

О.В. Бездідько, Ю.О. Шкурдода, С.М. Ващенко

Магніто-оптичні властивості двошарових систем на основі Fe та Pt

Сумський державний університет, Суми, Україна, o.bezdidko@aph.sumdu.edu.ua

У статті наведені результати експериментальних досліджень магнітооптичних властивостей та фазового складу тонких плівок та мультишарів на основі Fe та Pt. Зразки отримували у високовакуумній камері (10 - 8 Па) шляхом пошарового осадження з тиглів при кімнатній температурі.

Показано, що ГЦК твердий розчин FePt утворюється вже в процесі осадження на підкладку (пластини ситалу). Залежно від концентрації атомів компонент у невідпалених зразках можна сформувати три фази: (i) т.р. Fe (Pt); (ii) Fe₃Pt; (iii) FePt.

Першою ознакою початку впорядкування у ГЦК фазі FePt слід вважати появу надрефлексів у вигляді ліній (001) та (002) під час термообробки. Залежно від загальної товщини мультишару або окремих шарів, температура відпалу, при якій з'являються екстрарефлекси, може коливатися в межах 300 - 570 К. Усі отримані зразки мають низьку коерцитивність (0,25 - 0,4 мТл). Магнітооптичні дослідження показали, що збільшення вмісту немагнітного компонента зменшує основні магнітні характеристики. Однак у мультишарів [Fe(3)/Pt(3)]_n/S із кількістю повторюваних елементів від 2 до 8 спостерігається збільшення основних магнітних параметрів порівняно з двошаровими плівками при однаковій ефективній товщині.

Ключові слова: тонкі плівки; спінтроніка; магніто- оптичні властивості; Fe; Pt

Подано до редакції 17.02.2021; прийнято до друку 10.04.2021.

Вступ

Завдяки появі та розробці нових високотехнологічних методів виробництва тонких плівок стало можливим створювати шаруваті плівкові структури з високою локалізацією компонентів. Це призвело до відкриття ряду нових ефектів, зокрема гігантського магнітоопору (ГМО), який спостерігається у магнітно неоднорідних плівкових матеріалах [1, 2]. Цікаві ефекти гістерезису, що виникають внаслідок взаємодії контактуючих магнітних шарів або розділених немагнітними шарами, також були виявлені в багатошарових плівкових системах [3]. На їх основі створюються нові матеріали із заданим набором кінетичних та магнітних властивостей, зокрема, розробляються датчики магнітного поля та різного роду сенсори [4-6]. Тонкоплівкові системи також використовуються для зберігання та запису інформації в

запам'ятовуючих пристроях, що дозволяє отримати високу щільність та швидкість запису інформації.

Нові технології дозволяють отримати особливу морфологію як самих шарів, так і міжшарових меж. Це, в свою чергу, призводить до особливих кооперативних магнітних властивостей багатошарових структур. Звідси необхідність детального аналізу магнітних властивостей багатошарових плівок.

У роботі [7] досліджено магнітні властивості багатошарових структур [Fe/Pt]_n, отриманих магнетронним розпиленням. З досліджень методом Месбауера та отриманих гістерезисних магнітних петель було встановлено, що плівки [Fe/Pt]_n при n = 16 мають магнітну анізотропію, яка переважно перпендикулярна площині плівок. На основі даних рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS) було встановлено, що у плівках є проміжний шар між підкладкою та багатошаровою структурою. Проведене мікромагнітне моделювання дозволяє

зробити висновок, що індукція магнітної анізотропії, перпендикулярної площині плівок $[Fe/Pt]_n$ (при $n = 16$), відбувається внаслідок утворення анізотропного проміжного шару.

Виходячи з вищесказаного, метою даної роботи було експериментальне дослідження магнітних характеристик двошарових плівок Fe/Pt з різною товщиною шару.

