

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ВЕРБИЦЬКА МАРИНА ЮРІЇВНА**



УДК 539.216.2:661.685

**ФАЗОВИЙ СКЛАД, СТРУКТУРА І МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ  
НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВКОВИХ КОМПОЗИЦІЙ FePt З ДОДАТКОВИМИ  
ШАРАМИ Au**

Спеціальність 05.16.01 – Металознавство та термічна обробка металів

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізики металів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Макогон Юрій Миколайович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри фізики металів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Шипицин Сергій Якович,**  
Фізико-технологічний інститут  
металів та сплавів НАН України  
завідувач відділу дисперсійного зміцнення сплавів


доктор технічних наук, професор  
**Мазанко Володимир Федорович,**  
Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова  
НАН України, головний науковий співробітник  
відділу фізики атомних транспортних процесів №50

Захист відбудеться «03» грудня 2019 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. № 9, ауд. 203.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці імені Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, НТБ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Автореферат розісланий «29» жовтня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12  
кандидат технічних наук, доцент



В. Степанов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Технологія магнітного запису вдосконалюється з метою збільшення щільності запису і зберігання інформації. В останні роки технологія повздовжнього запису була змінена на перпендикулярний, у якому магнітні домени орієнтуються перпендикулярно поверхні плівки і напрямку руху записуючої головки.

Технологія термічно-активованого магнітного запису (ТАМЗ) на плівковій носії з надвисокою щільністю запису і зберігання (до  $\approx 5$  Тбіт/см<sup>2</sup>), що розробляється, дозволяє значно збільшити щільність запису. Нанорозмірні плівки на основі сплаву Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub> з упорядкованою фазою L1<sub>0</sub>-FePt є перспективним матеріалом для створення носіїв інформації завдяки її великій енергії магнітокристалічної анізотропії ( $K_u = 7 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>), що перешкоджає переходу в суперпарамагнітний стан зі зменшенням об'єму зерна. При осадженні на ненагріту підкладку для формування магнітно-твердої фази L1<sub>0</sub>-FePt з неупорядкованої магнітно-м'якої фази A1-FePt зазвичай необхідно провести наступний відпал при температурах вище за 500 °С. Зниження температури формування фази L1<sub>0</sub>-FePt, зменшення розміру зерен, підвищення їх термічної стабільності, контроль орієнтації вісі легкого намагнічування  $c$  паралельно або перпендикулярно до площини плівки, зменшення шорсткості поверхні, підвищення коерцитивної сили є головними матеріалознавчими завданнями при створенні наукових основ технології ТАМЗ.

З аналізу робіт в цьому напрямку витікає, що внутрішній напружено/деформаційний стан в тонких плівках може грати істотну роль у проходженні процесу формування магнітно-твердої фази L1<sub>0</sub>-FePt.

Одним із шляхів прискорення процесу впорядкування може бути використання енергії меж поділу і енергії напруженого стану, що створюються в плівковій композиції в результаті введення додаткових шарів третього елемента з низькою поверхневою енергією (Ag, Cu, Au). Ці енергії можна використовувати як екстра-рушійну силу, що сприяє дифузійній перебудові атомів Fe і Pt і формуванню впорядкованої фази L1<sub>0</sub>-FePt з високими значеннями коерцитивної сили  $H_c$  і намагніченості насичення  $M_s$ . Крім того, це дозволяє створити в плівці магнітно-тверді і магнітно-м'які шари, що необхідно для технології ТАМЗ.

Напружений стан у плівках на основі FePt викликаний термічними напруженнями внаслідок різниці між коефіцієнтами термічного розширення шарів плівки і підкладки; напруженнями, які виникають при фазовому перетворенні A1-FePt  $\rightarrow$  L1<sub>0</sub>-FePt за рахунок зміни об'ємів елементарних ґраток неупорядкованої і впорядкованої фаз і напруженнями, пов'язаними з невідповідністю параметрів елементарної ґратки фази FePt і шаром легуючого елемента.

На механічні напруження у плівках в процесі осадження на підкладку впливає ряд факторів: взаємне розташування шарів, кількість шарів плівкової композиції, товщина окремого шару, умови відпалу (газове середовище – вакуум, водень, азот та швидкості нагрівання і охолодження). Однак, загальні закономірності та механізм впливу механічних напружень на процес дифузійного формування фазового складу, структури та магнітні властивості у нанорозмірних плівках на основі FePt не можна вважати встановленими повною мірою. Насьогодні залишаються нерозв'язаними матеріалознавчі задачі контролю та застосуванню механічних напружень, які виникають у плівках під час осадження та відпалів, для

зниження температури формування впорядкованої фази, росту зерен фази  $L1_0$  з орієнтацією вісі легкого намагнічування  $c$  перпендикулярно або паралельно площині півки та збільшення коерцитивної сили. Вирішення цих задач необхідне для впровадження нанорозмірних плівок на основі FePt в якості середовища для термічно стабільного магнітного запису і зберігання інформації підвищеної щільності.

Таким чином, дослідження впливу напруженого стану на фазові та структурні перетворення при формуванні впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt, орієнтацію вісі легкого намагнічування  $c$  і зміну магнітних властивостей при термічній обробці у плівкових композиціях з шарами Fe, Pt,  $Fe_{50}Pt_{50}$ , Au, що мають перспективу практичного використання, є актуальним як у науковому, так і в практичному відношеннях.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі фізики металів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» як складова частина науково-дослідних робіт: № 2306-ф «Формування стабільних нанорозмірних магнітних плівок FePt для надвеликої щільності запису і збереження інформації» (номер держреєстрації 0110U001316); № 2607-ф «Формування нанорозмірних магнітно-твердих плівок FePt, легованих Ag, Au, Cu, для підвищення щільності магнітного запису і збереження інформації» (номер держреєстрації 0113U002512); № 2915-ф «Формування фазового складу, структури плівок FePd, FePt – середовища магнітного запису і зберігання інформації підвищеної щільності» (номер держреєстрації 0116U003691) та за грантами ДААД в рамках програми ім. Л. Ейлера (Німеччина): грант №55576194 (2012-2013 рр.) «Вплив Au на формування  $L1_0$  фази в плівках FePt/Au/FePt на підкладках  $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$ », грант №57042790 (2013-2014 рр.), грант 57094397 (2014- 2015 рр.), грант № 57198300 (2015-2016 рр.).

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягає у визначенні закономірностей формування фазового складу, структури і магнітних властивостей в нанорозмірних плівкових композиціях з додатковими шарами золота  $Fe_{50}Pt_{50}$ -Au і шарів металів Pt/Fe на підкладках  $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$  та  $Al_2O_3(10\bar{1}0)$ .

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні наукові **завдання дослідження**:

- встановити вплив додаткового шару Au, його товщини, розташування, кількості шарів на напружений стан, фазовий склад, структуру і магнітні властивості в плівкових композиціях  $Fe_{50}Pt_{50}$ -Au на підкладках  $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$  при відпалах;
- визначити вплив умов відпалу (температури, тривалості, швидкості нагріву, атмосфери відпалу (вакуум, азот, водень)) на напружений стан та формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt, її структуру (розмір зерен, орієнтацію) і магнітні властивості в плівкових композиціях  $Fe_{50}Pt_{50}$ -Au,  $[Pt/Fe]_n$  ( $n = 1, 4, 8$ );
- з'ясувати вплив розташування додаткового шару Au при відпалах *in situ* на фазовий перехід  $A1$ -FePt  $\rightarrow$   $L1_0$ -FePt в плівкових композиціях  $Fe_{50}Pt_{50}$ -Au, відокремлених від підкладок;
- визначити вплив типу підкладок ( $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$ ,  $Al_2O_3(10\bar{1}0)$ ) на напружений стан, фазовий перехід  $A1$ -FePt  $\rightarrow$   $L1_0$ -FePt, орієнтований ріст

зерен та магнітні властивості в плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_n$  ( $n = 1, 4, 8$ ) при відпалах;

- розробити рекомендації щодо контролю напруженого стану у плівкових композиціях на основі  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  для:
  - зниження температури утворення,
  - збільшення коерцитивної сили,
  - орієнтації вісі легкого намагнічування  $c$  у зернах фази  $L1_0\text{-FePt}$  перпендикулярно, або паралельно площині плівки.

*Об'єкт дослідження* – термічно активовані процеси фазоутворення у нанорозмірних плівкових композиціях шарів сплаву  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  з різною товщиною (7,5 нм – 30 нм) проміжного шару золота, кількістю шарів  $[\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}]_n$  ( $n=1, 2$ ), з різним розташуванням шару золота  $\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ ;  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ ;  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}$ , а також в композиціях шарів металів  $[\text{Pt/Fe}]_n$  ( $n=1, 4, 8$ ) після відпалів в різних середовищах (вакуум, азот, водень).

*Предмет дослідження* – фазовий склад, структура, рівень напруженого стану та магнітні властивості нанорозмірних плівок  $[\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/(7,5 \text{ нм} - 30 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}]_n$  ( $n = 1, 2$ ),  $\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ ,  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}$ ;  $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$  (15 нм),  $[\text{Pt/Fe}]_n$  ( $n = 1, 4, 8$ ) на підкладках  $\text{SiO}_2$  (100 нм)/ $\text{Si}(001)$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10  $\bar{1}0$ )

**Методи дослідження.** Товщина плівок, що були осаджені магнетронним методом на підкладки за кімнатної температури, контролювалась за допомогою вимірювання частоти кварцового резонатора, яка змінювалась зі зміною товщини, а також - розрахунком спектрів хімічного складу плівки і модулюванням тієї товщини методом резерфордівського зворотного розсіювання. В роботі використано комплекс сучасних методів фізичного матеріалознавства: визначення фазового складу і структури плівкових композицій здійснювалось методом рентгеноструктурного фазового аналізу на дифрактометрах ДРОН УМ-1, BRUKER D8 DISCOVER та Rigaku Ultima IV зі сцинтиляційними лічильниками у випроміненнях  $\lambda_{\text{K}\alpha, \beta}\text{-Fe}$  та  $\lambda_{\text{K}\alpha}\text{-Cu}$ . Електричний опір вимірювався чотирьохзондовим методом, морфологія поверхні досліджувалась за допомогою атомно-силової мікроскопії; хімічний аналіз проводився методом резерфордівського зворотного розсіювання. Магнітні властивості визначалися методами SQUID-магнітометрії, магнітометрії на основі магнітооптичного ефекту Керра та магнітно-силової мікроскопії (МСМ).

**Наукова новизна одержаних результатів.** Результати, що представлено в дисертаційній роботі, є наслідком розв'язання поставлених оригінальних наукових завдань. У рамках дисертаційного дослідження вперше встановлено, що контролюючи напружений стан у шарі  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  зміненням товщини, розташування, кількості додаткових шарів Au, швидкості нагріву та атмосфери при відпалі, можна керувати формуванням фазового складу, структурою та магнітними властивостями в плівкових композиціях:

1. Вперше показано, що стискаючі напруження зі збільшенням товщини проміжного шару Au до 30 нм сприяють зниженню температури упорядкування та росту зерен фази  $L1_0$  з розташуванням вісі легкого намагнічування  $c$  у площині плівки.

2. Виявлено, що застосування атмосфери водню прискорює процеси формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt в плівках  $Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}$  порівняно з відпалом у вакуумі, за рахунок втілення атомів водню у порожнечі кристалічної ґратки фази  $L1_0$ -FePt. Це створює додаткові стискаючі напруження та дозволяє отримати високе значення коерцитивної сили ( $\sim 27,3$  кЕ) за меншої температури відпалу.

3. Встановлено, що в плівках з різним розташуванням шару Au, відокремлених від підкладки, зберігається така ж тенденція зміни температури фазового перетворення  $A1 \rightarrow L1_0$ , як і в плівках на підкладці: в плівці з проміжним шаром Au(7,5 нм) нижча температура початку впорядкування, ніж в плівках  $Au/Fe_{50}Pt_{50}$  та  $Fe_{50}Pt_{50}/Au$ .

4. Показано, що орієнтований ріст зерен фази  $L1_0$ -FePt з віссю легкого намагнічування  $c$  в напрямку  $[001]$  можна отримати в композиціях  $[Pt/Fe]_n$  ( $n=4, 8$ ) на підкладках  $SiO_2(100 \text{ нм})/Si(001)$  при застосуванні швидкого термічного відпалу (RTA) завдяки створенню розтягуючих деформацій в площині плівки за рахунок швидкого зменшення об'єму при фазовому перетворенні  $A1 \rightarrow L1_0$ -FePt.

