

Магніторезистивні та магніто-оптичні ефекти в гранульованих плівкових сплавах на основі Co, Au і Fe

О.В. Федченко, С.І. Проценко, Л.В. Однодворець, І.В. Чешко, І.Ю. Проценко

Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

(Одержано 15.03.2017; опубліковано online 27.07.2017)

Наведені результати дослідження магніторезистивних властивостей (магнітоопір) і ефекту Кера (кут поворота Кера у залежності від індукції магнітного поля, коерцитивність і намагніченість) тричотиришарових плівок Au(3)/Co(20)/Fe(70)/П, Au(3)/Co(3)/Au(6)/Fe(20)/П, Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/П, Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/П та Au(3)/Co(20)/Au(6)/Fe(3)/П (в дужках вказана товщина в нм), сконденсованих у вакуумі 10^{-8} Па на монокристалічну підкладку (100) MgO і аморфну SiO₂/Si. Установлено, що у плівкових системах реалізується анізотропний феромагнітний опір із амплітудою від 0,1-0,2% до 0,5-0,7%. На основі вимірювання ефекту Кера отримано, що величина коерцитивності змінюється в межах від декількох до 40 мТл. Плівки на підкладках із (100)MgO мають двовісну, а на SiO₂/Si – одновісну магнітну анізотропію.

Ключові слова: Плівки на основі Co, Au та Fe, Магнітоопір, Ефект Кера, Коерцитивність, Намагніченість.

DOI: [10.21272/jnep.9\(4\).04011](https://doi.org/10.21272/jnep.9(4).04011)

PACS numbers: 75.70.Cn, 81.15.Np

1. ВСТУП

Інтерес дослідників до вивчення магніторезистивних і магнітооптичних властивостей плівкових матеріалів пов'язана, в першу чергу, з їх можливим застосуванням для реалізації високощільного запису інформації, що є актуальною проблемою інформаційних технологій [1]. Реєстрація інформації магнітними, оптичними і гібридним методами базується на використанні нанорозмірних матеріалів. Багатошарові плівки і гранульовані плівкові сплави знаходять широке застосування в магнітоелектронних пристроях. Значна увага в технологічному аспекті приділена можливості контролю як величини магніторезистивного ефекту в процесі формування чутливих елементів сенсорів різного функціонального призначення, так і безконтактного оптичного контролю величини магнітоопору [2]. Однією із методик досліджень магнітних властивостей плівок є магнітооптичний ефект Керра, який застосовується при дослідженні електронної структури феромагнітних металів і сплавів, доменної структури феромагнетиків, при вивченні структури поверхневого шару полірованого металу, в магнітно-силових мікроскопах для вивчення магнітної топології зразків та оптоволоконних технологій для електричної модуляції оптичних сигналів. У нашій попередній роботі [3] представлені результати аналізу літературних і власних результатів стосовно фазового складу, електрофізичних і магніторезистивних властивостей гранульованих плівкових сплавів на основі Co і Ag або Au. Зроблено висновок, що величина гігантського магнітоопору повністю визначається температурою вимірювання та досконалістю гранульованого стану. Мета даної роботи (ГМО) полягала у дослідженні магніторезистивних та магнітооптичних ефектів в плівкових системах на основі Co, Au та Fe.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вимірювання магнітоопору $MO = [(R(B) - R(0))/R(0)]$ проводились за чотириточковою схемою у трьох геометріях орієнтації магнітного поля: поздовжній, поперечній та перпендикулярній. При поздовжній геометрії лінії магнітного поля паралельні напрямку протікання струму та поверхні плівки, при перпендикулярній – перпендикулярні напрямку протікання струму та площині поверхні плівки, при поперечній – перпендикулярні напрямку протікання струму та паралельні поверхні плівки. Керування процесом вимірювання в автоматизованому режимі відбувалося за допомогою програмного забезпечення, що було розроблене в середовищі LabVIEW. MO визначався при різних кутах повороту (φ) зразка відносно напрямку ліній магнітного поля з кроком у 10°. Вимірювання проводились, як і в роботі [4], при переході від перпендикулярної до поперечної або до поздовжньої геометрії, тобто при повороті від 0 до 90° при різному під'єднанні точкових контактів (рис. 1).