I. Методи і техніка експерименту

Багатошарові плівкові системи на основі Fe та Pt були отримані в надвисокому вакуумі у вакуумній камері Sabum MDC Europe. Вакуум в системі створювали за допомогою форвакуумних (10^{-2} Па), турбомолекулярних (10^{-5} - 10^{-6} Па) та гетероіонних (до 10^{-8} Па) насосів від Pfeiffer Vacuum. Зразки на основі Fe та Pt отримували шляхом пошарового осадження з тиглів. Осадження зразків проводили при кімнатній температурі $T_n = 300$ К. Це значно зберегло індивідуальність шарів, і утворення неупорядкованих твердих розчинів, швидше за все, відбувалося поблизу межі поділу.

Ситалові пластини використовувались як основи для дослідження МОКЕ. Перед введенням підкладок у вакуумну камеру їх попередньо очищали в ультразвуковій камері в ізопропанолі або ацетоні. Щоб забезпечити рівномірність товщини зразка (виключаючи появу градієнта товщини та концентрацій), відстань між підкладками та випарником підтримували щонайменше 6 - 7 см. Для цього використовувались спеціальні кварцові пластини з робочою частотою 10 МГц, на які безпосередньо наносилась досліджувана плівка. Точність вимірювання становить 10 %.

Установка для вивчення магнітооптичних властивостей складається з генератора світла (лазера) Volkraft Labornetzgerat TNG 30, поляризатора, оптичної конденсаторної лінзи, яка утворює промінь плоскополяризованого світла з довжиною хвилі $\lambda = 670$ нм і спрямовується на зразок в магнітному полі 150 мТл. Після відбиття від зразка світло з плоскополяризованого перетворювалося в еліптично поляризоване, а площина поляризації оберталася. Потім сигнал надходив до іншої збіжної лінзи та модулятора Фарадея, який представляв собою соленоїд зі скляним сердечником, де зміна кута

повороту площини поляризації компенсувалася струмом, що подається на модулятор Фарадея. Потім сигнал подавали на перетворювач, фотодетектор, підсилювач і виводили на комп'ютер, де в автоматизованому режимі будувалась петля гістерезису, з якої визначали кут повороту Керра, індукцію насичення, залишкову намагніченість та коерцитивну силу. Максимальний (критичний) струм, який можна пропустити через котушки електромагніту – 10 А, оптимальним значенням струму було 5 А, що відповідало індукції 150 мТл. Контроль подачі струму на котушки здійснювався контролером GAF 971107.

II. Результати та обговорення

У системах на основі Fe та Pt важливі процеси структурного впорядкування. Залежно від концентрації компонентів, умов нанесення, температури відпалу, можливе утворення великої кількості як упорядкованих, так і неупорядкованих фаз. Структурно впорядкованими фазами в цьому випадку будуть фази Лавеса. Фази Лавеса утворені атомами двох типів А і В, а атом класу А завжди має більший атомний радіус (R), ніж атом класу В, і існує ідеальне співвідношення радіусів компонентів $R_A : R_B = 1,225$. Фази Лавеса включають сполуки, що кристалізуються на кілька споріднених структурних типів, серед яких три найбільш численні: (i) гексагональний тип $MgZn_2$; (ii) кубічний тип $MgCu_2$; (iii) шестигрунтий тип $MgNi_2$.

Електронографічні дослідження показали, що в таких системах вже в процесі конденсації при температурі підкладки $T_n \approx 300 - 350$ К, формується ГЦК твердий розчин (рис. 1).