5. Встановлено, що змінюючи величину напруження, яке виникає через різницю коефіцієнтів термічного розширення плівки і підкладки у багатошарових плівкових композиціях  $[Fe_{50}Pt_{50}/Au(7,5 \text{ нм})/Fe_{50}Pt_{50}]_n$  та  $[Pt/Fe]_n$ , можна контролювати температуру формування впорядкованої фази  $L1_0$  та її магнітні властивості. Більший рівень стискаючих напружень в плівці на підкладці  $SiO_2(100 \text{ нм})/Si(001)$  ( $\alpha=2,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) порівняно з напруженнями, що створюються на підкладці  $Al_2O_3$  ( $\alpha=5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) призводить до формування більшої кількості впорядкованої фази  $L1_0$ .

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані в роботі наукові результати і встановлені фізичні закономірності мають практичний інтерес для створення матеріалів, що використовуються в якості носіїв магнітного запису з підвищеною щільністю. Розроблено рекомендації щодо контролю напруженого стану і процесу формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt, отримання орієнтації вісі легкого намагнічування  $c$  перпендикулярно, або паралельно площині плівки у плівках на основі FePt, застосування яких дозволить підвищити щільність магнітного запису і зберігання інформації термоактивованим методом. Результати роботи використовуються також у навчальному процесі в КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема, при виконанні лабораторних робіт з дисципліни «Матеріалознавство функціональних тонких плівок та покриттів» та дипломних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Автором самостійно проведено аналіз літературних джерел, термообробку у вакуумі і водні та резистометричний аналіз зразків, атомно-силову мікроскопію, визначення магнітних властивостей зразків методом МОКЕ, аналіз та інтерпретацію отриманих результатів рентгеноструктурного фазового аналізу, резерфордівського зворотного розсіювання, АСМ, МСМ, SQUID. Автор приймала участь у підготовці, оформленні матеріалів до публікацій та написанні статей і тез доповідей на конференціях. Усі основні результати даного дослідження отримано автором особисто. Постановка мети, завдань дослідження та обговорення результатів виконані спільно з науковим керівником, і, частково, із співавторами публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати й окремі розділи дисертаційної роботи були представлені і обговорювалися на таких наукових конференціях: IV Міжнародна наукова конференція «Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии» НАНСИС-2013, (Україна, Київ, 2013); Міжнародна наукова конференція MRS- 2014 Fall Meeting (Poland, Warsaw, 2014); Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів (Україна, Тернопіль, 2014); 5-та Міжнародна науково-практична конференція «Структурная релаксация в твердых телах» (Україна, Вінниця, 2015); VI International Conference for Young Scientists Low temperature physics (ICYS–LTP–2015) (Ukraine, Kharkiv, 2015); Міжнародна наукова конференція E-MRS-2015 Fall Meeting (Poland, Warsaw, 2015); 5-та Міжнародна наукова конференція HighMatTech (Україна, Київ, 2015); Міжнародна наукова конференція E-MRS-2016 Fall Meeting (Poland, Warsaw, 2016); Міжнародна наукова конференція E-MRS-2017 Spring Meeting (Strasbourg, France, 2017); Міжнародна наукова конференція Nanotechnology and nanomaterials НАНО-2017 (Україна, Чернівці, 2017); Міжнародна наукова конференція E-MRS-2017 Fall Meeting (Poland, Warsaw, 2017); Міжнародна наукова конференція Nanotechnology and nanomaterials НАНО-2018 (Україна, Київ, 2018); International Workshop on "Topological Structures in Ferriic Materials" ТОРО-2018 (Natal, Brazil, 2018); Junior EUROMAT Conference 2018 (Budapest, Hungary, 2018); Міжнародна наукова конференція E-MRS- 2018 Spring Meeting (Strasbourg, France), Міжнародна наукова конференція E-MRS-2018 Fall Meeting (Poland, Warsaw, 2018), IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology ELNANO-2019 (Київ, Україна, 2019 р.)

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 29 наукових праць, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, 2 патенти на корисну модель, 1 стаття та 17 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (151 найменування) та додатків. Викладена на 223 сторінках машинописного тексту, містить 1 таблицю, 169 рисунків, 1 додаток. Основний зміст дисертації становить 179 сторінок.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації та сформульовано мету та завдання дослідження. Показано зв'язок роботи з науковими темами і програмами. Наведено основні результати, отримані в дисертаційній роботі, відзначено їх наукову новизну та практичне значення, сформульовано основні положення та результати, що виносяться на захист, визначено особистий внесок автора.

**У першому розділі** дано огляд літературних даних та охарактеризовано розвиток технологій магнітного запису та їх перспективи використання у майбутньому. Показано, що нанорозмірні плівки на основі FePt є перспективним матеріалом для магнітного запису з надвеликою щільністю. Дано характеристики фазових перетворень у системах Fe-Pt, Fe-Au, Au-Pt. Проаналізовано вплив додаткових шарів легуючих елементів та механічних напружень на зміну структурно-фазового складу у плівках Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>. Сформульовано мету та основні завдання дослідження.

У другому розділі описані методи виготовлення, параметри термічної обробки та експериментальні методи дослідження структурно-фазового стану і магнітних властивостей нанорозмірих плівкових композицій  $[\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}]_n$  ( $n=1, 2$ ),  $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$  (15 нм), з різним розташуванням шару золота –  $\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ ,  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ ,  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}$ , багат шарових композицій  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_n$  ( $n=1, 4, 8$ ).

Нанорозмірні плівкові композиції отримувались методом магнетронного осадження з мішеней Fe, Pt, Au на підкладки термічно окисненого монокристалічного кремнію  $\text{SiO}_2(100\text{ нм})/\text{Si}(001)$  та сапфіру  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$  за кімнатної температури. Товщина шарів плівкових композицій, що контролювалася після осадження за допомогою методів Резерфордівського зворотного розсіювання та рентгенівської рефлектометрії, наведена в табл. 1. Точність її вимірювання складає  $\pm 0,5$  нм.

Табл. 1. Товщина шарів плівкових композицій

Тонкоплівкова композиція	Товщина шарів, нм		
	1-й шар	2-й шар	3-й шар
$\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$	15	7,5-30	15
$[\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}]_2$	15	7,5	15
$\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$	7,5	15	-
$\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}$	15	7,5	-
$\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$	15	-	-
Pt/Fe	15	15	-
Pt/Fe	21	16	-
$[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$	4,2	3,2	-
$[\text{Pt}/\text{Fe}]_8$	2,1	1,6	-

Після осадження зразки піддавались термічній обробці у вакуумі не нижче  $10^{-3}$  Па, в атмосфері водню та  $\text{N}_2$ . Фізико-технологічні параметри термічної обробки наведено в табл. 2. Відпал *in situ* проводили у колоні електронографу EMP-100.

Табл. 2. Фізико-технологічні параметри термічної обробки зразків

Відпал	Вакуум	В атмосфері $\text{N}_2$	В атмосфері $\text{H}_2$
Температура, $^{\circ}\text{C}$	300 – 900	500 – 900	500 – 800
Витримка, с	30 – 3600	30	30
Швидкість нагріву, $^{\circ}\text{C}/\text{c}$	5	30, 400	1

Для дослідження фазового складу, структури використано рентгеноструктурний фазовий аналіз – зйомку на дифрактометрах ДРОН УМ-1 (випромінювання  $\lambda_{\text{K}\alpha\beta}\text{-Fe}$ ,  $\lambda_{\text{K}\alpha\beta}\text{-Cu}$ ), BRUKER D8 DISCOVER, Ultima IV Rigaku (випромінювання  $\lambda_{\text{K}\alpha}\text{-Cu}$ ) та трансмісійну електронну мікроскопію.

Залишкові напруження та деформації у шарах  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  оцінювали за допомогою методу рентгенівської тензометрії –  $\sin^2\psi$ . Хімічний склад плівкових композицій після осадження визначався методом Резерфордівського зворотного розсіювання з точністю  $\pm 1$  ат.% при використанні іонів  $\text{He}^+$ . Електричний опір зразків після осадження та відпалів вимірювався чотирьохзондовим методом. Морфологія поверхні плівок досліджена методом атомно-силової мікроскопії

(ACM) (Nanoscope Dimension 3100). Магнітні властивості були оцінені за допомогою вібраційного магнітометра MPMS SQUID VSM (Quantum Design), магнітометрії на основі магнітооптичного ефекту Керра (MOKE) та магнітно-силовою мікроскопією (Nanoscope Dimension 3100).

Ступінь упорядкування фази  $L1_0$ -FePt та її об'ємна доля визначалися за відношенням параметрів ґратки  $c/a$  та інтенсивностей дифракційних рефлексів  $I(001)/I(002)$ . Параметр упорядкування дальнього порядку оцінювали за формулою:

$$S = 0,85 \left[ \frac{I(001)}{I(002)} \right]^{1/2}$$

Орієнтація вісі легкого намагнічування  $c$  у напрямку  $[001]$ , перпендикулярному до поверхні плівки, визначався за відношеннями інтегральних інтенсивностей рефлексів  $I(001)/I(111)$ ,  $I(002)/I(111)$ . Розмір зерен фази FePt був оцінений за формулою Дебая-Шеррера за рефлексом  $(111)$  FePt:  $d = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}$ ; де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання,  $\beta$  – ширина піку на половині висоти,  $\theta$  – кут дифракційного максимуму,  $k = 0,9$ .

У третьому розділі представлено результати дослідження формування фазового складу у нанорозмірних плівкових композиціях  $Fe_{50}Pt_{50}/Au(x \text{ нм})/Fe_{50}Pt_{50}$  ( $x = 7,5; 15; 20; 30 \text{ нм}$ ) на підкладках  $SiO_2(100 \text{ нм})/Si(001)$  при відпалах у різних атмосферах (вакуум, водень, азот) в температурному інтервалі  $300 \text{ }^\circ\text{C} - 900 \text{ }^\circ\text{C}$ , проаналізовано вплив товщини проміжного шару золота на напружений стан, температуру початку фазового перетворення  $A1\text{-FePt} \rightarrow L1_0\text{-FePt}$ , орієнтацію вісі легкого намагнічування  $c$  у зернах фази  $L1_0$  та магнітні властивості.

В осаджених шарах сплаву  $Fe_{50}Pt_{50}$  формується невпорядкована фаза  $A1\text{-FePt}$  та, за виключенням композиції з товщиною Au(15 нм), присутні стискаючі механічні напруження і деформації (рис. 1, рис. 2 а, в).

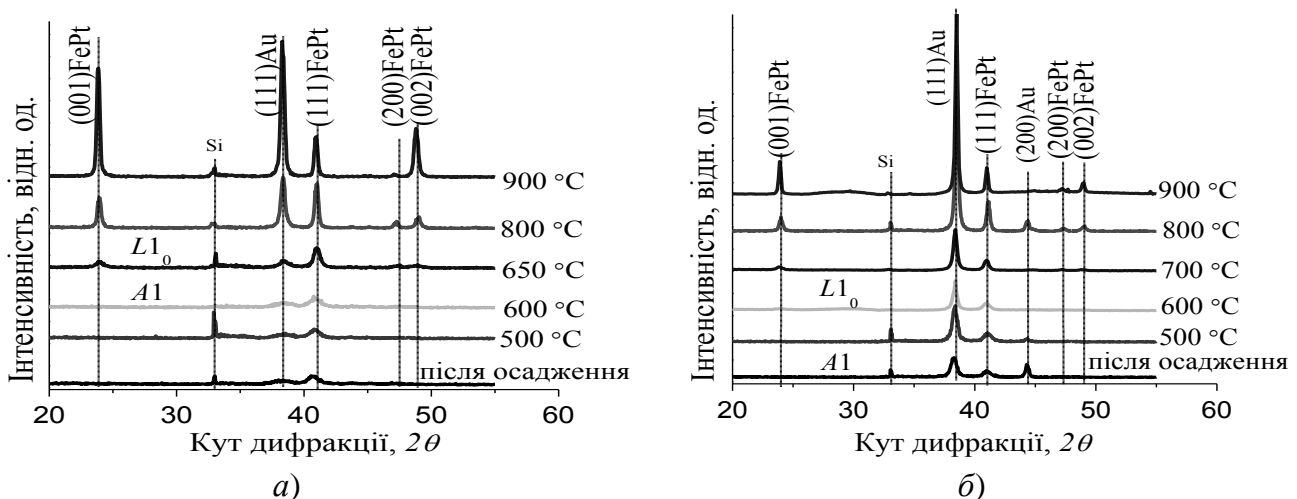


Рис. 1. Дифрактограми плівок  $Fe_{50}Pt_{50}(15 \text{ нм})/Au(7,5 \text{ нм})/Fe_{50}Pt_{50}(15 \text{ нм})$  (а) та  $Fe_{50}Pt_{50}(15 \text{ нм})/Au(30 \text{ нм})/Fe_{50}Pt_{50}(15 \text{ нм})$  (б) після осадження та відпалів у вакуумі при температурах  $500 \text{ }^\circ\text{C} - 900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Випромінювання  $Cu K_\alpha$

При відпалі у вакуумі температура початку фазового переходу  $A1 \rightarrow L1_0\text{-FePt}$  змінюється з товщиною проміжного шару золота. У плівці з проміжним шаром

Au(7,5 нм) формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt починається за температури 650 °C, на що вказує поява на дифрактограмі надструктурного рефлексу (001) FePt, зсув структурного рефлексу (111) в бік більших кутів і розщеплення структурного рефлексу (200) на (200) та (002) (рис. 1 а).