Криві намагнічування вимірювалися методом магніто-оптичного ефекту Кера (МОКЕ) при поздовжній та перпендикулярній орієнтації магнітного поля (намагніченості плівкової системи) при повороті зразка на кут α (рис. 1). Дана методика дала змогу побудувати в полярних координатах залежності коерцитивної сили (B_c) від кута повороту зразка та визначити зміни MO при різних кутах між напрямком протікання струму в плівці та силовими лініями прикладеного магнітного поля. Плівкові зразки у вигляді тришарової системи Au(3)/Co(20)/Fe(70)/П та чотиришарових систем Au(3)/Co(3)/Au(6)/Fe(20)/П, Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/П, Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/П та Au(3)/Co(20)/Au(6)/Fe(3)/П (в дужках вказана товщина в нм) конденсувалися у

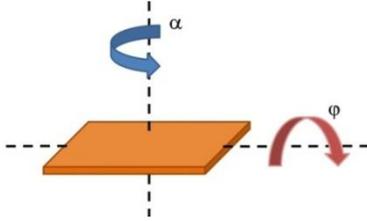


Рис. 1 – Схематичне зображення кутів повороту зразка при вимірюванні МО (кут ϕ) та МОКЕ (кут α)

надвисокому вакуумі (тиск залишкової атмосфери $7 \cdot 10^{-8}$ Па) із швидкістю конденсації один моноатомний шар за хвилину. Надалі П відповідає (100)MgO або SiO₂/Si у випадку тришарової або SiO₂/Si у випадку чотиришарової системи. Термовідпалювання до 840К здійснювалося у вакуумі 10^{-7} Па протягом 60 хвилин.

Таблиця 1 – Розшифрування електронограми від плівкової системи Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/П

$T_B = 300$ K					$T_B = 450$ K				
I , в.о.	d_{hkl} , нм	hkl	фаза	a , нм	I , в.о.	d_{hkl} , нм	hkl	фаза	a , нм
Д.С. 0,86	0,235	111	Au	0,407	Д.С. 0,97	0,235	111	Au	0,407
Д.С. 0,94	0,203	002 110	ГЦП- Co α -Fe	– 0,287	С. 0,68	0,203	002 110	ГЦП- Co α -Fe	– 0,287
сл. 0,26	0,144	220 200	Au α -Fe	0,408 0,288	сл. 0,24	0,144	220 200	Au α -Fe	0,408 0,288
сл. 0,25	0,123	311	Au	0,409	сл. 0,32	0,123	311	Au	0,408
сл. 0,21	0,118	222 211	Au α -Fe	0,407 0,288					
Д.сл. 0,09	0,093	331	Au	0,407					
Д.сл. 0,08	0,091	310	α -Fe	0,288					
$\bar{a}(\text{Au}) = 0,408 \pm 0,001$ нм $a_o(\text{Au}) = 0,408$ нм $\Delta a = \pm 0,001$ нм $\bar{a}(\alpha\text{-Fe}) = 0,288 \pm 0,001$ нм $a_o(\alpha\text{-Fe}) = 0,289$ нм \bar{a} – середнє значення параметра					$\bar{a}(\text{Au}) = 0,408 \pm 0,001$ нм $a_o(\text{Au}) = 0,408$ нм, $\Delta a = \pm 0,001$ нм $\bar{a}(\alpha\text{-Fe}) = 0,288 \pm 0,001$ нм Д.С. – дуже сильна, С. – сильна, сл. – слабка, Д.сл. – дуже слабка				

Електронно-мікроскопічні і електрографічні дослідження кристалічної структури проводилися за допомогою електронного мікроскопа ПЕМ-125К. У таблиці 1 наведений приклад розшифрування електронограми від чотиришарового зразка Au(3)/Fe(20)/Au(3)/Co(3)/П.