Для всіх отриманих зразків концентрацію компонентів розраховували згідно (1). Дані розрахунку представлені в таблиці 1.

$$c_i = \frac{d_1 \rho_1 \mu_i}{d_1 \rho_1 \mu_1^{-1} + d_2 \rho_2 \mu_2^{-1}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

Залежно від концентрації атомів компонентів у невідпалених зразках можна сформувати три фази: (i) т.р. Fe(Pt); (ii) Fe_3Pt ; (iii) FePt (рис. 2). Постійна решітки для цих систем дуже близька і лежить в діапазоні 0,384 - 0,386 нм. Різницю можна помітити,

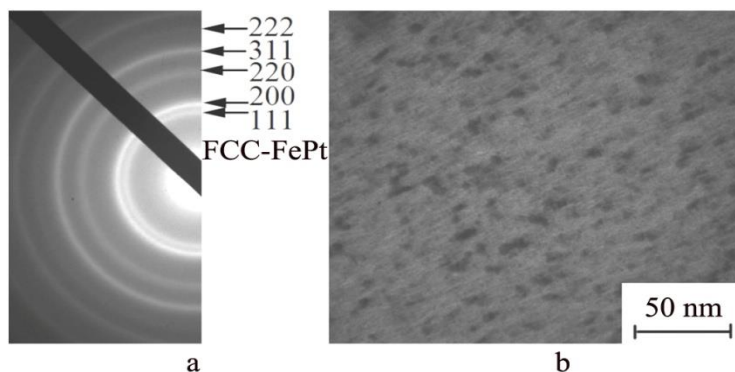


Рис. 1. Дифракційна картина від зразка Fe (22) / Pt (15) без відпалу.

Таблиця 1

Розрахункові значення концентрацій для досліджуваних зразків (н.в.- неупорядкована фаза)

Зразок	c_{Fe} , ат. %	c_{Pt} , ат. %	Фазовий склад
Рис. 2: Fe(22)/Pt(3)	91	9	т.р. $\alpha - Fe(Pt)$
Fe(22)/Pt(9)	75	25	$Fe_3Pt (L_{11})$ н.в.
Fe(22)/Pt(15)	65	35	$FePt (L_{10})$ н.в.
Рис. 3: Fe(12)/Pt(9)	44	56	$FePt (L_{10})$ н.в.
Fe(22)/Pt(9)	75	25	$Fe_3Pt (L_{11})$ н.в.
Fe(32)/Pt(9)	82	18	$Fe_3Pt (L_{11})$ н.в.
Рис.4: Fe(3)/Pt(3)	56	44	$FePt(L_{10})$ н.в.

проаналізувавши показник інтенсивності лінії. За інтенсивністю певних ліній можна говорити про формування певної фази. Також інтенсивність лінії є важливою для визначення впорядкованої фази L_{10} [9].

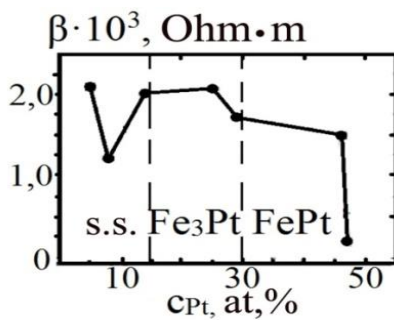


Рис. 2. Залежність сформованої фази від концентрації компоненту у системі.

Першою ознакою початку впорядкування у фазі ГЦК FePt слід вважати появу надрефлексів у вигляді ліній (001) та (002) під час термообробки. Залежно від загальної товщини мультишару або окремих шарів, температура відпалу, при якій з'являються екстра рефлекси, може коливатися в межах 300 - 570 К. Тут виникає така особливість: збільшення інтенсивності ліній (001), (002), (112) та інших відбувається дуже повільно і лише при $T_b > 630$ К спостерігається співвідношення $I_{002} / I_{001} \cong 0,5$, що відповідає теоретичному значенню. Повна система екстраліній та базових ліній (001), (110), (111), (200), (002), (112), (202), (310), (222) формується в інтервалі $T_b = 620 - 820$ К. Інтенсивність процесу упорядкування можна визначити із швидкості збільшення інтенсивності лінії (111) як лінії з найбільшою інтенсивністю [8]. Це явище спостерігається як у суцільних плівкових зразках [9 - 15] та в моноатомних мультишарах, у яких шар FePt має товщину $d \sim 1$ нм [16]; надтонких острівцевих плівках FePt з ефективною товщиною $d = 1 - 10$ нм [17]; тонких плівках FePt ($d = 10$ нм) [18]; гранульованих плівках FePt, поміщених в матрицю SiO_2 [19, 20] або в матрицю Al_2O_3 [21].

