідок додавання до системи Pt/Fe проміжних шарів Au, Ag, яке забезпечує прискорення масопереносу за зернограничним механізмом та ізоляцію феромагнітних зерен немагнітним компонентом.

Вперше показано, що особливості масопереносу в кінетичному режимі типу C ($T \sim 0,2 T_{пл}$) для нанорозмірних систем Pt/Me/Fe (Me – Ag, Au) визначаються типом взаємодії матеріалу проміжного шару з основними компонентами: утворення нестабільного інтерметаліду Ag_xPt_{1-x} за механізмом реакційної дифузії, індукованої рухом границь зерен, уповільнює процеси «холодної» гомогенізації хімічного складу і формування впорядкованої магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePt в системі з додатковим шаром Ag порівняно із системою з додатковим шаром Au, для якої характерна обмежена взаємна розчинність компонентів без наявності інтерметалідних сполук.

Вперше виявлено, що збільшення кількості шарів феромагнітного сплаву FePt, додавання шарів немагнітного легуючого елементу Au та зміна атмосфери термічної обробки з нейтральної на водневмісну обумовлюють зменшення на 100 °C температури початку розвитку дифузійних процесів у періодичній системі $[FePt/Au/FePt]_{2x}$ за зернограничним механізмом і прискорюють формування магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePt, що забезпечує зростання коерцитивної сили вдвічі за температур відпалу порядку $0,4 T_{пл}$.

Практична значимість. Отримані в даній роботі результати є науковою основою створення новітніх феромагнітних впорядкованих наноматеріалів на основі FePt з унікальним комплексом магнітних і експлуатаційних властивостей (коерцитивна сила, намагніченість насичення, температура Кюрі, корозійна стійкість), використання яких в якості робочих плівкових елементів приладів нанoeлектроніки і спінтроніки дозволить досягти суттєвого підвищення функціональних характеристик даних приладів (ємність зберігання інформації, щільність інтеграції функціональних елементів тощо) та зменшити енерговитрати. Зацікавленість у впровадженні результатів даного дослідження виявили провідні вітчизняні компанії, що провадять діяльність у сфері мікро- та нанoeлектроніки – ТОВ «Гресем Інновейшен» та ТОВ «Квазар – Мікро ДІСТІ». Результати роботи захищено 6-ма патентами на корисні моделі.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету дослідження і задачі, вирішення яких необхідне для її досягнення, описано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

У **розділі 1** окреслено особливості практичного використання $L1_0$ -впорядкованих плівкових матеріалів у сучасних високих технологіях спінтроніки та нанoeлектроніки. Зокрема, показано, що нанорозмірні плівки на основі $L1_0$ впорядкованих феромагнітних фаз розглядаються як найбільш перспективні матеріали для підвищення основної функціональної характеристики постійних магнітів – повної щільності енергії $(BH)_{\max}$, що обумовлено можливістю досягнення високих значень коерцитивної сили даного класу матеріалів. Додатковою перевагою постійних магнітів на основі $L1_0$ впорядкованих структур є відсутність у їхньому складі рідкісноземельних елементів (поклади яких є досить обмеженими), що зменшує екологічні проблеми під час виробництва магнітів.

В свою чергу, розвиток технологій спінтроніки надає можливість створення новітніх пристроїв пам'яті, детекторів та емітерів електромагнітного випромінювання, діодів тощо. Основними фізико-технологічними завданнями в цій галузі є зниження енергоспоживання спінтронних приладів, збільшення щільності запису пристроїв пам'яті, а також підвищення вихідної потужності емітерів і детекторів електромагнітного випромінювання. Можливості використання феромагнітних тонких плівок на основі сплаву CoFeB, які в теперішній час є основними елементами спінтронних гетероструктур, обмежені фізичною природою їхньої перпендикулярної магнітної анізотропії (ПМА) – інтерфейсним типом ПМА, а також відносно великими значеннями намагніченості насичення і постійної Гілберта. Тому для подальшого розвитку даних технологій перспективним є використання в якості функціональних шарів спінтронних приладів феромагнітних матеріалів, що характеризуються значною ПМА, викликаною магнітно-кристалічною анізотропією, а також магнітними властивостями, включаючи намагніченість насичення, коерцитивну силу і сталу Гілберта, які

можна варіювати у широких межах. Цим вимогам повною мірою відповідають феромагнітні тонкі плівки з $L1_0$ впорядкованою кристалічною структурою.

Обґрунтовано перспективність використання плівкових феромагнітних матеріалів на основі впорядкованої фази $L1_0$ -FePt. Розглянуто особливості фазоутворення та кристалічної будови фаз в системі Fe-Pt за умов термічного впливу. Окреслено фізико-матеріалознавчі задачі, вирішення яких є необхідним для практичного використання плівкових матеріалів на основі FePt.

У розділі 2 наведено стислий опис використаних експериментальних методів отримання, обробки і дослідження плівкових матеріалів.

У розділі 3 представлено результати дослідження термічно-індукованих структурно-фазових перетворень, а також закономірності їхнього впливу на магнітні та електрофізичні властивості двошарової системи Pt(15 нм)/Fe(15 нм) і плівкових композицій на її основі з додатковими проміжними наночастинами Au, Mn і Tb, отриманих методом магнетронного осадження на підкладки термічно-окисненого монокристалічного кремнію.

Враховуючи, що розвиток процесів оксидування на зовнішній поверхні може чинити істотний вплив на структуро- та фазоутворення в об'ємі нанорозмірних металевих композицій, матеріали проміжних шарів обирались з огляду на характер їхньої взаємодії з Fe і Pt, а також ступень спорідненості до кисню – від повної нерозчинності у сплаві FePt і практично відсутньої спорідненості до кисню (Au) до дуже високого ступеня спорідненості до кисню з можливістю формування проміжних фаз з Pt або Fe (Tb), а також з деяким проміжним значенням спорідненості до кисню і наявністю відповідно до діаграми стану трикомпонентної сполуки за рахунок взаємодії як із Fe, так із Pt (Mn).