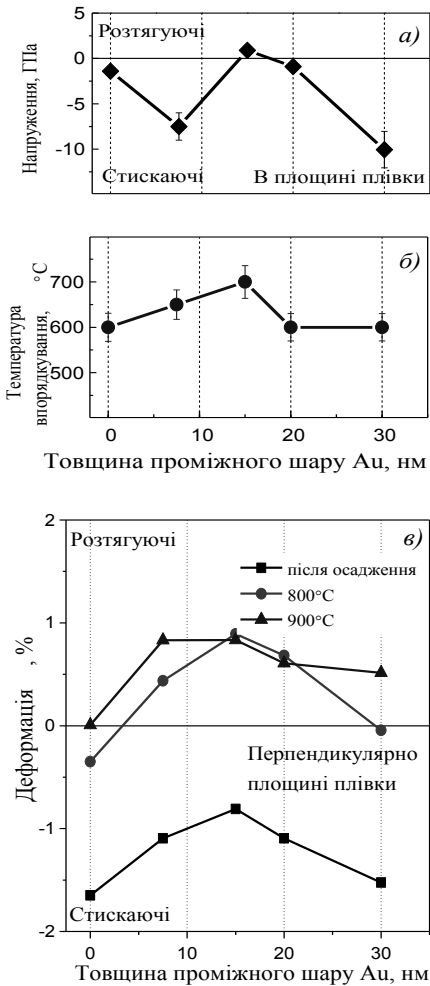


Рис. 2. Зміна початкового напруження в шарі  $Fe_{50}Pt_{50}$  (а), температури початку впорядкування (б), деформації в композиціях  $Fe_{50}Pt_{50}(15\text{ нм})/Au(x\text{ нм})/Fe_{50}Pt_{50}(15\text{ нм})$ , де  $x = 0; 7,5; 15; 20; 30$  нм, з товщиною проміжного шару Au (в)

Напружений стан у шарі  $Fe_{50}Pt_{50}$  впливає на кінетику фазового перетворення  $A1 \rightarrow L1_0$ -FePt, що супроводжується зменшенням об'єму. Напруження і деформації в шарах сплаву  $Fe_{50}Pt_{50}$  змінюються в залежності від товщини проміжного шару Au по кривій з максимумом та при деякій критичній товщині Au(15 нм) процес релаксації напруженого стану може супроводжуватись непружною деформацією. Внаслідок цього, в осаджених плівкових композиціях зі збільшенням товщини прошарку Au до 15 нм зменшується рівень стискаючих деформацій, що згідно принципу Ле Шательє–Брауна призводить до підвищення температури формування впорядкованої фази  $L1_0$  до 700 °C (рис. 2 б, в). Температура початку впорядкування в композиціях з додатковим шаром золота також змінюється по кривій з максимумом при товщині Au(15 нм) (рис. 2 б). Подальше збільшення товщини золота до 30 нм знову супроводжується збільшенням рівня стискаючих напружень та деформацій і, відповідно, зменшенням температури формування впорядкованої фази (рис. 2). Більші стискаючі напруження сприяють зменшенню температури упорядкування. При відпалах напружений стан в шарах  $Fe_{50}Pt_{50}$  змінюється внаслідок зміни фазового складу і структури плівок. Залишкові механічні деформації стають розтягуючими за рахунок зменшення об'єму при формуванні впорядкованої фази  $L1_0$  (рис. 2 в).

В процесі відпалів в інтервалі температур 700 °C–900 °C зростають інтенсивності надструктурного рефлексу (001) та його другого порядку відбиття (002) (рис. 1). Однак, присутність на дифрактограмах рефлексів (111) і (200) фази  $L1_0$ -FePt значної інтенсивності свідчить про відсутність переважної орієнтації зерен. Положення рефлексу (111) фази FePt при відпалах плівок не змінюється зі збільшенням товщини прошарку золота. Це означає, що атоми Au в процесі дифузії в шари сплаву  $Fe_{50}Pt_{50}$  за зернограничним механізмом не утворюють потрійної сполуки. При підвищенні температури відпалу до 900 °C зростає інтенсивність структурного

рефлексу (111) Au, що свідчить про накопичення золота в поверхневому шарі плівок і появи аксіальної текстури (111) Au (рис. 1).

В плівках зі збільшенням температури відпалу і товщини проміжного шару золота зростає ступінь упорядкування фази  $L1_0$ -FePt (рис. 3 а).

Після осадження плівки з неупорядкованою фазою Al-FePt магнітно-м'які. При відпалі фазове перетворення  $Al \rightarrow L1_0$ -FePt супроводжується зміною магнітних властивостей. Коецитивна сила плівок пропорційна кількості впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt і товщині парамагнітних стінок Au на межах зерен, так як дифузія Au і розташування його по межах зерен зменшує обмінну магнітну взаємодію поміж ними (рис. 3 б).

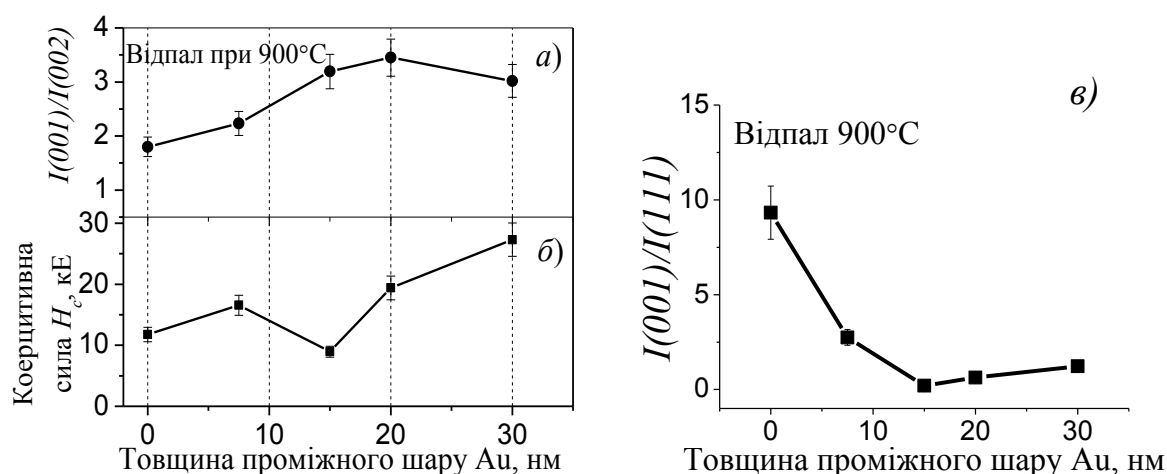


Рис. 3. Залежність відношення  $I(001)/I(002)$  (а), коерцитивної сили плівок  $Fe_{50}Pt_{50}(15 \text{ нм})/Au(x \text{ нм})/Fe_{50}Pt_{50}(15 \text{ нм})$ , де  $x = 0; 7,5; 15; 20; 30 \text{ нм}$  (б), відношення  $I(001)/I(111)$  фази  $L1_0$ -FePt (в) після відпалу при  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  від товщини проміжного шару Au

При цьому пригнічується ріст зерен фази  $L1_0$ -FePt з віссю легкого намагнічування  $c$ , перпендикулярною до площини плівки (рис. 3 в). Розтягуючі деформації у плівках сприяють росту зерен з віссю легкого намагнічування  $c$  в площині плівки (111) (рис. 2 в, 3 в).

Для виявлення впливу середовища відпалу на формування фазового складу і структури плівкові композиції  $Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}$  були відпалені в захисній атмосфері водню в температурному інтервалі  $500 \text{ }^\circ\text{C} - 800 \text{ }^\circ\text{C}$  з витримкою 30 с. Використання водню в якості середовища відпалу прискорює процеси упорядкування за рахунок створення додаткового напруженого стану в елементарній ґратці. Фазове перетворення  $Al \rightarrow L1_0$ -FePt відбувається за температури  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  у всіх плівках, незалежно від товщини прошарку золота (рис. 4 а). При відпалах у водні за температур вище  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  інтенсивності рефлексів (001) і (002) фази  $L1_0$  зростають незначно та утворюються гідриди золота  $AuH_{0,35}$  (рис. 4 б). В плівках формується аксіальна текстура (111) Au і (111) FePt, що більш виражена в композиції з більшою товщиною прошарку Au (30 нм) (рис. 4 б). Орієнтований ріст зерен фази  $L1_0$ -FePt у напрямку [001] не відбувається внаслідок появи додаткових стискаючих напружень в ґратці.

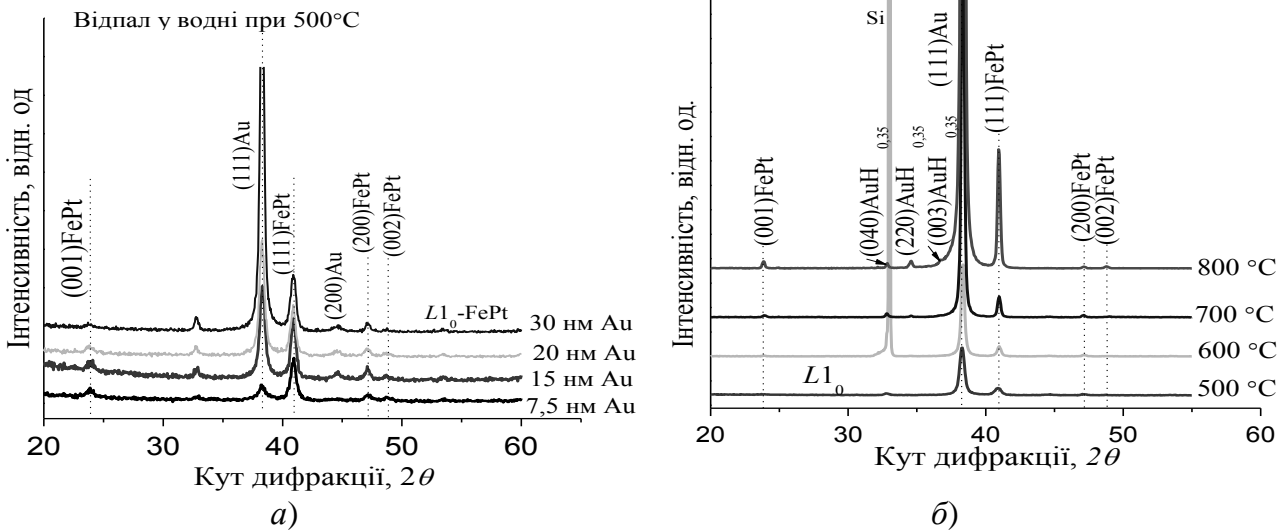


Рис. 4. Дифрактограми плівок  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Au}(x \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$ , де  $x = 0; 7,5; 15; 20; 30 \text{ нм}$ , після відпалів в атмосфері водню за температури  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  (а) та плівки  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Au}(30 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})$  при  $600 \text{ }^\circ\text{C} - 800 \text{ }^\circ\text{C}$

Збільшення параметру  $c$  і відношення  $c/a$  кристалічної ґратки  $L1_0\text{-FePt}$  після термічної обробки у атмосфері водню при  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , у порівнянні з відпалом у вакуумі, свідчить про втілення атомів водню у октаедричні порожнини і додаткові її спотворення (рис. 5).