Магнітооптичний ефект Керра широко використовується для вивчення магнітних властивостей плівкових систем. Форму петлі

гістерезису МОКЕ можна використовувати для опису структурно - фазового стану зразка, а мікроскопія МОКЕ дозволяє охарактеризувати доменну структуру. Доцільність вивчення магнітооптичних властивостей у матеріалах з можливим спінозалежним розсіянням електронів пов'язана з отриманням інформації про швидкість намагнічування, магнітну анізотропію, рухливість доменної структури, особливості спин - поляризації магнітної складової у плівкових структурах тощо. Такі системи можуть бути використані для створення чутливих елементів датчиків магнітного поля, магнітооптичних пристроїв зчитування інформації тощо.

Спочатку досліджувались одношарові плівки заліза. Показано (рис. 3), що зі збільшенням товщини спостерігається лінійне збільшення всіх досліджуваних магнітних характеристик. У випадку одношарових плівок Fe коерцитивність зростає з товщиною в діапазоні від 0,25 до 0,45 мТл, що все ще є надзвичайно малим значенням. Такі значення коерцитивної сили обумовлені, на нашу думку, малими розмірами кристалітів (5 - 10 нм). Розмагнічуючі фактори, в такому випадку, для різних напрямків відрізняються не суттєво. Тому магнітостатична енергія буде менша енергії кристалографічної анізотропії. Отже саме енергія кристалографічної анізотропії і визначає величину коерцитивної сили. Зростання коерцитивності при збільшенні товщини плівок Fe обумовлено збільшенням розмірів кристалітів. H_s також лінійно збільшується з 3,255 до 3,287 відн. од.

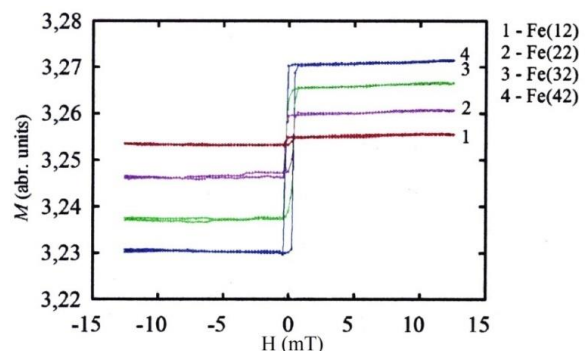


Рис. 3. Магнітні залежності для одношарових плівок Fe з різною товщиною (в дужках товщина в нм).

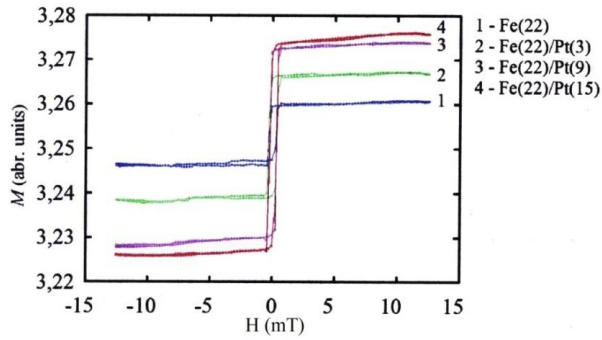


Рис.4. Магнітні залежності для двошарових плівок Fe (const) / Pt (x) з різною товщиною.