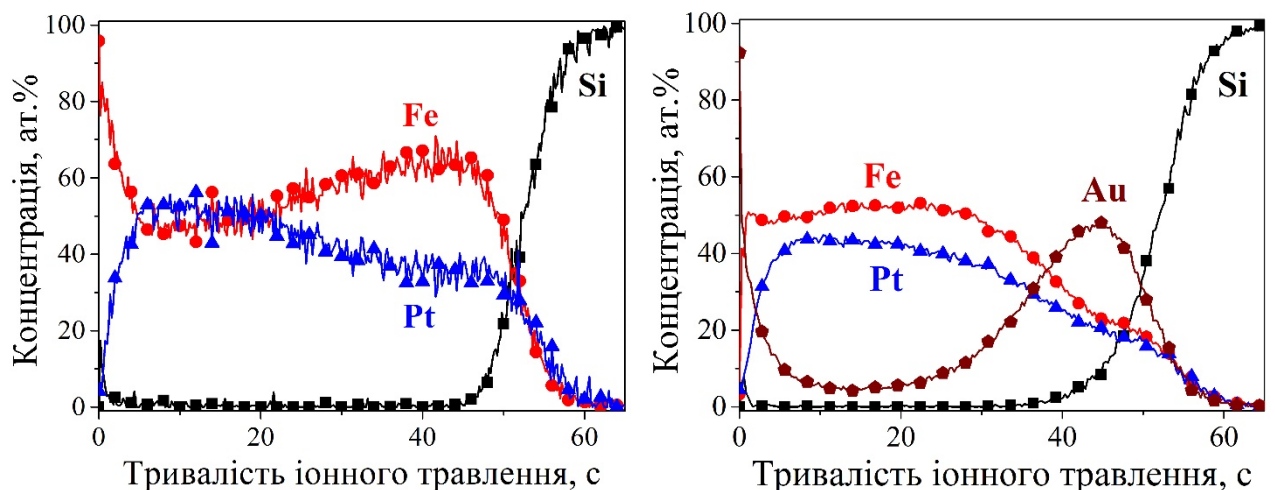


Рисунок 1 – Пошаровий розподіл компонентів плівкових композицій Pt/Fe а) та Pt/Au/Fe б) після відпалу за температури 380 °С

Додавання проміжного шару Au товщиною 10 нм до композиції Pt(15 нм)/Fe(15 нм) прискорює взаємну дифузію між Pt і Fe порівняно з

двошаровою системою в області температур $(0,3 - 0,5) T_{пл}$. Наприклад, після відпалу за температури $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ для композиції з шаром Au характерний рівномірний розподіл Fe і Pt за всією товщиною шару FePt, але такий розподіл не фіксується для двошарової системи (рис. 1). При цьому атоми Au, які в результаті дифузії Fe до шару Pt переважно накопичуються в області, що межує з підкладкою, починають інтенсивно дифундувати крізь шар FePt у напрямку до зовнішньої поверхні плівкової композиції з утворенням сегрегаційного шару. Прискорення дифузійних процесів також обумовлює більший ступень впорядкування фази $L1_0$ -FePt у системі Pt/Au/Fe порівняно з системою Pt/Fe.

Додавання шару Au також впливає на магнітні властивості плівкових гетеросистем: наприклад, коерцитивна сила композиції Pt(15 нм)/Fe(15 нм) після нагріву до температури $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ складає 4,47 кЕ, а композиції з додатковим шаром Au – 18 кЕ (рис. 2). Така різниця є наслідком прискорення дифузії атомів Fe до шару Pt і контрольованого нею формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt, а також дифузії атомів Au в напрямку вільної поверхні крізь шар FePt за зернограничним механізмом. В результаті границі зерен феромагнітної фази $L1_0$ -FePt насичуються немагнітним елементом – Au, змінюючи обмінну взаємодію між феромагнітними зернами і, тим самим, збільшуючи коерцитивну силу.

Особливістю перебігу дифузійних процесів і фазоутворення в плівкових системах Pt/Fe з додатковим шаром Tb є формування на початкових етапах термічної обробки ($T = 215\text{ }^{\circ}\text{C}$) нестабільної двокомпонентної фази Pt_2Tb . За температури $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ фіксується дифузія атомів Tb до зовнішньої поверхні з утворенням сегрегаційного шару, а також формування неупорядкованої фази $A1$ -FePt з її подальшим перетворенням на впорядковану фазу $L1_0$ -FePt за температури $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Додатковою рушійною силою дифузії Tb до зовнішньої поверхні є його хімічна взаємодія з киснем, який в залишковій формі наявний у вакуумній камері. Важливо відзначити, що Tb, як рідкісноземельний елемент, має високу спорідненість до кисню. Після відпалу за температури $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігається майже рівномірний розподіл Pt і Fe за товщиною плівкової композиції з досягненням концентраційного співвідношення цих елементів, яке наближене до еквіатомного, а на вільній поверхні формується сегрегаційний шар Tb. Стехіометрія оксидної фази, сформованої за таких умов відпалу, відповідає TbO_2 (рис. 3).

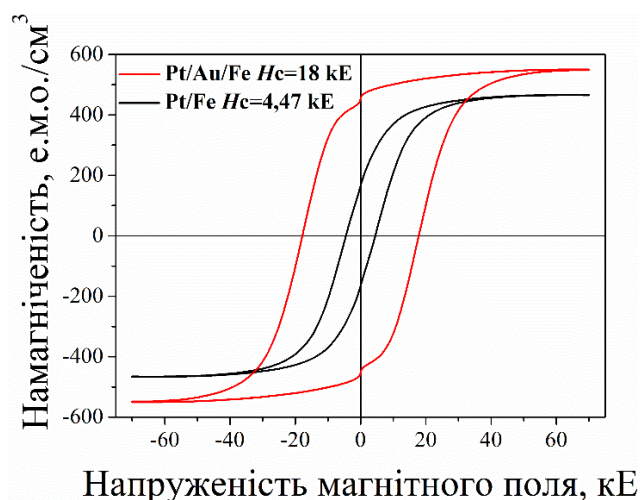


Рисунок 2 – Польові залежності намагніченості плівкових композицій Pt/Fe та Pt/Au/Fe після відпалу за температури $380\text{ }^{\circ}\text{C}$