Хімічний склад зразків досліджувався методом EDAX (растровий мікроскоп JSM-6400). Оскільки взаємна розчинність атомів Co і Fe у решітці Au незначна, то обмежені тверді розчини (т.р.) Au(Co) або Au(Fe) можна трактувати як псевдосплави із елементами гранульованого стану. Приклад EDAX-спектру наведений на рис. 2.

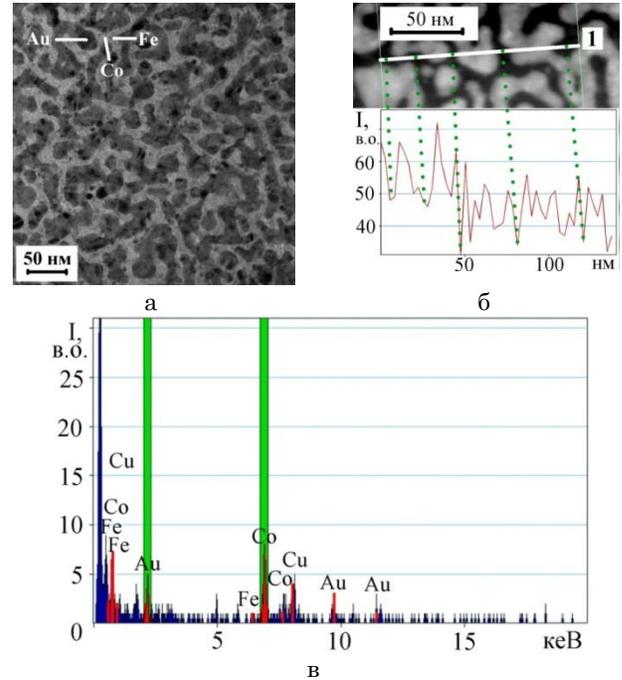


Рис. 2 – Мікрознімок плівки Au(3)/Co(20)/Fe(70)/П після відпалювання до 570 K (а), фрагмент попереднього мікрознімка, де вказана лінія (1), вздовж якої проводився елементний аналіз (б), та відповідний EDAX-спектр (в)

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Магніторезистивний ефект

Результати цього підрозділу представляють собою продовження досліджень роботи [4] на прикладі дещо інших плівкових систем (інше чергування шарів та їх товщини), але, перш за все, ми ставили за мету дати нову трактовку як попереднім [4], так і нашим результатам. Це зауваження до деякої міри стосується також результатів, представлених у підрозділі 3.2.

Плівкові системи Au/Co(30)/Fe(30)/П на основі Co, Au і Fe, які були вирощені орієнтовано на підкладці MgO(100) та на аморфній підкладці SiO₂/Si, мають відмінний структурний стан та різну інтенсивність протікання дифузійних процесів в них. Це істотно впливає на їх магнітні властивості. Наприклад, дослідження МО показали, що система, яка вирощена епітаксіально, проявляє анізотропію при різних кутах повороту зразка (ϕ) відносно силових ліній магнітного поля. Подібний ефект спостерігається під час переходу від перпендикулярної до поздовжньої або поперечної геометрії вимірювання МО (рис. 3). Система Au(3)/Co(30)/Fe(30)/SiO₂/Si має майже незмінні залежності МО незалежно від повороту зразка (рис. 3 в, г). Після відпалювання зразків до $T_B \cong 570$ K, величина МО системи, що вирощена епітаксіально, зменшується.