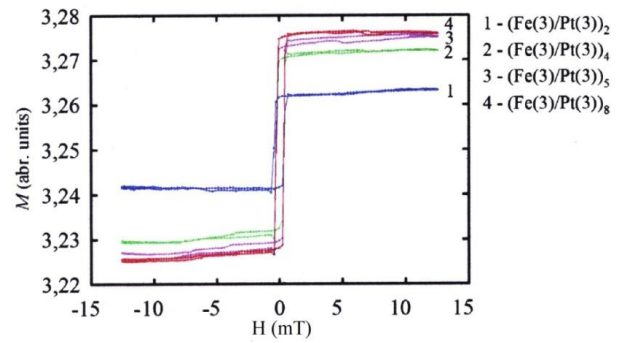


Рис. 5. Магнітні залежності для двошарових плівок Fe (x) / Pt (const) з різною товщиною.

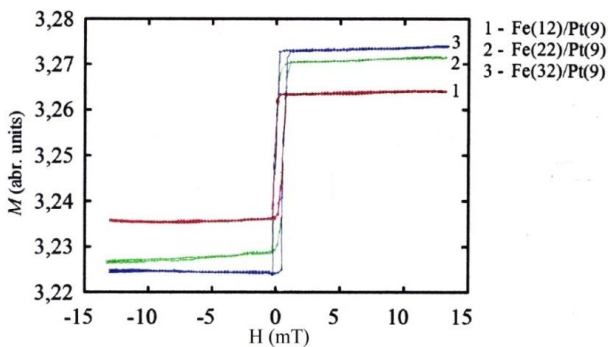


Рис. 6. Магнітні залежності для мультишарів $[Fe(3)/Pt(3)]_{2-8}$.

Після вивчення одношарових плівок були досліджені магнітні характеристики двошарових плівок Fe/Pt, оскільки таке поєднання цікаве з точки зору використання в системах із спін - залежним розсіянням. По черзі товщини Fe або Pt залишались сталими. Змінюючи товщину шару Pt (рис. 4) в діапазоні 3 - 15 нм, коерцитивна сила змінюється від 0,34 до 0,26 мТл, а намагніченість насичення від 3,261 до 3,276 відн. од. Як і очікувалось, збільшення концентрації немагнітної складової призводить до

зменшення магнітних характеристик (у порівнянні з одношаровими плівками), що також пов'язано з утворенням твердих розчинів вже на стадії осадження зразка.

В іншому випадку, коли ми змінюємо товщину заліза (рис. 5), а Pt залишається сталою (9 нм), коерцитивність зростає зі збільшенням товщини шару заліза з 0,28 до 0,3 мТл. У двошарових плівках з подібною товщиною Fe порівняно з одношаровими плівками спостерігається значне зменшення коерцитивної сили зразків, що ми також пов'язуємо з утворенням твердих розчинів. H_s лінійно збільшується з 3,267 до 3,275 відн. од.

Цікавий результат для мультишарів Fe (3) / Pt (3) з кількістю повторюваних елементів від 2 до 8 (рис. 6). Для таких мультишарів спостерігається збільшення основних магнітних параметрів порівняно з двошаровими плівками при однаковій ефективній товщині. На рисунку 7 показаний узагальнений графік порівняння спостережуваних магнітних характеристик, де загальна товщина зразка відкладена вздовж осі X, для більш наочного порівняння.