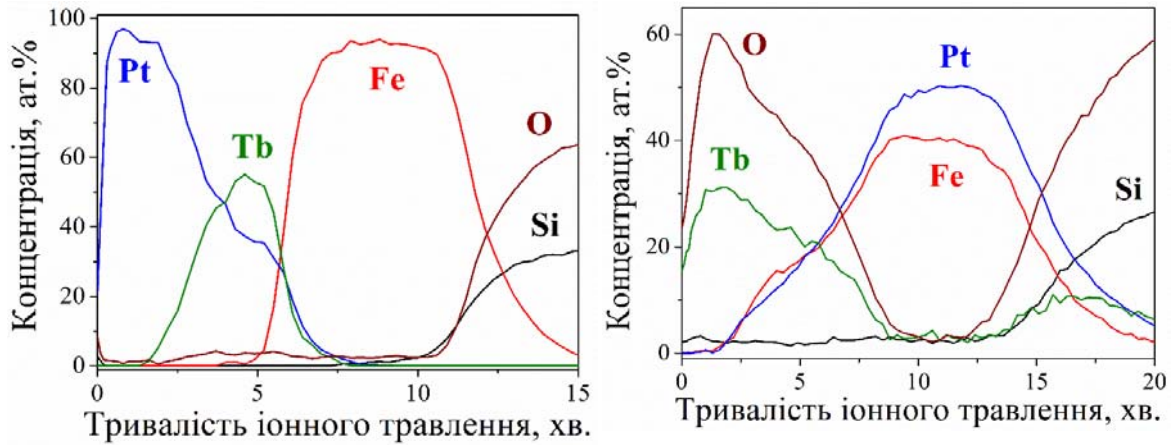


Рисунок 3 – Пошаровий концентраційний розподіл компонентів плівкової композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) після осадження та відпалу за температури 550 °С

У плівковій композиції Pt/Fe з додатковим шаром Mn в результаті відпалу за температури 260 °С формується нанокристалічна впорядкована фаза $L1_0$ -MnPt. Підвищення температури до 450 °С обумовлює формування метастабільної фази Fe_3Pt з об'ємноцентрованою кубічною кристалічною ґраткою. Подальший відпал плівкової композиції з додатковим шаром Mn до температури 500 °С активує дифузію атомів Fe в напрямку вільної поверхні крізь шар впорядкованої фази $L1_0$ -MnPt з поступовим перетворенням її на впорядковану трикомпонентну фазу $L1_0$ -FeMnPt. Фіксується перебудова ґратки фази Fe_3Pt з об'ємноцентрованої до гранецентрованої кубічної.

Підвищення температури до 620 °С обумовлює впорядкування цієї фази з формуванням структури $L1_2$ - Fe_3Pt . Зміна магнітних властивостей – коерцитивної сили і намагніченості насичення – плівкової композиції Pt(15 нм)/Mn(7,5 нм)/Fe(15 нм) зі збільшенням температури відпалу повністю узгоджується із модифікацією фазового складу (рис. 4). Суттєвих змін магнітних властивостей не спостерігається після відпалу за температур, нижчих 400 °С, що пов'язано із відсутністю дифузійної взаємодії за участю Fe.

За температур, вищих 400 °С, спостерігається лінійне зменшення значення намагніченості внаслідок дифузійного проникнення атомів Fe до кристалічної ґратки фази $L1_0$ -MnPt з відповідною компенсацією магнітних моментів Fe. Досягнення максимального значення коерцитивної сили після відпалу за температури

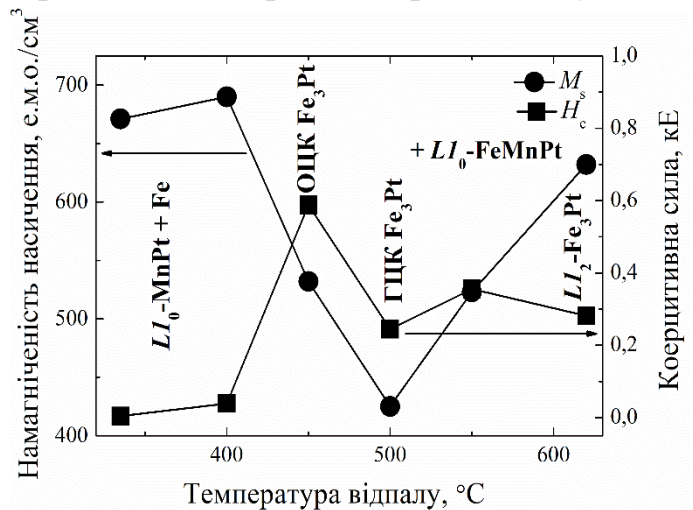


Рисунок 4 – Залежності коерцитивної сили і намагніченості насичення плівкової композиції Pt(15 нм)/Mn(7,5 нм)/Fe(15 нм) від температури відпалу

450 °C є наслідком блокування доменних стінок границями зерен фази ОЦК-Fe₃Pt. Фазовий перехід ОЦК-Fe₃Pt→ГЦК-Fe₃Pt після відпалу за температури 500 °C супроводжується зменшенням значень коерцитивної сили та намагніченості, що пояснюється парамагнітною природою фази ГЦК-Fe₃Pt за кімнатної температури. За температури 620 °C формується феромагнітна впорядкована фаза L1₂-Fe₃Pt з високою намагніченістю насичення, що обумовлює зростання загальної намагніченості зразка в 1,5 рази.

Порівняльний аналіз хімічного складу двошарової системи Pt(15 нм)/Fe(15 нм) і пліткових композицій на її основі з додатковими проміжними шарами Au, Mn і Tb за різних умов термічного впливу свідчить, що сегрегаційні потоки того чи іншого елемента до вільної поверхні або до підкладинки визначають кінцевий розподіл компонентів та фазовий склад і залежать значною мірою від ступеню спорідненості компонентів до кисню. Окиснення металу нижнього шару на зовнішній поверхні стає додатковою рушійною силою процесу дифузії оскільки градієнт його концентрації не зменшується. Зі зменшенням значення ентальпії утворення оксидної фази металу ймовірність його виходу на зовнішню поверхню із нижче розташованих шарів збільшується.