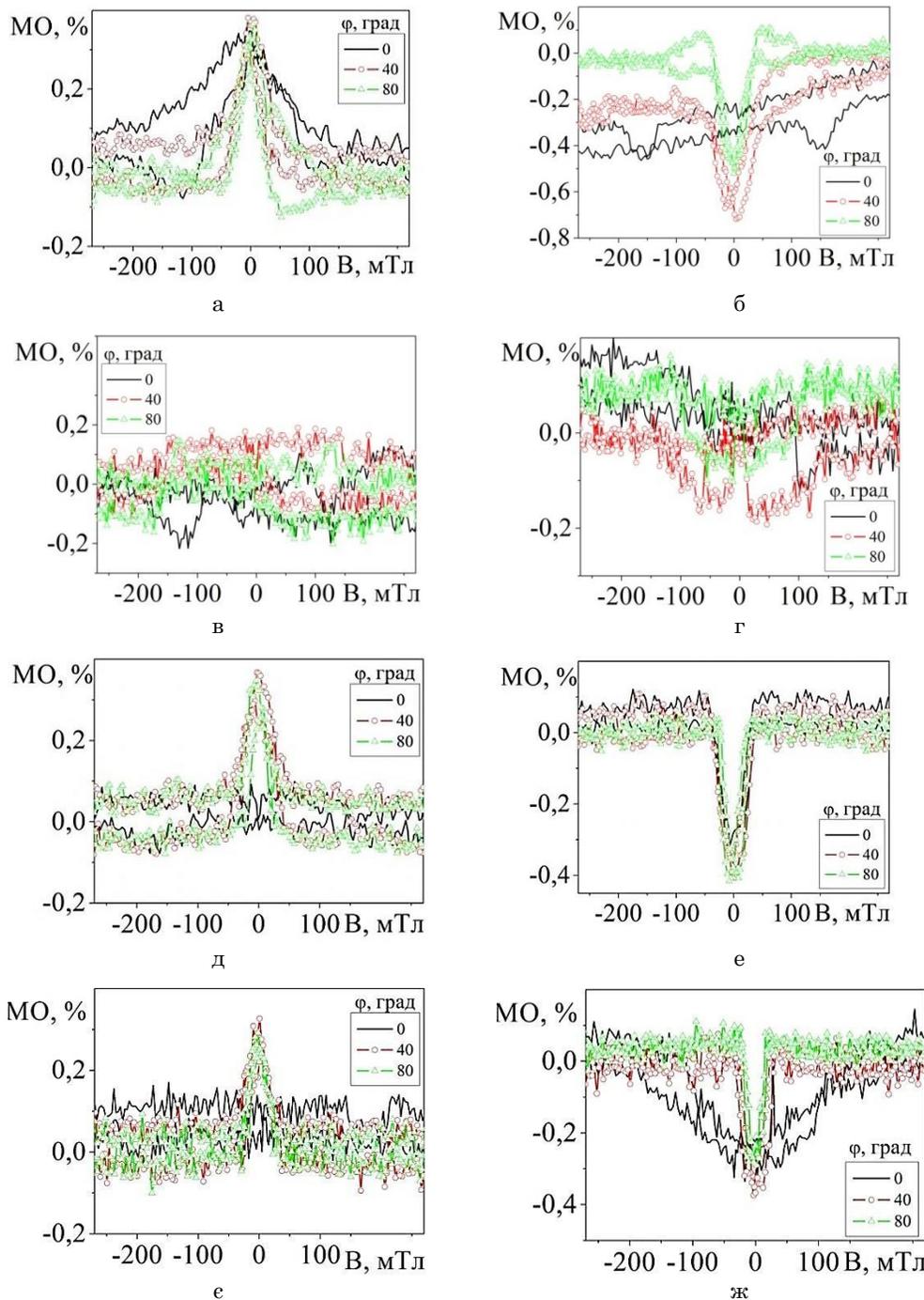


Рис. 3 – Залежності МО від кута повороту зразка для систем Au(3)/Co(30)/Fe(30)/MgO (а-г) та Au(3)/Co(30)/Fe(30)/SiO₂/Si (д-ж) при переході від перпендикулярної до поперечної (а,в,д,е) та від перпендикулярної до поздовжньої (б,г,е,ж) геометрії вимірювання при $T_B \approx 300$ К (а, б, д, е) та $T_B \approx 570$ К (в, г, е, ж)