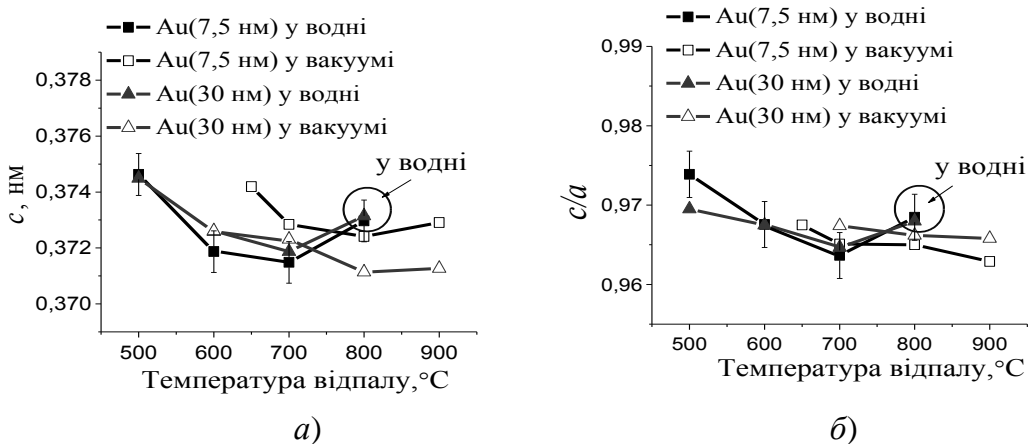


Рис. 5 Зміна параметру ґратки  $c$  (а) та ступеню тетрагональності  $c/a$  (б) фази  $L1_0\text{-FePt}$  з температурою відпалу у вакуумі та водні

Зміна фазового складу і структури плівкових композицій  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  істотно впливає на їх магнітні властивості (рис. 6–8). Додаткові стискаючі напруження в ґратці фази  $L1_0\text{-FePt}$  і її спотворення при відпалі в захисній атмосфері водню призводять до збільшення коерцитивної сили. Вже після відпалу за температури  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  коерцитивна сила становить  $27,3 \text{ кЕ}$ , що на  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  нижче, ніж при відпалах у вакуумі і атмосфері азоту (рис. 6 в, рис. 7 в, рис. 8 б). Петлі гістерезису незалежно від напрямку прикладеного до поверхні зразка магнітного поля після відпалу практично не відрізняються, що свідчить про магнітну ізотропність плівки (рис. 6 а, в, рис. 7).

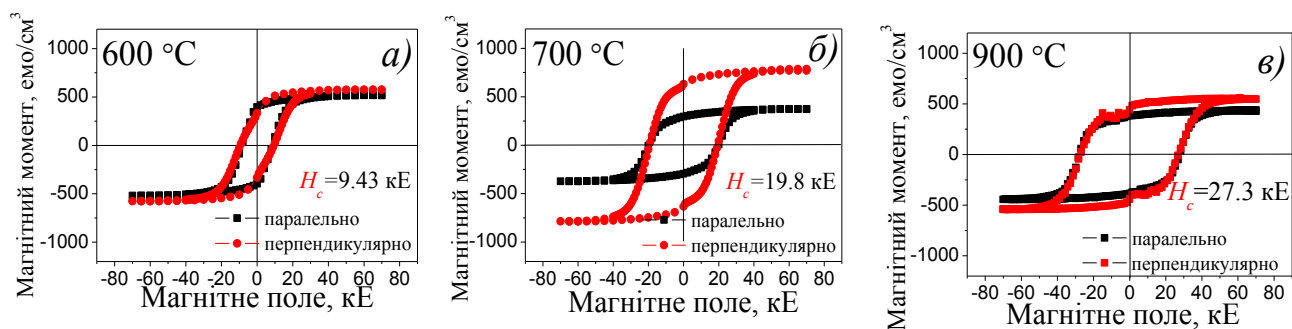


Рис. 6. Криві намагнічування  $M(H)$  плівки  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ nm})/\text{Au}(30 \text{ nm})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ nm})$  після відпалу у вакуумі при 600 °C (а); 700 °C (б); 900 °C (в)

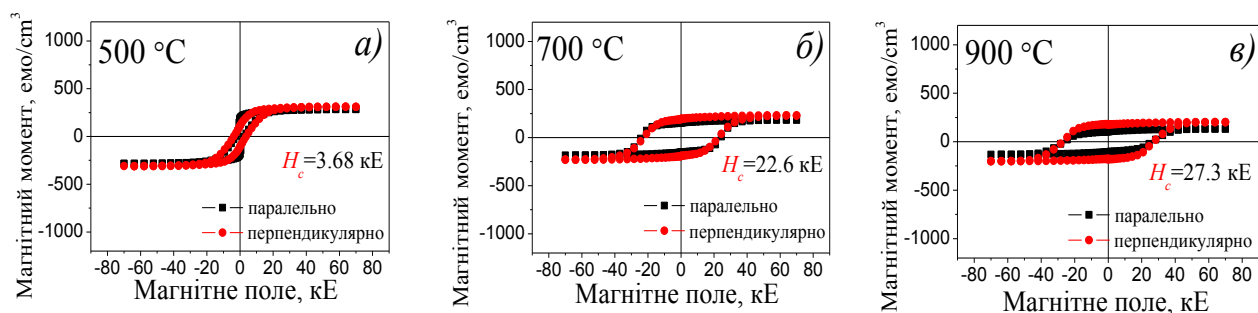


Рис. 7. Криві намагнічування  $M(H)$  плівки  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ nm})/\text{Au}(30 \text{ nm})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ nm})$  після відпалу у  $\text{N}_2$  при 500 °C (а); 700 °C (б); 900 °C (в)

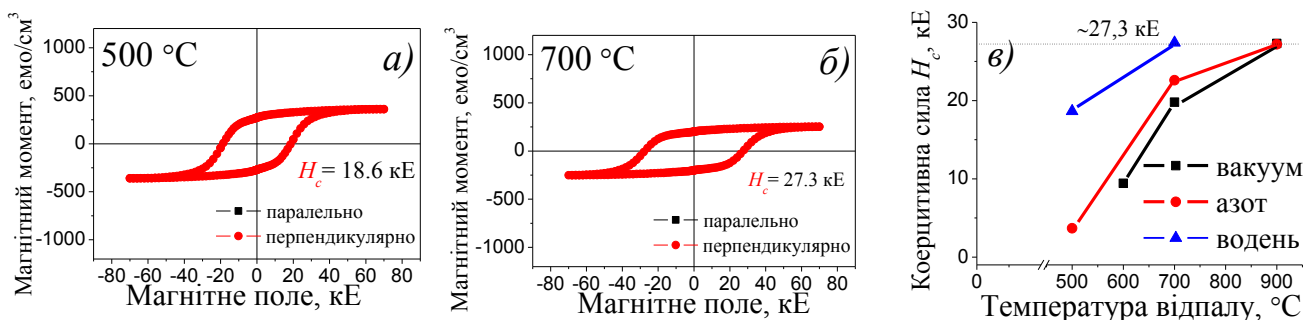


Рис. 8. Криві намагнічування  $M(H)$  плівки  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ nm})/\text{Au}(30 \text{ nm})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ nm})$  в перпендикулярно прикладеному до підкладки магнітному полі після відпалу у водні при 500 °C (а), 700 °C (б) та зміна коерцитивної сили плівок  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ nm})/\text{Au}(30 \text{ nm})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ nm})$ , відпалених у різних атмосферах (вакуум, азот, водень) з температурою відпалу (в)

В четвертому розділі проаналізовано закономірності впливу механічних напружень на зміну фазового складу, структури і магнітних властивостей нанорозмірних плівкових композицій  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}\text{-Au}$  на підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  та відокремлених від неї з різним розташуванням додаткового шару Au при відпалах у вакуумній камері та *in situ* в колонні електронографу в температурному інтервалі 500 °C – 900 °C та 20 °C – 700 °C, відповідно. Після осадження на дифрактограмах плівок фіксуються рефлекси (111) від неупорядкованої магнітно-м'якої фази  $\text{Al-FePt}$  ( $H_c=50 \text{ E}$ ) і Au, а також від підкладки (рис. 9 а).

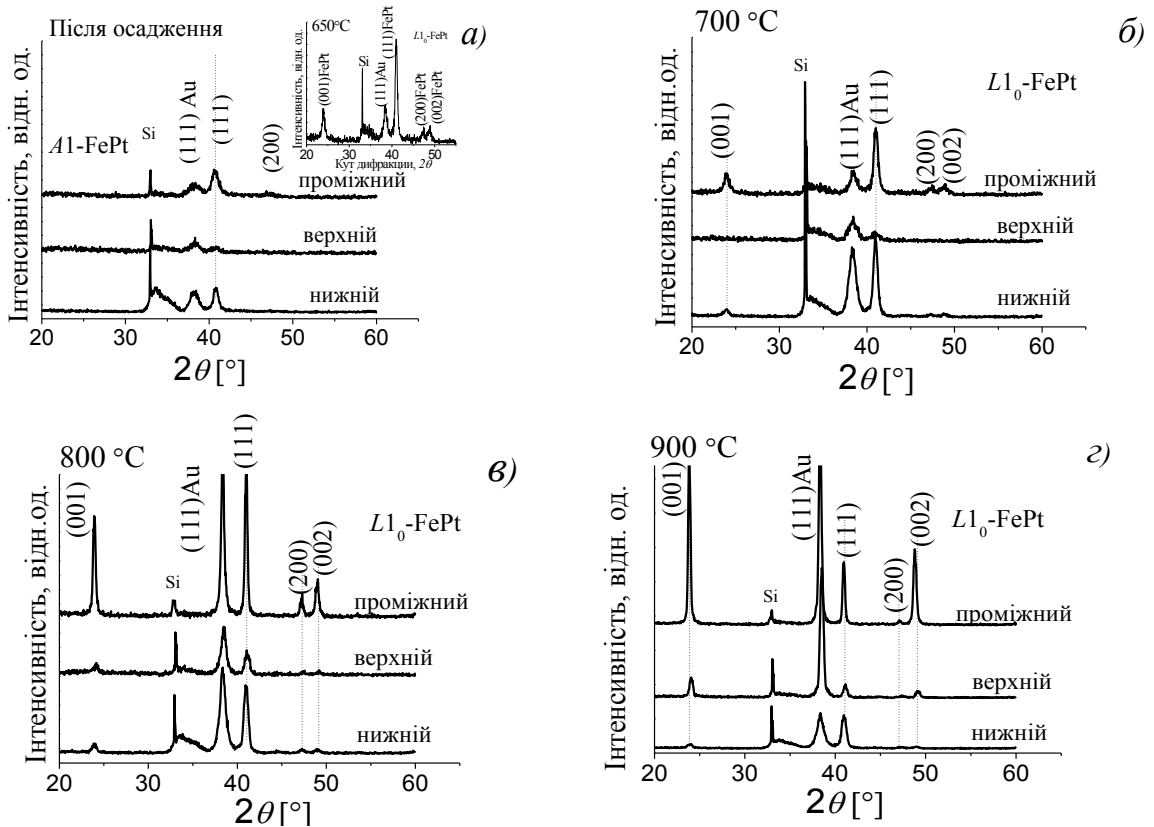


Рис. 9. Дифрактограми плівок з різним розташуванням шару золота: Au(7,5 нм)/Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм), Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм)/Au(7,5 нм)/Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм) і Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм)/Au(7,5 нм) після осадження (а) та відпалів в інтервалі температур (700–900) °С (б, в, г). Випромінювання Cu K<sub>α</sub>

У плівці з нижнім шаром Au відпал за температури 700 °С призводить до появи надструктурного рефлексу (001) на дифрактограмі (рис. 9 б). У той же час у плівці з верхнім шаром Au при цій же температурі спостерігається тільки зміщення структурного рефлексу (111) в бік великих кутів, що свідчить про виникнення тетрагонального викривлення кристалічної ґратки внаслідок початку фазового перетворення  $A1 \rightarrow L1_0$  (рис. 9 б). На процеси впорядкування після відпалу за температури 700 °С також вказує збільшення коерцитивної сили до 0,94 кЕ. Надструктурний рефлекс (001) фази  $L1_0$ -FePt низької інтенсивності в плівці Au(7,5 нм)/Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм) з'являється після відпалу при 800 °С, що на 150 °С вище, ніж для плівок з проміжним шаром золота (рис. 9 а (вставка), в). Це свідчить про менш інтенсивне протікання процесу впорядкування в плівковій композиції з верхнім шаром Au(7,5 нм). Великі стискаючі напруження (~ -14 ГПа) в плівках Au(7,5 нм)/Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм) після осадження збільшують енергетичний бар'єр реакції упорядкування та тим самим підвищують температуру фазового переходу  $A1 \rightarrow L1_0$  до 800 °С і не сприяють зростанню зерен впорядкованої фази  $L1_0$  з віссю легкого намагнічування  $c$  в напрямку [001], перпендикулярному площині плівки (рис. 10 а, б). У композиції з нижнім шаром Au після осадження механічні напруження в шарі FePt практично відсутні і впорядкування починається при 700 °С. Формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt в композиції з проміжним шаром золота, в якій присутні стискаючі напруження ~-7,5 ГПа, відбувається за меншої температури (650 °С) (рис. 10 а, б).