Визначено інтервали термічної стабільності технічно-актуальної фази L1₀-FePt та температуру, до якої зберігається її феромагнітне впорядкування, на основі виявленої кореляції електрорезистивних, магнітних та структурно-фазових характеристик (рис. 5);

У розділі 4 представлено результати дослідження кінетики термічно-індукованих процесів дифузії та впорядкування у нанорозмірних пліткових композиціях Pt/Fe з симетричною та асиметричною конфігурацією додаткових шарів благородних металів. Додавання проміжного шару Au до нанорозмірної системи Pt/Fe обумовлює прискорення процесів взаємної дифузії атомів Pt та Fe, формування шару невпорядкованої фази Al-FePt після часткової «холодної» гомогенізації хімічного складу, впорядкування з утворенням фази L1₀-FePt. Також додавання шару Au забезпечує втричі більше значення коерцитивної сили після відпалу впродовж 62 годин за температури 330 °C (рис. 6). Дифузійні процеси в даному випадку розвиваються за механізмом дифузійно-індукованої міграції границь зерен – різниця атомних потоків компонентів у границях зерен обумовлює зсув цих границь у напрямках, перпендикулярних до їхнього вихідного положення. В результаті формується або твердий розчин, або хімічна сполука. Прискорення процесу

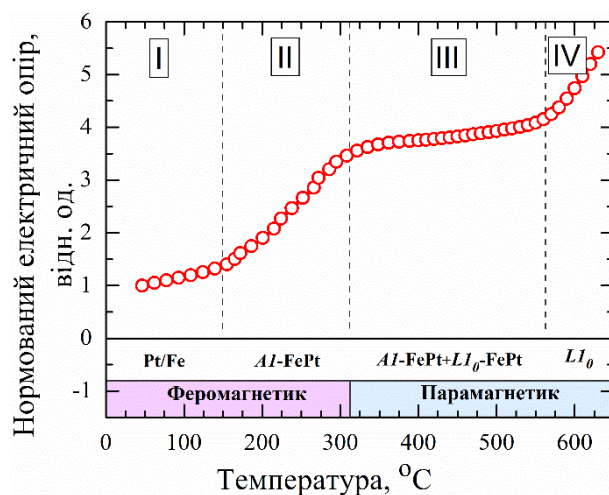


Рисунок 5 – Температурна залежність нормованого електричного опору пліткової композиції Pt(15 нм)/Fe(15 нм)

впорядкування внаслідок додавання наночару Au пояснюється впливом напружень, що виникають в процесі зернограничного формування неупорядкованої фази Al -FePt: впорядкування відбувається в тих зернах, які знаходяться під впливом стискаючих напружень уздовж напрямку $\langle 100 \rangle$.

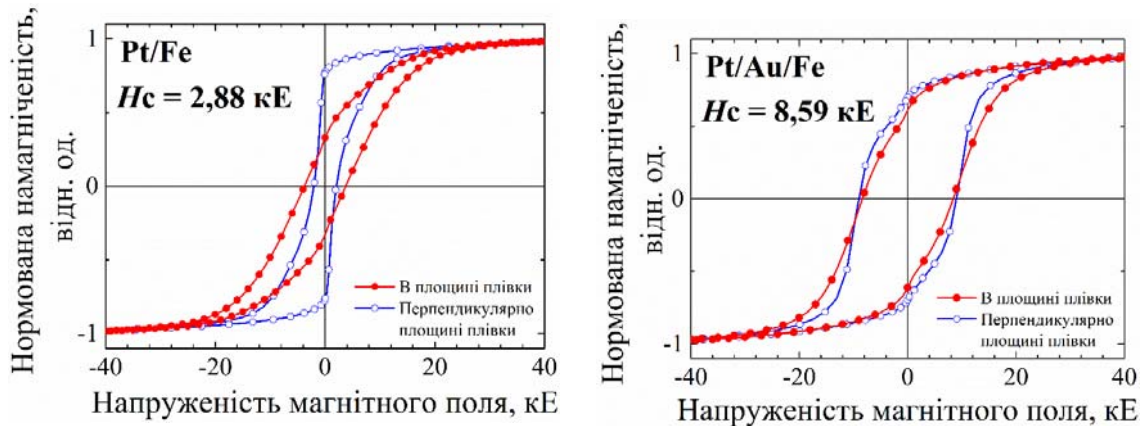


Рисунок 6 – Польові залежності намагніченості плівкових композицій Pt/Fe та Pt/Au/Fe після відпалу за температури 330 °C тривалістю 62 години

Кінетика термічно-індукованого ($\sim 0,2 T_{пл}$) процесу впорядкування структури плівкових систем залежить від характеру взаємодії матеріалу проміжного шару з іншими компонентами: в системі Pt/Au/Fe з обмеженою розчинністю компонентів (інтерметалідні фази відсутні) впорядкування структури, достатнє для реєстрації методом рентгеноструктурного аналізу, відбувається після 24 годин відпалу за температури 330 °C; в системі Fe/Ag/Pt внаслідок формування проміжної нестабільної фази Ag_xPt_{1-x} після години відпалу за температури 340 °C процес впорядкування уповільнюється – впорядкована фаза $L1_0$ -FePt формується виключно в локальних областях і не фіксується рентгенографічно навіть після 52 годин відпалу. Зміна конфігурації розташування додаткового шару Au з симетричної на асиметричну дозволяє не тільки прискорювати процес формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt у нанорозмірних композиціях на основі системи Pt/Fe із підвищенням значення коерцитивної сили, але і створювати градієнтний розподіл магнітно-твердої і магнітно-м'якої фаз в одному об'ємі плівкового матеріалу. На електронно-мікроскопічному зображенні високої роздільної здатності наочно підтверджується перехід від впорядкованої області ($L1_0$ -FePt) до неупорядкованої (Al -FePt) уздовж напрямку $\langle 001 \rangle$. Чітке чергування атомних площин Pt і Fe у впорядкованій фазі $L1_0$ -FePt спостерігається і на відповідних мапах розподілу хімічного складу високої роздільної здатності (рис. 7).