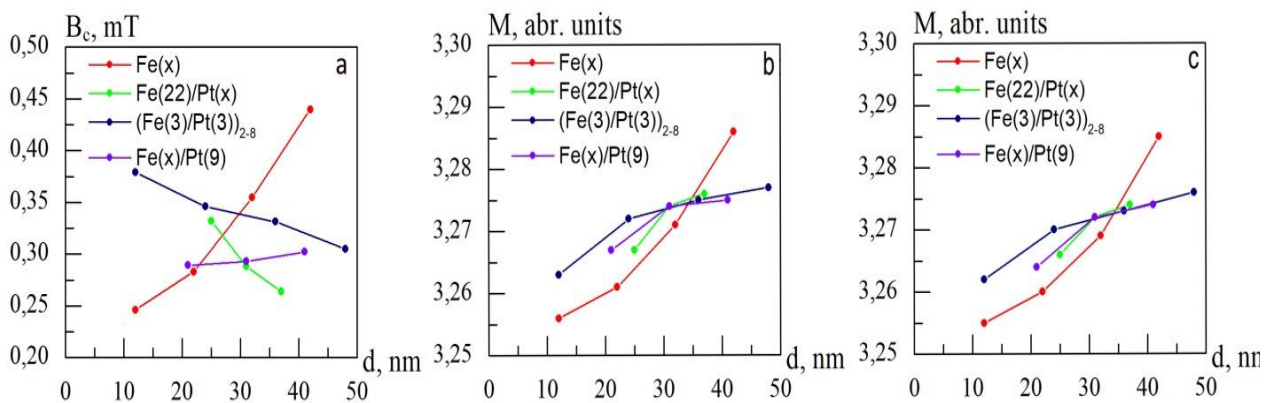


Рис. 7. Порівняння магнітних характеристик залежно від загальної товщини системи: а - коерцитивна сила; б - намагніченість насичення; в – залишкова намагніченість.

Висновки

1. Збільшення концентрації немагнітного компонента призводить до зменшення вимірюваних магнітних характеристик, таких як: коерцитивна сила, намагніченість насичення та залишкова намагніченість. Крім того, навіть при однаковій товщині магнітної компоненти, магнітні характеристики менші, ніж у одношарових плівок, що пов'язано з утворенням твердих розчинів вже в процесі конденсації плівки.

2. У мультишарах $[\text{Fe}(3)/\text{Pt}(3)]_n/\text{S}$ із кількістю повторюваних елементів від 2 до 8 спостерігається збільшення основних магнітних параметрів порівняно з двошаровими плівками при однаковій ефективній

товщині.

3. Форма і характер петлі гістерезису, а також низька коерцитивна сила показують можливість використання таких матеріалів у пристроях, таких як магнітні реле, де, на відміну від датчиків, швидкий відгук важливіший ніж плавність і точність вимірювання.

Робота виконана в рамках держбюджетної тематики МОН України №0120U102005 (2020 - 2022 рр.).

Бездідько О.В. - магістр, аспірант;
Шкурдода Ю.О. - д.ф.-м.н., доцент;
Ващенко С.М. - студент.