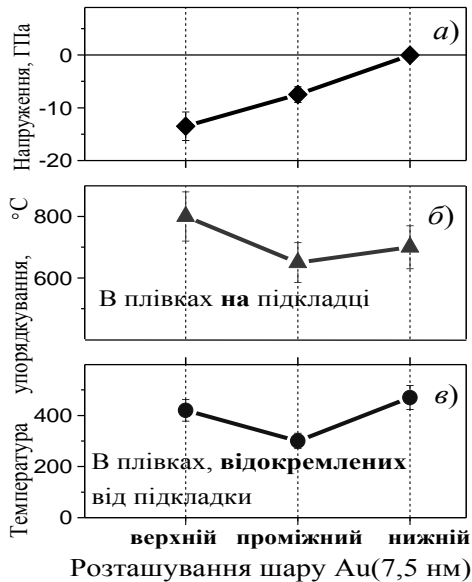


Рис. 10. Залежність величини залишкових механічних напружень в шарі  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  в плівкових композиціях  $\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ ,  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ ,  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}$  після осадження (а), температури упорядкування плівок на підкладці (б) і відокремлених від неї (в)

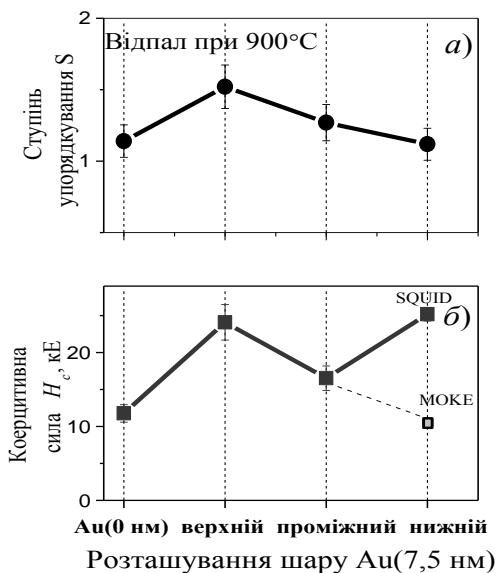


Рис. 11. Залежність ступеню упорядкування фази  $L1_0$ -FePt (а) та коерцитивної сили (б) після відпалу за температури  $900^\circ\text{C}$  від розташування шару  $\text{Au}(7.5\text{ нм})$  в плівкових композиціях  $\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ ,  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  і  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}$

Отже, в плівкових композиціях з різним розташуванням додаткового шару  $\text{Au}$ , існують критичні значення початкових стискаючих напружень в шарі  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ , при яких температура формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt знижується або підвищується при відпалах у вакуумі.

Таким чином, змінюючи розташування шару  $\text{Au}$  можна контролювати рівень напруженого стану в шарі  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  і впливати на фазовий перехід  $A1 \rightarrow L1_0$  та орієнтацію вісі легкого намагнічування  $c$  в зернах фази  $L1_0$ -FePt.

В плівках з верхнім шаром  $\text{Au}$  більші ступінь впорядкування та коерцитивна сила, яка досягає  $24,1\text{ кЕ}$  після відпалу  $900^\circ\text{C}$  (рис. 11). При цьому, в плівках з проміжним шаром  $\text{Au}$  більша кількість зерен з віссю легкого намагнічування  $c$  зерен фази  $L1_0$ -FePt в напрямку, перпендикулярному площині плівки (рис. 12 а).

В плівках з верхнім та нижнім шаром золота вісь легкого намагнічування лежить в площині плівки внаслідок меншого рівню стискаючих деформацій в осаджених плівках (в напрямку, перпендикулярному площині плівки) (рис. 12 б). Деформації після упорядкування змінюють свій знак зі стискаючих на розтягуючі (рис. 12 в).

В осаджених плівках, відокремлених від підкладки, на електронограмах присутні рефлекси від фази  $A1$ -FePt та золота (рис. 13). Оскільки умови нагріву та визначення температури в плівкових композиціях FePt-Au на підкладках і відокремлених від них були різними, важливо визначити тенденції зміни температури фазового переходу  $A1 \rightarrow L1_0$ -FePt. Для плівок з верхнім та нижнім шаром  $\text{Au}$ , відокремлених від підкладок, при нагріві вище температур  $430^\circ\text{C}$  і  $470^\circ\text{C}$ , відповідно, формується фаза  $L1_0$ , про що вказує поява надструктурних рефлексів (001) і (110), та зменшується інтенсивність рефлексів, що належать фазі  $A1$ . При нагріві до температур  $590^\circ\text{C}$  і  $520^\circ\text{C}$ , відповідно, збільшується

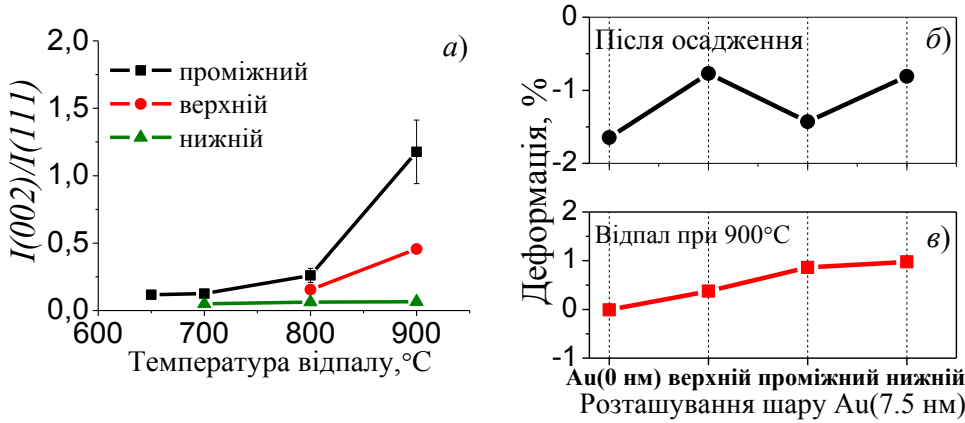


Рис. 12. Зміна відношення  $I(002)/I(111)$  фази  $L1_0$  в плівках Au(7,5 нм)/Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм), Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм)/Au(7,5 нм)/ Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм), Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм)/Au(7,5 нм) з температурою відпалу у вакуумі від температури відпалу (а) та деформації в шарі Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub> після осадження (б) та відпалу за 900 °С (в) від розташування шару Au(7,5 нм)

(рис. 13 б). Подальший нагрів до температури 610 °С показує, що крім фази  $L1_0$ -FePt та золота також залишається незначна кількість фази A1-FePt.

Таким чином, в плівках, відокремлених від підкладки з різним розташуванням шару Au зберігається така ж тенденція зміни температури фазового перетворення від розташування шару Au, як і на підкладці.

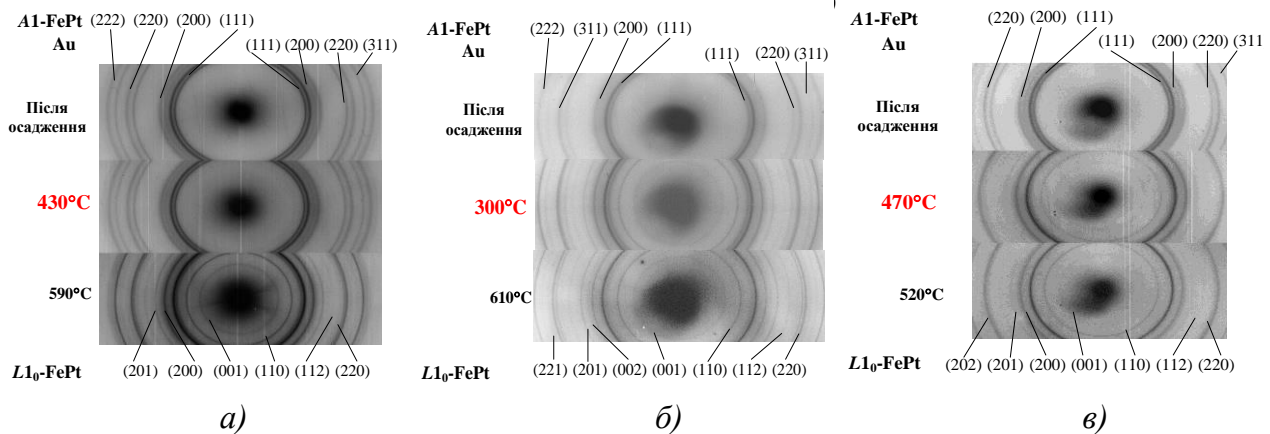


Рис. 13. Електроннограми плівкових композицій Au(7,5 нм)/Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм) (а) Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм)/Au(7,5 нм)/Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм) (б) та Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>(15 нм)/Au(7,5 нм) (в), відокремлених від підкладки, при відпалі *in situ*

У плівках з проміжним шаром Au(7,5 нм) рівень напружень є середнім між рівнем напруженого стану в інших композиціях (рис. 10 а), і відповідає більшому зниженню температури формування фази  $L1_0$  (рис. 13 б, в).

Це може бути пояснено внутрішніми стискаючими механічними напруженнями, які виникають при дифузії Au по межах зерен фази  $L1_0$ -FePt через різницю в коефіцієнтах термічного розширення фази A1 і Au, та впливом меж поділу на прискорення процесів взаємної дифузії.

інтенсивність рефлексів фази  $L1_0$  та залишається незначна кількість фази A1-FePt (рис. 13 а, в).