У розділі 5 представлено результати дослідження закономірностей структурно-фазових перетворень і магнітних властивостей нанорозмірних матеріалів на основі FePt з додатковими шарами легуючих і основних елементів у різних атмосферах відпалу в інтервалі температур порядку $0,3 - 0,6 T_{пл}$. Досліджувалось як саме варіюванням атмосфери термічної обробки (Ar, N₂, Ar+H₂) можна вплинути на швидкість процесів масоперенесення та впорядкування, структурні характеристики фази $L1_0$ -FePt, а також магнітні

властивості. Плівки сплаву FePt товщиною 30 нм, а також композиції на його основі з додатковими наночарами Cu і Au піддавались термічній обробці за різних температур (до 900 °С) в атмосферах проточних газів – Ar, N₂ та суміші Ar+H₂ (3 об.%).

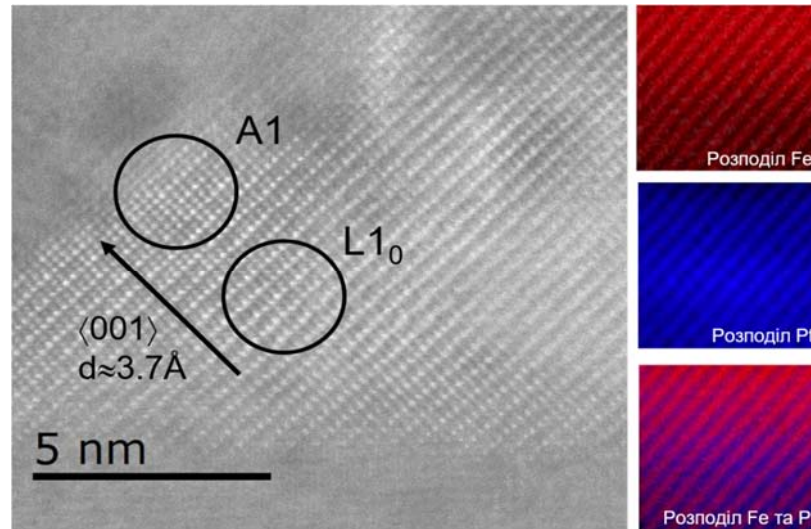


Рисунок 7 – Електронно-мікроскопічне зображення і мапи розподілу хімічного складу високої роздільної здатності для плівкової композиції на основі Pt/Fe після години відпалу за температури 450 °С

Виявлено, що ефективним засобом термічної стабілізації розміру зерен впорядкованої фази $L1_0$ -FePt і шорсткості поверхні плівкових матеріалів на основі FePt є додавання водню до нейтральної атмосфери відпалу: дифузія водню та його проникнення до кристалічної ґратки фази $L1_0$ -FePt з формуванням твердого розчину підвищують температуру рекристалізації. Склад атмосфери термічної обробки суттєво впливає і на магнітні властивості досліджуваних плівкових композицій. Цей ефект особливо яскраво проявляється на прикладі періодичної системи [FePt(15 нм)/Au(7,5 нм)/FePt(15 нм)]_{2x} після додавання водню до нейтральної атмосфери відпалу. За температури 500 °С у водневмісній атмосфері значення коерцитивної сили збільшується в 1,3 рази, а за температури 600 °С – практично вдвічі (рис. 8). Порівняльний аналіз свідчить, що суттєва відмінність магнітних характеристик систем FePt(30 нм) і [FePt(15 нм)/Au(7,5 нм)/FePt(15 нм)]_{2x} у різних атмосферах відпалу обумовлена синергетичним впливом наступних факторів – додаванням хімічно активного водню, наявністю проміжних шарів немагнітного легуючого елементу Au, а також збільшення кількості наночарів феромагнітного сплаву FePt. Абсорбція водню кристалічною ґраткою фази $L1_0$ -FePt під час відпалу обумовлює його переважну сегрегацію у найбільш дефектних областях, в першу чергу – границях зерен. Руйнування міжатомних зв'язків та підвищення рівня механічних напружень прискорюють процес дифузії атомів Au до фази $L1_0$ -FePt за зернограничним механізмом. результатом феромагнітні зерна цієї фази виявляються ізольованими немагнітним елементом і, як наслідок, – коерцитивна сила збільшується.

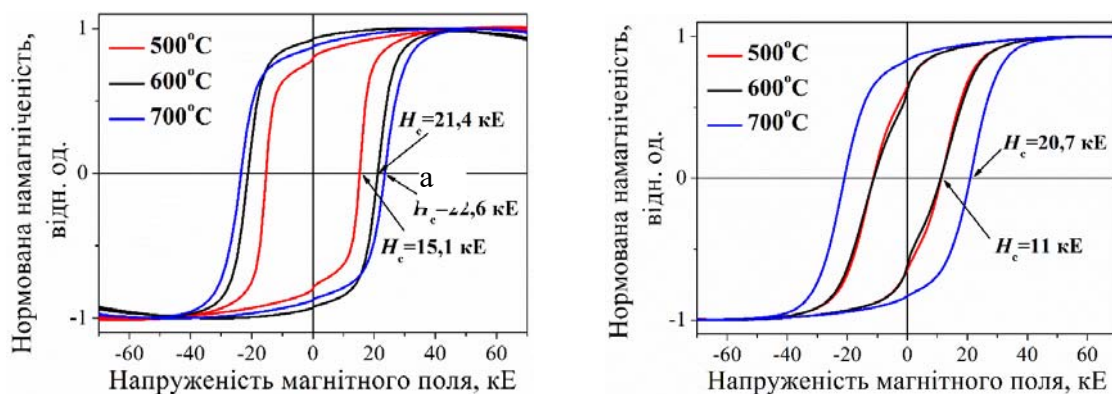


Рисунок 8 – Польові залежності намагніченості періодичної системи $[\text{FePt}(15 \text{ нм})/\text{Au}(7,5 \text{ нм})/\text{FePt}(15 \text{ нм})]_{2x}$ після відпалу в атмосферах а) Ar та б) суміші Ar+H₂ за різних температур

ВИСНОВКИ

В роботі розв'язано важливу проблему – створення наукових основ керування в широких температурних інтервалах структурно-фазовими станами і фізичними властивостями гетерогенних плівкових систем із різною конфігурацією магнітних і немагнітних наночарів, перспективних для сучасних технологій наноелектроніки та спінтроніки.