- [1] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert et al., Physical Review Letters 61(21), 2472 (1988) (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2472>).
- [2] G. Binasch, P. Grunberg, F. Saurenbach et al., Physical Review B. 39, 4828 (1989) (<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.4828>).
- [3] P. Grunberg, R. Schreiber, Y. Pang et al., Physical Review Letters 57(19), 2442 (1986) (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.2442>).
- [4] T. Shinjo, Nanomagnetism and spintronics (Second edition) (Elsevier Science and Technology, Japan, 2013).
- [5] B.Q. Wu and A. Kumar, Appl. Phys. Rev. 1, 011104 (2014) (<https://doi.org/10.1063/1.4863412>).
- [6] K. Barmak, A. Darbal, K.J. Ganeshetal., J. Vac. Sci. Technol. A 32, 061503 (2014) (<https://doi.org/10.1116/1.4894453>).
- [7] A.S. Kamzin, W. Fulin, V.R. Ganeev, A.A. Valiullin, L.D. Zaripova, Fizika tverdogo tela 55(9),1743 (2013) (in Russian).
- [8] A. Anjana, Y.K. Takahashi, MatsuiYoshio, K. Hono, J. Magn. Magn. Mater. 320, 250 (2008) (<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.05.027>).
- [9] A.S. Kamzin, E.V. Smetkov, E. Young, F. Wei, V. Khiang, Pysma V Zhurnal Tekhnicheskoi Fyzyky 34(1), 57(2008) (in Russian).
- [10] F. Wang, S. Doi, K. Hosoiri, T. Watanabe, Mater. Sci. Eng. A.375 1289, (2004) (<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.211>).
- [11] T. Katayama, T. Sugimoto, Y. Suzuki, M. Hashimoto, P. De Haan, J.C. Lodder, J. Magn. Magn. Mater. 104 - 107, 1002 (1992) ([https://doi.org/10.1016/0304-8853\(92\)90461-V](https://doi.org/10.1016/0304-8853(92)90461-V)).
- [12] M. Nakano, K. Matsuo, H. Fukunaga, J.M. Song, J. Magn. Magn. Mater. V. 272 – 276, e1933 (2004) (<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2003.12.907>).
- [13] I. Fujii, T. Shima, K. Takanashi, Mater. Transactions. 47(1), 47 (2006) (<https://doi.org/10.2320/matertrans.47.47>).
- [14] J. Ikemoto, Y. Imai, S. Nakagawa, J. Magn. Magn. Mater. 320, 3060 (2008) (<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.08.018>).
- [15] W.C. Wang, J.H. Li, X. He, B.X. Liu, J. Alloy. Compd., 476(1-2), L21 (2009). (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.09.154>).
- [16] S.Imada, A.Yamasaki, S.Suga // Appl. Phys. Lett., 90, 132507 – 1 (2007) (<https://doi.org/10.1063/1.2717516>).
- [17] A. Perumal, Y.K. Takahashi, T.O. Seki, K. Hono, Appl. Phys. Lett. 92, 132508(2008) (<https://doi.org/10.1063/1.2830708>).
- [18] C.C. Chiang, Chin-Huang Lai, Y.C. Wu, Appl. Phys. Lett.88, 152508 (2006) (<https://doi.org/10.1063/1.2191422>).
- [19] Y.C. Wu, L.W. Wang, C.-H. Lai, Appl. Phys. Lett.91, 072502 (2007) (<https://doi.org/10.1063/1.2770652>).
- [20] Y. Tamada, S. Yamamoto, M. Takano, S. Nasu, T. Ono, Appl. Phys. Lett.90, 162509 (2007) (<https://doi.org/10.1063/1.2728760>).
- [21] Y.K. Takahashi, T. Ohkubo, M. Ohnuma, K. Hono, Journal of Applied Physics 93, 7166 (2003) (<https://doi.org/10.1063/1.1555895>).

O.V. Bezdidko, Yu.O. Shkurdoda, S.M. Vashchenko

Magneto - Optical Properties of Two - Layer Film Systems Based on Fe and Pt

Sumy State University, Sumy, Ukraine, o.bezdidko@aph.sumdu.edu.ua

The paper shows the experimental results of the study of magneto - optical properties and phase composition of thin films and multilayers based on Fe and Pt. Samples were obtained in a high-vacuum chamber (10^{-8} Pa) by layer-by-layer deposition from pots at room temperature.

It has been shown that FCC solid solution of FePt is formed already in the process of deposition on the substrate (sital plates). Depending on the concentration of the atoms of the components in the unannealed samples, three phases can be formed: (i) s.s.Fe(Pt); (ii) Fe₃Pt; (iii) FePt.

The first sign of the beginning of ordering in the FCC phase of FePt should be considered the appearance of super reflections in the form of lines (001) and (002) during heat treatment. Depending on the total thickness of the multilayer or individual layers, the annealing temperature at which extrareflexes appear can vary in the range of 300 - 570 K. All the samples obtained have a low coercivity (0.25 - 0.4 mT). Magneto-optical studies have shown that an increase in the content of the non-magnetic component decreases the main magnetic characteristics. However, In [Fe(3)/Pt(3)]_n/S multilayers with the number of repeatable elements from 2 to 8 an increase in the main magnetic parameters is observed compared with bilayer films at the same effective thickness.

Keywords: thin films; spintronics; magneto-optical properties; Fe; Pt.