В плівці з проміжним шаром золота фазове перетворення A1 в  $L1_0$  відбувається при температурі 300 °С, що значно нижче ніж в композиціях з нижнім та верхнім шаром золота

В п'ятому розділі показано вплив меж поділу та типу підкладок ( $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$ ) на зміну фазового складу, структури та магнітних властивостей, орієнтований ріст зерен в композиціях із шарів сплаву  $[\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})]_2$  та шарів металів  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_n$  ( $n=1, 4, 8$ ) при відпалах у різних атмосферах (вакуум, азот) в температурному інтервалі  $300 \text{ }^\circ\text{C} - 900 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Збільшення кількості проміжних шарів Au та загальної товщини плівкової композиції  $[\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})]_2$  знижує рівень стискаючих напружень в шарі  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ , що супроводжується підвищенням температури початку впорядкування до  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  та погіршенням магнітних властивостей (рис. 14). Зміна коерцитивної сили корелює зі зміною залишкових механічних напружень в

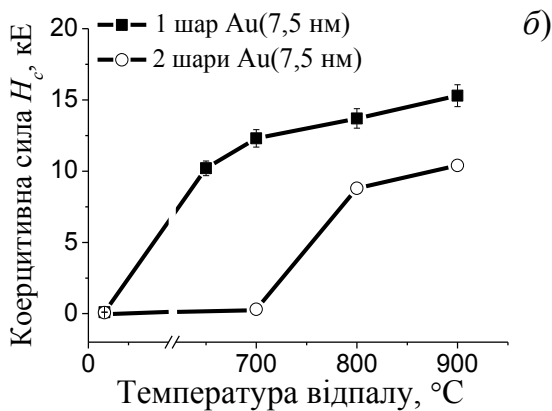
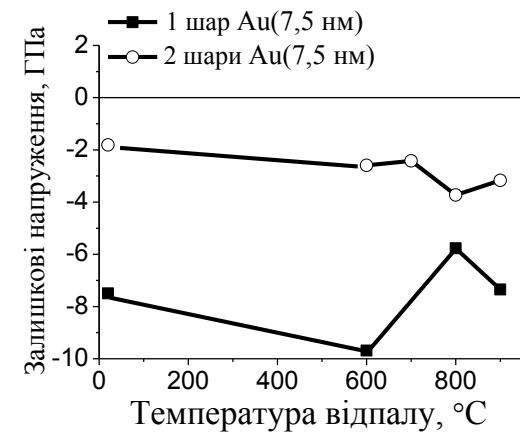


Рис. 14. Зміна напруженого стану в шарі FePt плівкових композицій  $[\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})/\text{Au}(7,5 \text{ нм})/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15 \text{ нм})]_n$  (де  $n = 1, 2$ ) (а) та коерцитивної сили (б) з температурою відпалу

приводить до зменшення кількості зерен фази  $L1_0\text{-FePt}$  з віссю легкого намагнічування  $c$ , перпендикулярною до площині плівки, та також стримується їх зростання. При швидкому термічному відпалі (РТА) в атмосфері азоту відбувається прискорена деформація та, як наслідок, впорядкована фаза формується при нижчій температурі, ніж у вакуумі ( $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

З підвищенням температури відпалу в інтервалі  $600 \text{ }^\circ\text{C} - 800 \text{ }^\circ\text{C}$  у плівкових композиціях  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$  та  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_8$  на підкладках  $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$  формується

а) плівкових композиціях додатковими шарами Au. Зі збільшенням кількості впорядкованої фази  $L1_0\text{-FePt}$  коерцитивна сила в плівкових композиціях, отримана за допомогою методу МОКЕ, зростає з температурою відпалу і досягає максимальних значень після відпалу при  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 14 б).

Збільшення кількості границь поділу в шаруватих плівкових композиціях  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_n$  (де  $n = 1, 4; 8$ ) загальною товщиною 30 нм, осаджених на підкладки  $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$  за рахунок активізації поверхневої дифузії сприяє процесам взаємодифузії між шарами і формуванню неупорядкованої фази  $A1\text{-FePt}$  в композиції  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$  та початку формування частково упорядкованих областей з тетрагональними викривленнями в композиції  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_8$  вже при осадженні (рис. 15).

Відпал у вакуумі при  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  призводить до появи надструктурного рефлексу (001) від впорядкованої фази  $L1_0\text{-FePt}$  в обох плівках. Межі поділу в плівкових композиціях впливають на ступінь упорядкування та магнітні властивості фази  $L1_0\text{-FePt}$ . Збільшення кількості меж поділу в композиції  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_8$

більша кількість зерен з віссю легкого намагнічування  $c$  у напрямку  $[001]$ , перпендикулярною площині плівки. Швидкий термічний відпал стимулює виникнення додаткових механічних розтягуючих деформацій в площині плівок, цим самим прискорює процес впорядкування та сприяє орієнтованому росту зерен фази  $L1_0$ -FePt з текстурою  $(001)$ .

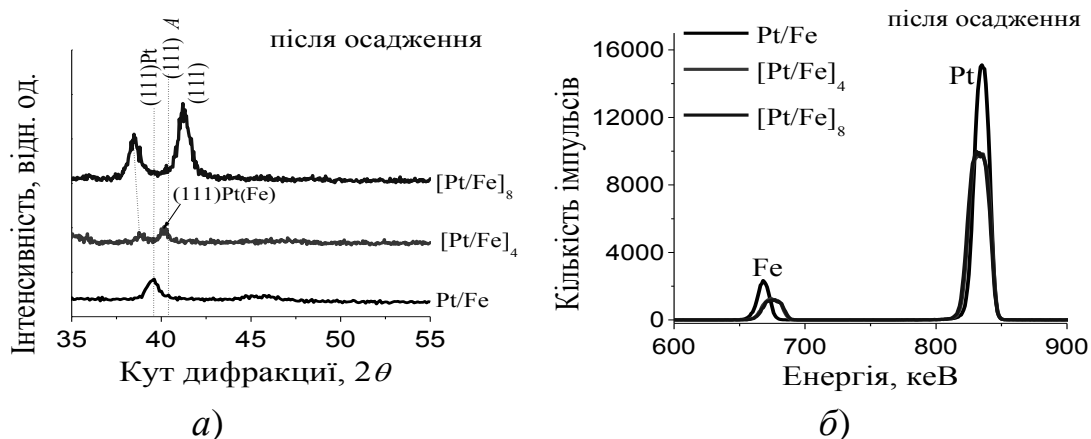


Рис. 15. Дифрактограми (випромінювання  $\text{Cu } K_\alpha$ ) (а) та спектри резерфордівського зворотного розсіювання (б) плівок  $[\text{Pt/Fe}]_n$  (де  $n = 1, 4, 8$ ) після осадження

Коерцитивна сила при цьому більше, ніж при відпалі у вакуумі, та має більші значення у плівці  $[\text{Pt/Fe}]_8$  за рахунок більшої дефектності структури (рис. 16 а).

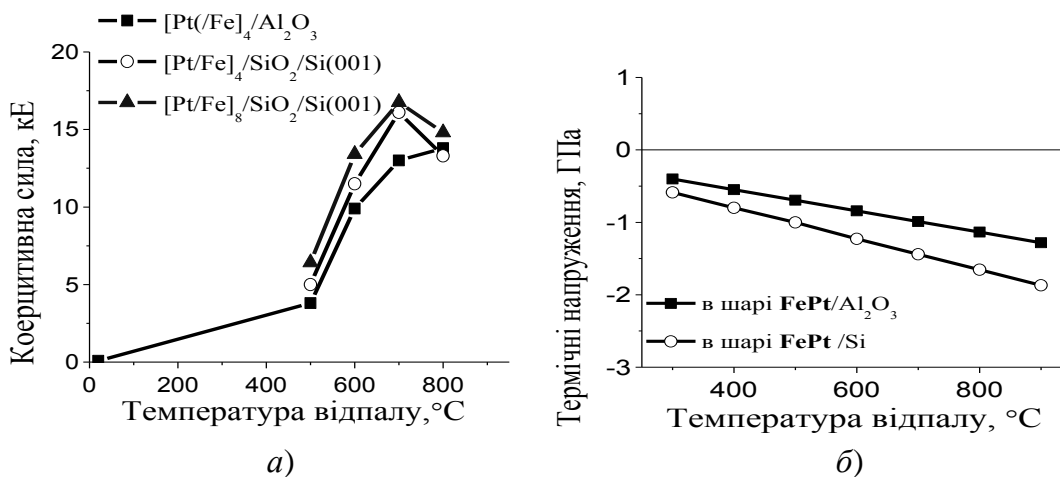


Рис. 16. Зміна коерцитивної сили  $H_c$  в плівках  $\text{Pt}(4.2 \text{ нм})/\text{Fe}(3.2 \text{ нм})_4$  та  $\text{Pt}(2.1 \text{ нм})/\text{Fe}(1.6 \text{ нм})_8$  на підкладках  $\text{SiO}_2(100)/\text{Si}(001)$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$  при швидкому термічному відпалі (RTA) в азоті та термічних напружень у шарі FePt з температурою відпалу

В плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_n$  (де  $n = 1, 4$ ) на підкладках  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$  при осадженні зберігається структура окремих шарів металів Pt та Fe. Впорядкована фаза при відпалі RTA у азоті при  $n = 1$  починає формуватися за температури  $600^\circ\text{C}$  та при збільшенні меж поділу до  $n = 4$  за температури  $500^\circ\text{C}$ , як і на підкладках  $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$ .

Менший рівень стискаючих напружень у осаджених плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладках  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$ , ніж на  $\text{SiO}_2(100\text{ нм})/\text{Si}(001)$ , за рахунок різних коефіцієнтів термічного розширення, призводить до підвищення температури появи надструктурного рефлексу (001) на  $100\text{ }^\circ\text{C}$  ( $600\text{ }^\circ\text{C}$ ) та отримання менших значень коерцитивної сили у плівках при температурах відпалу  $500\text{ }^\circ\text{C} - 700\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 16).

Коерцитивна сила зростає з температурою відпалу РТА і досягає максимальних значень ( $\sim 16\text{ кЕ}$ ) у композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_8$ , осаджених на підкладку  $\text{SiO}_2(100\text{ нм})/\text{Si}(001)$  (рис. 16 а).

## ВИСНОВКИ

За результатами комплексного дослідження нанорозмірних плівкових композицій на основі сплаву  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  з додатковими шарами  $\text{Au}$  та багатошарових плівок  $[\text{Pt/Fe}]_n$  встановлено основні закономірності процесів формування їх структури, фазового складу та магнітних властивостей при відпалах в різних середовищах (вакуум, водень, азот).

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Встановлено, що зміна рівня та знаку залишкових напружень та деформацій в плівці  $\text{FePt}$  впливає на температуру процесу впорядкування і формування фази  $L1_0\text{-FePt}$ , її структуру (орієнтацію зерен) та магнітні властивості.

2 Показано, що на напружений стан у шарі  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  впливає товщина, розташування та кількість додаткових шарів  $\text{Au}$ , що призводить до зміни температури фазового перетворення  $A1 \rightarrow L1_0$ , орієнтації вісі легкого намагнічування  $c$  та магнітних властивостей. В композиціях  $\text{FePt-Au}$  збільшення товщини прошарку  $\text{Au}$  з  $15\text{ нм}$  до  $30\text{ нм}$  змінює знак механічних напружень у шарі  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}(15\text{ нм})$  на стискаючі, що призводить при відпалі у вакуумі до зниження температури впорядкування до  $600\text{ }^\circ\text{C}$ .

3. Зміна атмосфери відпалу на водневу прискорює процеси упорядкування і також знижує температуру початку формування фази  $L1_0\text{-FePt}$  до  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , незалежно від товщини проміжного шару  $\text{Au}$ . Воднева обробка дозволяє отримати більші значення коерцитивної сили ( $27,3\text{ кЕ}$ ) в плівкових композиціях  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  за меншої температури відпалу  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , ніж при відпалі у вакуумі ( $900\text{ }^\circ\text{C}$ ), що пов'язано з інтенсивним проникненням атомів водню у плівку, їх розташуванням у порожнинах кристалічної ґратки і створенням додаткових стискаючих напружень.

4. Встановлено, що змінюючи рівень деформацій в шарі  $\text{FePt}$  осаджених плівкових композицій  $\text{FePt-Au}$  при відпалі у вакуумі можна отримати орієнтований ріст зерен з віссю легкого намагнічування  $c$  в напрямку  $[001]$  перпендикулярно до площини плівки у плівках з проміжним шаром  $\text{Au}(7,5\text{ нм})$  за рахунок більшого рівня стискаючих деформацій. Збільшення товщини прошарку  $\text{Au}$  до  $15\text{ нм}$  та зменшення рівня стискаючих деформацій сприяє росту зерен  $\text{FePt}$  з віссю легкого намагнічування  $c$  у площині плівки. Така ж орієнтація може бути досягнена при збільшенні товщини проміжного шару  $\text{Au}$  до  $30\text{ нм}$  та застосуванням водневої обробки за рахунок створення додаткових стискаючих напружень у елементарній комірці.

5. Визначено, що завдяки дії стискаючого напруження при дифузії золота по межах зерен та збільшення кількості меж поділу у плівках з проміжним шаром

Au(7,5 нм) можна знизити температуру формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt порівняно з іншим розташуванням шару Au. В плівках, відокремлених від підкладки, зберігається така ж тенденція зміни температури фазового перетворення від розташування шару Au (верхній, проміжний, нижній), як і в плівках на підкладці.