1. Додавання до нанорозмірної системи Pt/Fe магнітних і немагнітних наночарів із різною конфігурацією (послідовною, періодичною, симетричною, асиметричною тощо) дозволяє ефективно впливати на домінуючі механізми дифузії, змінювати послідовність фазових перетворень у певних температурних інтервалах, контролювати ступень впорядкування і тим самим забезпечувати широкий спектр затребуваних магнітних властивостей плівкових матеріалів.

2. Закономірності фазоутворення та напрямки дифузійного потоку атомів Me у нанорозмірних системах Pt/Me/Fe (Me – Mn, Tb, Au) за температур до $0,5 T_{\text{пл}}$ термодинамічно визначаються співвідношенням ентальпій формування оксидів проміжного Me та Fe.

3. За кореляцією електрорезистивних, магнітних та структурно-фазових характеристик в температурному інтервалі $25 \text{ }^\circ\text{C} - 620 \text{ }^\circ\text{C}$ визначено інтервали термічної стабільності технічно-актуальної фази $L1_0\text{-FePt}$ та температуру, до якої зберігається її феромагнітне впорядкування.

4. Низькотемпературне формування кінетично стабільної магнітно-твердої фази $L1_0\text{-FePt}$ у нанорозмірних плівкових композиціях Pt/Fe та Pt/Au/Fe за температур $\sim 0,2 T_{\text{пл}}$ відбувається за механізмом реакційної дифузії, індукованої рухом границь зерен; додавання проміжного шару Au до системи Pt/Fe обумовлює прискорення наступних процесів: взаємної дифузії атомів Pt та Fe, формування шару неупорядкованої фази $A1\text{-FePt}$ після часткової «холодної» гомогенізації хімічного складу, впорядкування з утворенням фази $L1_0\text{-FePt}$.

5. Кінетика термічно-індукованого ($T \sim 0,2 T_{пл}$) процесу впорядкування структури плівкових систем на основі Pt/Fe внаслідок додавання проміжного шару благородного металу залежить від характеру його взаємодії з основними компонентами: відсутність проміжних метастабільних фаз є додатковим фактором, що прискорює процес впорядкування; сформований структурно-фазовий стан забезпечує рівень магнітних характеристик, який відповідає високотемпературному інтервалу відпалу ($T = (0,6 - 0,7) T_{пл}$, $t = 30$ с).

6. Комплексний підхід, який передбачає зміну атмосфери термічної обробки з нейтральної на хімічно активну (шляхом додавання водню) та збільшення кількості наночарів феромагнітного сплаву FePt і немагнітного легуючого елемента Au з формуванням періодичної системи $[FePt/Au/FePt]_{2x}$, дозволяє вдвічі збільшити коерцитивну силу порівняно із сплавом FePt, підвищити температуру рекристалізації, стабілізувати розмір зерен впорядкованої фази $L1_0$ -FePt та поверхневу шорсткість: дифузія водню та його проникнення до кристалічної ґратки фази $L1_0$ -FePt інтенсифікує насичення границь її зерен атомами Au із одночасним гальмуванням рухливості цих границь.

7. Зміна конфігурації додаткових магнітних і немагнітних шарів з симетричної на асиметричну в нанорозмірних композиціях на основі системи Pt/Fe дозволяє не тільки прискорювати процес формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt із підвищенням значення коерцитивної сили, але і створювати градієнтний розподіл магнітно-твердої і магнітно-м'якої фаз в одному об'ємі плівкового матеріалу.

8. Запропоновані модельні уявлення щодо розвитку дифузійних процесів у гетерогенних плівкових системах із різною конфігурацією магнітних і немагнітних наночарів, а також визначені практично важливі характеристики представляють інтерес для розробки інноваційних технологій виробництва плівкових елементів і приладів наноелектроніки і спінтроники.

Зацікавленість у впровадженні результатів даної роботи виявили провідні вітчизняні компанії, що провадять діяльність у сфері мікро- та наноелектроніки – ТОВ «Грейсем Іновейшн» та ТОВ «Квазар – Мікро ДІСТІ».

Результати досліджень за темою роботи викладено у 2 монографіях (видавництва Наукова думка та Springer), 24 статтях у журналах, що індексуються Scopus (з них 20 – у англійських журналах), 1 навчальному посібнику, захищені 6 патентами на корисну модель. Індекс Гірша автора роботи за базою Scopus складає 7, загальна кількість посилань – 155 (Scopus ID – 55498048400).

Інноваційна привабливість одержаних результатів підтверджується залученням для проведення досліджень фінансуванням від Німецького дослідницького товариства (DFG) в об'ємі 1500 тис. грн., програми НАТО «Наука заради миру та безпеки» в об'ємі 1770 тис. грн. та Міністерства освіти і науки України в об'ємі 1458 тис. грн.

І.А. Владимирський



Перелік наукових публікацій І.А. Владимирського, які увійшли до роботи «Нанорозмірні плівкові структури з магнітними і немагнітними шарами для сучасних технологій спінтроніки та наноелектроніки», висунутої на здобуття щорічної премії Президента України для молодих вчених у 2022 році.

- 1) Flexible magnetoreceptor with tunable intrinsic logic for on-skin touchless human-machine interfaces / P. Makushko, E.S.O. Mata, G.S.C. Bermúdez, M. Hassan, S. Laureti, C. Rinaldi, F. Fagiani, G. Barucca, N. Schmidt, Y. Zabala, T. Kosub, R. Illing, O. Volkov, **I. Vladymyrskiy**, J. Fassbender, M. Albrecht, G. Varvaro, and D. Makarov // *Advanced Functional Materials*. – 2021. – P. 2101089 (Q1)
- 2) Self-diffusion of Fe and Pt in L1₀-ordered FePt: molecular dynamics simulation / S.I. Konorev, R. Kozubski, M. Albrecht, **I.A. Vladymyrskiy** // *Computational Materials Science*. – 2021. – №192. – P. 110337 (Q1)
- 3) A. Kaidatzis, S. Sidorenko, **I. Vladymyrskiy**, D. Niarchos / *Modern Magnetic and Spintronic Materials. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics: Springer, 2020. – 162 p. ISBN: 978-94-024-2034-0 (монографія)*
- 4) Thermally-induced phase transitions in Pt/Tb/Fe trilayers / I.O. Kruhlov, O.V. Shamis, N.Y. Schmidt, S. Gulyas, R. Lawitzki, A.P. Burmak, S.I. Konorev, G.L. Katona, G. Schmitz, M. Albrecht, **I.A. Vladymyrskiy** // *Thin Solid Films*. – 2020. – 709. – P. 138134 (Q2)
- 5) Structural phase transformations in annealed Pt/Mn/Fe trilayers / I.O. Kruhlov, O.V. Shamis, N.Y. Schmidt, M.V. Karpets, S. Gulyas, E. Hadjixenophontos, A.P. Burmak, S.I. Sidorenko, G.L. Katona, G. Schmitz, M. Albrecht, **I.A. Vladymyrskiy** // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2020. – 32. – P. 365404 (Q1)
- 6) L1₀ ordered thin films for spintronic and permanent magnet applications / A. Hafarov, S. Sidorenko, D. Makarov, **I. Vladymyrskiy** // *Modern Magnetic and Spintronic Materials. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*. – 2020. – p. 73-94.
- 7) Спосіб формування магнітного матеріалу для носія надщільного магнітного запису / **І.А. Владимирський**, А.П. Бурмак, А.Е. Гафаров / Патент на корисну модель №145723 (zareestrovano v Derzhavnomu reestri patentiv Ukrainy na korisni modeli 28.12.2020)
- 8) Phase transformations in Pt/Fe bilayers during post annealing probed by resistometry / O.V. Shamis, N.Y. Safonova, M.M. Voron, A.P. Burmak, S.I. Sidorenko, G.L. Katona, S. Gulyas, D.L. Beke, M. Albrecht and **I.A. Vladymyrskiy** // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2019. – 31. – P. 285401 (Q1)
- 9) Oxidation and reduction processes in Ni/Cu/Cr/Si(100) thin films under low-energy ion irradiation / I.O. Kruhlov, **I.A. Vladymyrskiy**, O. Dubikovskiy, S.I. Sidorenko, T. Ebisu, K. Kato, O. Sakata, T. Ishikawa, Y. Iguchi, G.A. Langer,

Z. Erdélyi and S.M. Voloshko // Materials Research Express. – 2019.– №6. – P. 1264313 (Q2)

10) Вплив атмосфери відпалу на магнетні властивості нанорозмірних плівок стопу FePt / І.О. Круглов, В.В. Могилко, **І.А. Владимирський**, Ю.М. Макогон, М.О. Васильєв, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко // Металофізика та новітні технології. – 2019. – т.41. – №2. – с. 157-171 (Q3)

11) Спосіб визначення температури Кюрі в тонкоплівкових нанорозмірних феромагнітних композиціях / **І.А. Владимирський**, О.В. Шаміс, С.М. Волошко, С.І. Сидоренко / Патент на корисну модель №132717 (zareestrovano v Derzhavnomu reestri patentiv Ukraini na korisni modeli 11.03.2019)

12) Diffusion of Au and its influence on the coercivity of [FePt/Au/FePt]_{2x} thin films during annealing in different atmospheres / A.K. Orlov, O.O. Zhabynska, **I.A. Vladymyrskiy**, S.M. Voloshko, S.I. Sidorenko, K. Kato, T. Ishikawa // Thin Solid Films.– 2018. – 658. – p. 12-21 (Q2)

13) Synchrotron analysis of structure transformations in V and V/Ag thin films / A.K. Orlov, I.O. Kruhlov, O.V. Shamis, **I.A. Vladymyrskiy**, I.E. Kotenko, S.M. Voloshko, S.I. Sidorenko, T. Ebisu, K. Kato, H. Tajiri, O. Sakata, T. Ishikawa // Vacuum. – 2018. – 150. – p. 186-195 (Q2)

14) Materials science aspects of FePt-based thin films' formation / O.V. Shamis, **I.A. Vladymyrskiy**, Yu.M. Makogon, and S.I. Sidorenko // Progress in Physics of Metals. – 2018. – 19. – №3. – p. 337-363 (Q2)

15) **І.А. Владимирський**, Ю.М. Макогон, С.І. Сидоренко / Дифузійне формування нанорозмірних матеріалів на основі FePt – Київ: Наукова думка, 2017. – 342 с. (монографія)

16) Low-temperature formation of the FePt phase in the presence of an intermediate Au layer in Pt/Au/Fe thin films / **I.A. Vladymyrskiy**, A.E. Gafarov, A.P. Burmak, S.I. Sidorenko, G.L. Katona, N.Y. Safonova, F. Ganss, G. Beddies, M. Albrecht, Yu.N. Makogon, and D.L. Beke // Journal of Physics D: Applied Physics. –2016. – №49. – P. 035003 (Q1)

17) Effect of copper on the formation of ordered L1₀(FePt) phase in nanosized Fe₅₀Pt₅₀/Cu/Fe₅₀Pt₅₀ films on SiO₂/Si (001) substrates / T.I. Verbitskaya, E.V. Figurnaya, M.Yu. Verbitskaya, **I.A. Vladymyrskiy**, S.I. Sidorenko, E.P. Pavlova, Yu.N. Makogon // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. –2016. – №55. – p. 109-113 (Q3)

18) Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів / В.В. Холявко, **І.А. Владимирський**, О.О. Жабинська. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 156 с. (навчальний посібник)