6. Показано, що збільшення кількості меж поділу в плівкових композиціях  $[Pt/Fe]_n$ , де  $n = 1, 4, 8$ , при умові збереження загальної товщини плівки, сприяє активізації дифузійних процесів та формуванню невпорядкованої фази  $A1$ -FePt в композиції  $[Pt/Fe]_4$  і частково упорядкованих областей з тетрагональними спотвореннями в композиції  $[Pt/Fe]_8$  вже при осадженні. Збільшення кількості меж поділу в композиції  $[Pt/Fe]_8$  при відпалі у вакуумі призводить до росту зерен фази  $L1_0$ -FePt з віссю легкого намагнічування  $c$  в площині плівки.

7. Швидкий термічний відпал плівкових композицій  $[Pt/Fe]_n$  (де  $n = 4, 8$ ) на підкладках  $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$  в атмосфері азоту призводить до орієнтованого росту зерен фази  $L1_0$ -FePt в напрямку  $[001]$  з віссю легкого намагнічування  $c$  перпендикулярно площині плівки за рахунок швидкого зменшення об'єму при фазовому перетворенні  $A1 \rightarrow L1_0$  внаслідок розтягуючих деформацій в плівці.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Макогон Ю.М., Павлова О.П., Сидоренко С.І. Вербицька, Т.І., **Вербицька М.Ю.**, Фігурна О.В. Формування хемічно впорядкованої фази  $L1_0$ (FePt) в нанорозмірній плівковій композиції  $Fe_{50}Pt_{50}(15\text{ нм})/Au(30\text{ нм})/Fe_{50}Pt_{50}(15\text{ нм})$  при відпалі в вакуумі. *Металлофізика и новейшие технологии*. 2014. т. 36, № 11. С. 1513-1522. *Особистий внесок здобувача*: проведено дослідження фазового складу плівок і їх магнітних властивостей після осадження і термічної обробки. (включено до Scopus)

2. Makogon Yu.M., Pavlova O.P., Sidorenko S.I., Verbytska T.I., **Verbytska M.Y.**, Fihurna O.V. Influence of Copper on  $A1$  to  $L1_0$  Phase transformation in Nanoscale  $Fe_{50}Pt_{50}$  Films. *Metallofis. Noveishie Tekhnol.* 2015. т. 37, № 4. С. 487-498. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано фазові перетворення у плівках при відпалі у вакуумі та досліджено їх магнітні властивості методом МОКЕ. (включено до Scopus)

3. Владимирский И.А., Круглов И.О., **Вербицька М.Ю.**, Фігурна О.В., Влияние толщины промежуточного шару Ag на фазові перетворення в тонкоплівкових композиціях  $FePt/Ag/FePt$ . *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. 2015. №5. С. 73-80. *Особистий внесок здобувача*: розраховано параметри структури, впорядкування і напружений стан у тонкоплівкових композиціях. (включено до Scopus)

4. Вербицкая Т.И., Фигурная Е.В., **М.Ю. Вербицкая**, Владимирский И.А., Сидоренко С.И., Павлова Е.П., Макогон Ю.Н., Вербицкая Т.И. Влияние меди на формирование упорядоченной фазы  $L1_0$ (FePt) в наноразмерных пленках  $Fe_{50}Pt_{50}/Cu/Fe_{50}Pt_{50}$  на подложках  $SiO_2/Si(001)$ . *Порошковая металлургия*. 2016. № 1/2. С. 141-146. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано зміну фазового складу і магнітних властивостей плівкових композицій, їх залежність від температури відпалу. (включено до Scopus)

5. **Вербицкая М.Ю.**, Холина Е.А., Вербицкая Т.И., Макогон Ю.Н. Влияние толщин отдельных слоёв и границ раздела на фазовый состав и магнитные свойства

многослойных плёночных композиций Pt/Fe *Металофізика та новітні технології*. 2016. т.38, №12. С. 1587-1598. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано вплив товщин окремих шарів і границь поділу на фазовий склад і магнітні властивості багат шарових плівкових композицій Pt/Fe. (включено до Scopus)

6. **Вербицька М.Ю.**, Шаміс М.Н., Сліпченко К.В., Вербицька Т.І., Макогон Ю.М. Вплив напруженого стану на формування фази  $L1_0$ -FePt в плівці  $Fe_{52}Pt_{48}$ (15 нм) на підкладці  $Al_2O_3$ . *Металофізика та новітні технології*. 2017. т.39, № 1. С.105-115. *Особистий внесок здобувача*: досліджено фазовий склад плівкових композицій після осадження і термічної обробки, проаналізовано вплив напруженого стану на формування фази  $L1_0$ -FePt в плівці  $Fe_{52}Pt_{48}$ (15 нм) на підкладці  $Al_2O_3$ . (включено до Scopus)

7. **Вербицкая М.Ю.**, Шаміс М.Н., Грайворонская К.А., Вербицкая Т.И., Макогон Ю.Н., Кудрявцев Ю.В. Влияние Au на формирование фазы  $L1_0$  в наноразмерных пленках  $[Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}]_n$ . *Металофізика та новітні технології*. 2018. т. 40, № 3. С.381-395. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано вплив напруженого стану та кількості прошарків Au на фазовий склад і магнітні властивості у плівкових композиціях  $[Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}]_n$  після термічної обробки у вакуумі. (включено до Scopus)

8. **Вербицька М.Ю.**, Шаміс М.Н., Макушко П.В., Березняк Я.А., Грайворонська К.О., Вербицька Т.І., Макогон Ю.М., Кудрявцев Ю.В. Формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt у плівках  $Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}$  при відпалі у водні. *Металофізика та новітні технології*. т.40, № 8. 2018. С. 1069-1079. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано фазові перетворення у плівках та зміну їх магнітних властивостей при відпалі у водні. (включено до Scopus)

9. Макушко П.В., **Вербицкая М.Ю.**, Шаміс М.Н., Бурмак А.П., Березняк Я.А., Грайворонская К.А., Вербицкая Т.И., Макогон Ю.Н. Фазообразование и магнитные свойства в пленках FePt/Au/FePt. *Порошковая металлургия*. 2019. № 3/4. С. 95-103. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано вплив атмосфери відпалу (вакуум, водень) та товщини проміжного шару золота на фазові перетворення у плівках та зміну їх магнітних властивостей при відпалі у водні. (включено до Scopus)

10 Спосіб одержання середовища для магнітного запису і зберігання інформації на основі шаруватої нанорозмірної плівки  $Fe_{50}Pt_{50}/Ag/Fe_{50}Pt_{50}$ : пат. № 94883 Україна, № u201404650; заявл. 30.04.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано зміну фазового складу плівкових композицій після термічної обробки.

11. Спосіб формування магнітного матеріалу на основі FePt з орієнтованою структурою зерен  $L1_0$ (FePt) фази для перпендикулярного або повздовжнього магнітного запису і зберігання інформації: пат. № 98785 Україна, № u201411632; заявл. 27.10.2014; опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано зміну фазового складу плівкових композицій після термічної обробки.

12. Shamis M.N., **Verbytska M.Yu.**, Bezsmertna O.S., Burmak A.P., Sidorenko S.I., Verbytska T.I., Makogon Yu.M. Formation of hard magnetic  $L1_0$  Phase in  $[Pt/Fe]_4$  Films on  $SiO_2/Si(001)$  and  $Al_2O_3$  Substrates. Conference Proceeding of IEEE 39th International

Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2019). Київ, Україна. 2019. P. 278-281. *Особистий внесок здобувача*: досліджено вплив типу підкладок на напружений стан та фазові перетворення у багатошарових плівкових композиціях  $[Pt/Fe]_4$ , відпалених швидким термічним відпалом у атмосфері азоту.

13. Макогон Ю.Н., Павлова Е.П., Сидоренко С.И., Вербицкая Т.И., Владимирский И.А., Фигурная Е.В., **Вербицкая М.Ю.** Влияние промежуточного слоя Cu на фазовый переход  $A1 \rightarrow L1_0(FePt)$  в наноразмерных плёночных композициях  $[Fe_{50}Pt_{50}/Cu/Fe_{50}Pt_{50}]_n$ . Тезисы 4-ой Международной конференции «Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии». Киев, Украина. 2013. С. 373. *Особистий внесок здобувача*: досліджено вплив проміжного шару Cu на фазові перетворення в нанорозмірних плівкових композиціях.

14. Makogon Yu.M., Pavlova O.P., Sidorenko S.I., Verbytska T.I., Vladymyrskiy I.A., Figurna O.V., **Verbytska M.Y.** Influence of Cu on formation of chemically ordered  $L1_0(FePt)$  phase in nanoscaled  $Fe_{50}Pt_{50}/Cu/Fe_{50}Pt_{50}$  films on  $SiO_2/Si(001)$  substrate. Сбірник тез доповідей міжнародної наукової конференції E-MRS-2014 Fall Meeting. Warsaw, Poland. 2014. *Особистий внесок здобувача*: досліджено вплив проміжного шару Cu на фазові перетворення в нанорозмірних плівкових композиціях.

15. Павлова О.П., **Вербицка М.Ю.**, Шаміс М.Н., Сліпченко К.В. Вплив Au на структуру і магнітні властивості шаруватих плівкових композицій  $[Fe_{50}Pt_{50}(15 \text{ нм})/Au/Fe_{50}Pt_{50}(15 \text{ нм})]_n/SiO_2(100 \text{ нм})/Si(001)$ , де  $n = 1, 2$ . Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Тернопіль. Україна. 2014. С. 30. *Особистий внесок здобувача*: досліджено вплив шару Au на фазові перетворення в нанорозмірних плівкових композиціях.

16. Фігурна О.В., **Вербицка М.Ю.**, Шаміс М.Н., Макогон Ю.М. Вплив напруженого стану на формування фази  $L1_0(FePt)$  у плівкових композиціях Fe-Pt з додатковими шарами Au та Ag. Матеріали 5-й Международной научно-практической конференции «Структурная релаксация в твердых телах». Винница, Украина. 2015. С. 92-93. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано вплив напруженого стану на формування фази  $L1_0(FePt)$  у плівкових композиціях Fe-Pt з додатковими шарами Au та Ag.

17. Slipchenko K.V., Makogon Yu. M., **Verbitskaja M.Yu.**, Figurna O.V. The formation of  $L1_0$  phase in multilayered film composition  $Pt(4,2 \text{ nm})/Fe(3,2 \text{ nm})]_{x4}/Al_2O_3$ . Збірник тез доповідей VI International Conference for Young Scientists LOW TEMPERATURE PHYSICS (ICYS-LTP-2015). Kharkiv, Ukraine. 2015. *Особистий внесок здобувача*: здійснено аналіз результатів експериментів.

18. Verbytska T.I., **Verbytska M.Yu.**, Falovska A.I., Sidorenko S.I., Makogon Yu.N. Effect of Au on ordered  $L1_0(FePt)$  phase formation in nanoscaled  $Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}$  films on  $SiO_2/Si(001)$  substrate. Збірник тез доповідей міжнародної наукової конференції E-MRS-2015 Fall Meeting. Warsaw, Poland. 2015. *Особистий внесок здобувача*: здійснено аналіз результатів експериментів.

19. Фигурная О.В., **Вербицкая М.Ю.**, Макогон Ю.Н., Сидоренко С.И., Вербицкая Т.И. Влияние промежуточных слоев Ag, Au, Cu в наноразмерных пленочных композициях на основе  $Fe_{50}Pt_{50}$  на формирование фазы  $L1_0$ - FePt и ее магнитные свойства. Сборник тезисов докладов 5-й международной конференции

«HighMatTech», Київ, Україна. 2015. С. 139. *Особистий внесок здобувача:* проаналізовано вплив проміжних шарів Ag, Au, Cu в нанорозмірних плівках на формування фази  $L1_0$ -FePt.

20. **Вербицька М.Ю.**, Круглов І.О., Макогон Ю.М., Сидоренко С.І., Сліпченко К.В. Вплив напруженого стану на формування фази  $L1_0$ -FePt в плівковій композиції  $Fe_{52}Pt_{48}$ (15 нм) на підкладці  $Al_2O_3(10\bar{1}0)$ . Збірник тез доповідей наукової конференції «Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем». Київ, Україна. 2016. С. 182. *Особистий внесок здобувача:* проаналізовано вплив напруженого стану на формування фази  $L1_0$  в плівковій композиції  $Fe_{52}Pt_{48}$ (15 нм).