19) Вплив проміжних шарів Ag і Cu на температурні інтервали фазових перетворень у плівкових композиціях Pt/Fe / О.С. Небога, М.О. Перваков, С.І. Сидоренко, **І.А. Владимирський** // Металофізика та новітні технології. – 2016. – т.38. – №12. – с. 1599-1609 (Q3)

- 20) FePt thin films – prospective materials for ultrahigh density magnetic recording / **I.A. Vladymyrskiy**, A.I. Oleshkevych, S.I. Sidorenko, Yu.N. Makogon // Journal of Nano Research. –2016. –№39. –p. 151-161 (Q3)
- 21) Ефект «дифузійного насосу» в нанорозмірних металевих композиціях / А.І. Олешкевич, О.В. Науменко, **І.А. Владимирський**, С.М. Волошко, С.І. Сидоренко // Металофізика та новітні технології. – 2016. – т.38. – №5. – с. 669-682 (Q3)
- 22) Спосіб формування магнітного матеріалу на основі FePt / С.І. Сидоренко, Ю.М. Макогон, **І.А. Владимирський**, А.Е. Гафаров // Патент на корисну модель №107864 (zareestrovano v Derzhavnomu reestri patentiv Ukraini na korisni modeli 24.06.2016)
- 23) Diffusion and solid state reactions in Fe/Ag/Pt and FePt/Ag thin-film systems / G.L. Katona, N.Y. Safonova, F. Ganss, **I.A. Vladymyrskiy**, S.I. Sidorenko, Yu.N. Makogon, G. Beddies, M. Albrecht, D. Beke // Journal of Physics D: Applied Physics. –2015. –№48. –P. 175001 (Q1)
- 24) Nanoscale diffusion in Pt⁵⁶Fe⁵⁷Fe thin-film system / A. Tynkova, G.L. Katona, G. Erdelyi, L. Daroczi, A.I. Oleskevych, I.A. Vladymyrskiy, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, D.L. Beke // Thin Solid Films. – 2015.– №589. – p. 173-181 (Q1)
- 25) Дифузійне фазоутворення в нанорозмірних шаруватих плівкових композиціях Pt(15 нм)/Fe(15 нм) і [Pt(7,5 нм)/Fe(7,5 нм)]₂ на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001) / Ю.М. Макогон, О.П. Павлова, С.І. Сидоренко, Т.І. Вербицька, **І.А. Владимирський**, О.В. Фігурна, І.О. Круглов // Металлофізика и новейшие технологии. – 2014. – т. 36. – №10. – с. 1359-1369 (Q3)
- 26) Спосіб формування магнітного матеріалу на основі FePt з орієнтованою структурою зерен L1₀(FePt) фази для перпендикулярного або повздовжнього магнітного запису і зберігання інформації / Ю.М. Макогон, О.П. Павлова, С.І. Сидоренко, **І.А. Владимирський**, О.В. Фігурна, М.Ю. Вербицька // Патент на корисну модель №98785 (zareestrovano v Derzhavnomu reestri patentiv Ukraini na korisni modeli 12.05.2015)
- 27) Grain boundary diffusion induced reaction layer formation in Fe/Pt thin films / G.L. Katona, **I.A. Vladymyrskiy**, I.M. Makogon, S.I. Sidorenko, F. Kristaly, L. Daroczi, A. Csik, A. Liebig, G. Beddies, M. Albrecht, D.L. Beke // Applied Physics A: Materials Science and Processing. – 2014.–115.– p. 203-211 (Q2)
- 28) Influence of intermediate Ag layer on the structure and magnetic properties of Pt/Ag/Fe thin films / **I.A. Vladymyrskiy**, O.P. Pavlova, T.I. Verbitska, S.I. Sidorenko, G.L. Katona, D.L. Beke, I.M. Makogon // Vacuum. – 2014.– №101.– p. 33-37 (Q2)
- 29) Спосіб формування магнітного матеріалу на основі шаруватої нанорозмірної плівки Fe₅₀Pt₅₀/Ag/Fe₅₀Pt₅₀ для запису і зберігання інформації / Ю.М. Макогон, О.П. Павлова, С.І. Сидоренко, **І.А. Владимирський**, О.В. Фігурна, М.Ю. Вербицька // Патент на корисну модель №94883

(zareestrovano v Derzhavnomu reestri patentiv Ukraini na korisni modeli 10.12.2014)

30) Spisib formuvannya magnitnogo materialu na osnovi FePt dla zapysu i zberigannya informatsii / Yu.M. Makogon, O.P. Pavlova, S.I. Sidorenko, **I.A. Vladymyrskiy** // Patent na korisnu model' №88888 (zareestrovano v Derzhavnomu reestri patentiv Ukraini na korisni modeli 10.04.2014)

31) Influence of the substrate choice on the L1₀ phase formation of post-annealed Pt/Fe and Pt/Ag/Fe thin films / **I.A. Vladymyrskiy**, M.V. Karpets, G.L. Katona, D.L. Beke, S.I. Sidorenko, T. Nagata, T. Nabatame, T. Chikyow, F. Ganss, G. Beddies, M. Albrecht, Iu.M. Makogon // Journal of Applied Physics. – 2014. – №116. – P. 044310 (Q1)

32) Influence of the annealing atmosphere on the structural properties of FePt thin films / **I.A. Vladymyrskiy**, M.V. Karpets, F. Ganss, G.L. Katona, D.L. Beke, S.I. Sidorenko, T. Nagata, T. Nabatame, T. Chikyow, G. Beddies, M. Albrecht, I.M. Makogon // Journal of Applied Physics. – 2013.– №114. – P.– 164314 (Q1)

33) Structural and magnetic properties of annealed FePt/Ag/FePt thin films / O.P. Pavlova, T.I. Verbitska, **I.A. Vladymyrskiy**, S.I. Sidorenko, G.L. Katona, D.L. Beke, G. Beddies, M. Albrecht, I.M. Makogon // Applied Surface Science. – 2013.– №266. – p. 100-104 (Q1)

Заступник начальника науково-дослідної частини, доцент кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки КІП ім. Ігоря Сікорського



Ігор ВЛАДИМИРСЬКИЙ

Учений Секретар КІП ім. Ігоря Сікорського



Валерія ХОЛЯВКО