21. **Verbytska M.Yu.**, Falovska A.I., Matyash D.I., Kotenko I.E., Makogon Iu.N., Berezniak Ya.A. Effect of annealing in  $H_2$  on  $L1_0$ -FePt phase formation in  $Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}$  films on  $SiO_2/Si(001)$  substrate. Збірник тез доповідей міжнародної наукової конференції E-MRS-2016 Fall Meeting Warsaw, Poland. 2016. P. 72. *Особистий внесок здобувача:* проаналізовано вплив відпалу у водні на формування фази  $L1_0$  в плівках  $Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}$ .

22. **Verbytska M.Yu.**, Kholina Ye.O., Makushko P.V., Verbytska T.I., Sidorenko S.I., Makogon Yu.M. Effect of annealing atmosphere and interfaces on  $A1 \rightarrow L1_0$  FePt phase transformation in multilayered  $[Pt/Fe]_n$  films. Збірник тез доповідей міжнародної наукової конференції E-MRS- 2017 Spring Meeting. Strassburge, France. 2017. P. Q7. *Особистий внесок здобувача:* проаналізовано вплив атмосфери відпалу на формування фази  $L1_0$  в багатошарових плівках.

23. **Verbytska M.Yu.**, Falovska A.I., Makushko P.V., Matyash D.I., Berezniak Ya.A., Grayvoronska K.A., Verbytska T.I., Makogon Iu.N. Phase formation and magnetic properties in  $Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}$  films. Міжнародна конференція НАНО-2017, Чернівці, Україна. 2017. P. 384-385. *Особистий внесок здобувача:* здійснено аналіз результатів експериментів.

24. **Verbytska M.Yu.**, Chernysh A.Yu., Makushko P.V., Verbytska T.I., Makogon Yu.M. Influence of anealing ambient on  $L1_0$  phase formation in Pt/Fe multilayers. Збірник тез доповідей міжнародної наукової конференції E-MRS-2017 Fall Meeting. Warsaw, Poland. P. 330. *Особистий внесок здобувача:* здійснено аналіз результатів експериментів.

25. Shamis M.N., **Verbytska M.Yu.**, Makushko P.V., Bohdanov S.Ye., Verbytska T.I., Makogon Yu.M. Effect of Fe content in bilayer Pt/Fe films on  $L1_0$  FePt phase formation. Збірник тез доповідей Junior EUROMAT Conference. Budapest, Hungary. 2018. *Особистий внесок здобувача:* здійснено обробку результатів дослідження.

26. Shamis M.N., **Verbytska M.Yu.**, Makushko P.V., Verbytska T.I., Makogon Yu.M. Effect of different substrates on  $L1_0$  phase formation in  $[Pt/Fe]_4$  films. Збірник тез доповідей міжнародної наукової конференції E-MRS-2018 Spring Meeting. Strassburge, France. 2018. *Особистий внесок здобувача:* здійснено обробку результатів дослідження.

27. Shamis M.N., **Verbytska M.Yu.**, Makushko P.V., Verbytska T.I., Sidorenko S.I., Makogon Yu.M. Effect of stress on structure and magnetic properties of nanoscale  $[Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}]_n$  film compositions – TOPO-2018: International Workshop on

"Topological Structures in Ferroic Materials". Natal, Brazil, 2018. P. 32. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано вплив напруженого стану на структуру і магнітні властивості в нанорозмірних плівкових композиціях  $[\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}]_n$ .

28. Makushko P.V., **Verbytska M.Yu.**, Shamis M.N., Verbytska T.I., Makogon Yu.M. Effect of stress on  $L1_0$  phase formation and magnetic properties of nanoscale  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  films. Міжнародна конференція Nanotechnology and nanomaterials (НАНО-2018), Київ, Україна. 2018. P. 681-682. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано вплив напруженого стану на формування фази  $L1_0$  і магнітні властивості в нанорозмірних плівках.

29. Makushko P.V., Shamis M.N., **Verbytska M.Yu.**, T.I. Verbytska, S.I. Sidorenko, Yu.M. Makogon Effect of annealing atmosphere on phase and structure formation in  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  films. Збірник тез доповідей міжнародної наукової конференції E-MRS-2018 Fall Meeting. Warsaw, Poland. 2018. P. 450. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано вплив атмосфери відпалу на формування фазового складу і структури в плівках  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ .

## АНОТАЦІЯ

**Вербицька М.Ю. Фазовий склад, структура і магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій FePt з додатковими шарами Au.** – Наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.01 – металознавство та термічна обробка металів. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” МОН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена визначенню закономірностей формування фазового складу, структури і магнітних властивостей в нанорозмірних плівках  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}\text{-Au}$  та багатошарових композиціях  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_n$  ( $n = 1, 4, 8$ ) на підкладках  $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$  при термічних відпалах. Встановлено, що контролюючи рівень механічних напружень та їх знак у шарі  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  зміненням товщини, розташування, кількості додаткових шарів Au, швидкості нагріву та атмосфери при відпалі (вакуум, азот, водень), можна керувати процесами упорядкування та формуванням фазового складу, структури та магнітними властивостями в плівкових композиціях. Застосування водневої термообробки прискорює процеси упорядкування в плівках  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Au}/\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  порівняно з відпалом у вакуумі за рахунок створення додаткових стискаючих напружень при втіленні атомів водню у порожнечі кристалічної ґратки фази  $L1_0\text{-FePt}$ . При цьому вісь легкого намагнічування  $c$  у зернах фази  $L1_0\text{-FePt}$  розташовується у площині плівки.

Швидкий термічний відпал плівкових композицій  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_n$  (де  $n=4, 8$ ) на підкладках  $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$  в атмосфері азоту призводить до орієнтованого росту зерен фази  $L1_0\text{-FePt}$  з віссю легкого намагнічування  $c$ , розташованою в напрямку  $[001]$ , перпендикулярному площині плівки.

**Ключові слова**: нанорозмірні плівки, відпал, впорядкована фаза  $L1_0\text{-FePt}$ , додатковий шар Au, коерцитивна сила.

## АННОТАЦИЯ

**Вербицкая М.Ю. Фазовый состав, структура и магнитные свойства наноразмерных пленочных композиций FePt с дополнительными слоями Au. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского” МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертационная работа посвящена определению закономерностей формирования фазового состава, структуры и магнитных свойств в наноразмерных пленках Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>-Au и многослойных композициях [Pt/Fe]<sub>n</sub> (n = 1, 4, 8) на подложках SiO<sub>2</sub>(100 нм)/Si(001) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при термических отжигах.

Установлено, что контролируя уровень механических напряжений и их знак в слое Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub> изменением толщины, расположения, количества дополнительных слоев Au, скорости нагрева и атмосферы при отжиге можно управлять процессами упорядочения и формированием фазового состава, структуры и магнитными свойствами в пленочных композициях. Применение водородной термообработки ускоряет процессы упорядочения в пленках Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>/Au/Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>, по сравнению с отжигом в вакууме, за счет создания дополнительных сжимающих напряжений при внедрении атомов водорода в пустоты кристаллической решетки фазы L1<sub>0</sub>-FePt. При этом ось легкого намагничивания *c* в зернах фазы L1<sub>0</sub>-FePt располагается в плоскости пленки.

Быстрый термический отжиг пленочных композиций [Pt/Fe]<sub>n</sub> (где n=4, 8) на подложках SiO<sub>2</sub>(100 нм)/Si(001) в атмосфере азота приводит к ориентированному росту зерен фазы L1<sub>0</sub>-FePt с осью легкого намагничивания *c*, расположенной в направлении [001], перпендикулярном плоскости пленки.

**Ключевые слова:** наноразмерные пленки, отжиг, упорядочена фаза L1<sub>0</sub>-FePt, дополнительный слой Au, коэрцитивная сила

## ABSTRACT

**Verbytska M.Yu. Phase composition, structure and magnetic properties of nanoscaled FePt film compositions with additional Au layers –Scientific work as a manuscript.**

The thesis for Ph.D. degree (technical sciences) on 05.16.01 specialty – Metal science and heat treatment of metals. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” Ministry of education and science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The work is devoted to definition of the phase composition formation regularities, structure and magnetic properties in nanoscale Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>-Au films and multilayered [Pt/Fe]<sub>n</sub> (n = 1, 4, 8) compositions on SiO<sub>2</sub>(100 nm)/Si(001) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10 $\bar{1}0$ ) substrates at thermal annealings.

It is established that by supervising of mechanical stresses level and their sign in Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub> layer by change of a thickness, location, quantity of additional Au layers and annealing conditions (temperature, duration, speed of heating and atmosphere – vacuum, nitrogen, hydrogen) one can operate by ordering processes and phase compound formation, structure and magnetic properties of film compositions.

The variations in residual stresses/strains level and sign in the FePt layer of as-deposited films influence the change in the ordered  $L1_0$ -FePt phase formation temperature, structure and the coercivity in the film compositions. Increasing the level of compressive stresses in the  $Fe_{50}Pt_{50}$  layer causes a decrease in the ordering temperature and improvement of the magnetic properties.

It is established that oriented grain growth with  $c$ -axis of easy magnetization in the [001] direction perpendicular to the film plane at annealing in vacuum occurs in films with a smaller thickness of the intermediate Au(7.5 nm) layer due to the higher level of compressive strains in the deposited films. Increasing the thickness of the Au layer to 15 nm and reducing the level of compressive deformations contributes to the growth of FePt grains with the  $c$ -axis of easy magnetization in the plane of the film. The same orientation can be achieved by increasing the thickness of the intermediate Au layer to 30 nm.

It is revealed, that application of hydrogen heat treatment accelerates ordering processes in  $Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}$  films in comparison with annealing in vacuum at the cost of creation of additional compressive stresses caused by introduction of hydrogen atoms into  $L1_0$ -FePt phase crystal lattice voids. Thus the  $c$ -axis of easy magnetization in  $L1_0$ -FePt phase grains is located in the film plane. Hydrogen treatment allows to obtain higher values of coercivity (27.3 kOe) in  $Fe_{50}Pt_{50}/Au/Fe_{50}Pt_{50}$  film compositions at a lower annealing temperature of 700 °C than at annealing in vacuum (900 °C), due to the intensive penetration of hydrogen atoms into the film.

It was determined that due to the action of the compressive stress during the diffusion of gold along the grain boundaries and the increase in the number of interfaces in films with an intermediate Au(7.5 nm) layer, the ordered  $L1_0$ -FePt phase formation temperature can be reduced compared to the other Au layer location. In the films with various Au layer location (top, intermediate, under-) separated from the substrate, the same tendency of the  $A1 \rightarrow L1_0$  phase transformation temperature changing as in the films on the substrate is remained: the ordering temperature is lower in film with intermediate Au(7.5 nm) layer than in Au/ $Fe_{50}Pt_{50}$  and  $Fe_{50}Pt_{50}/Au$  films.

In this work it is also shown that the increase in the number of interfaces in  $[Pt/Fe]_n$  film compositions, where  $n = 1, 4, 8$ , while maintaining the total film thickness, promotes the activation in diffusion processes and the formation of the disordered phase  $A1$ -FePt in the composition  $[Pt/Fe]_4$  and partially ordered regions with tetragonal distortions in the  $[Pt/Fe]_8$  composition already during deposition.

Rapid thermal annealing of  $[Pt/Fe]_n$  film compositions (where  $n = 4, 8$ ) on  $SiO_2(100\text{ nm})/Si(001)$  substrates in nitrogen atmosphere leads to the oriented growth of  $L1_0$ -FePt phase grains with a  $c$ -axis of easy magnetization, located in [001] direction, perpendicular to film plane.

The recommendations for controlling the stress state, the reduction of the temperature of the ordered  $L1_0$ -FePt phase formation, the obtaining of  $c$ -axis of easy magnetization oriented perpendicular or parallel to the film plane in the film based on FePt, application of which by thermal activated method will allow to increase the magnetic recording density and storage information were developed.

**Key words:** nanoscaled films, annealing, ordered  $L1_0$ -FePt phase, additional Au layer, coercivity.

Підписано до друку 28 жовтня 2019р.

Формат 60x90/16. Папір офсетний.

Кількість умовних друкованих аркушів 0,9

Тираж 100 екз. Замовлення №1158.

Суб'єкт видавничої діяльності занесено до державного реєстру №620049 13.10.2008,

ПРІНТЦЕНТР, м.Київ, вул. Політехнічна, 16