Особливо це помітно при переході від перпендикулярної до поздовжньої геометрії вимірювання (рис. 3б, г, е, ж). У системі, яка конденсувалась на SiO₂/Si, навпаки, величина МО змінюється несуттєво (рис. 3е, ж). Але, після відпалювання до $T_B \approx 770$ К, магнітоопір зменшується

у декілька разів для усіх геометрій вимірювання (рис. 4). Описані особливості поведінки МО при термообробці можна пояснити утворенням обмежених т.р. Au(Co) і Au(Fe) із недосконалими елементами гранульованого стану (більш детально див.[3]).

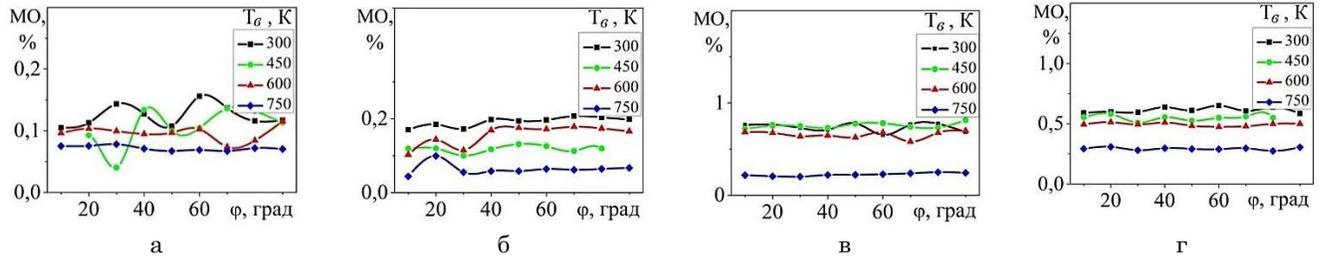


Рис. 4 – Залежності МО від T_0 для плівкових систем Au(3)/Co(3)/Au(6)/Fe(20)/SiO₂/Si (а), Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/SiO₂/Si (б), Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/SiO₂/Si (в) та Au(3)/Co(20)/Au(6)/Fe(3) /SiO₂/Si (г) при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання

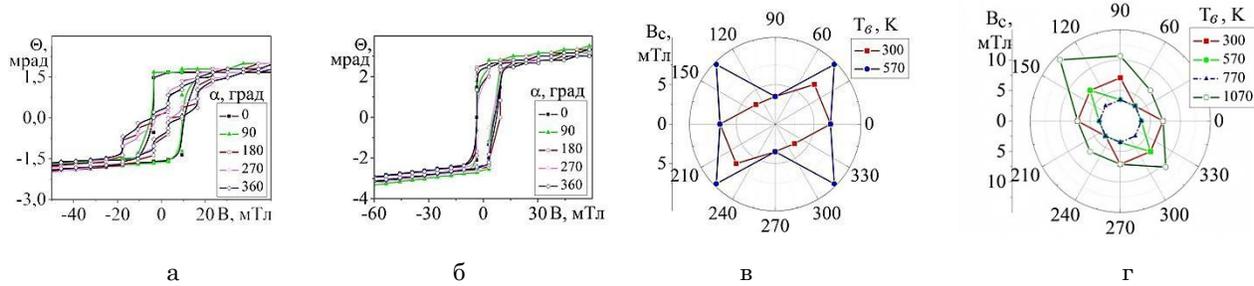


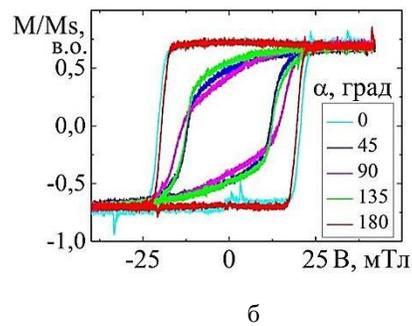
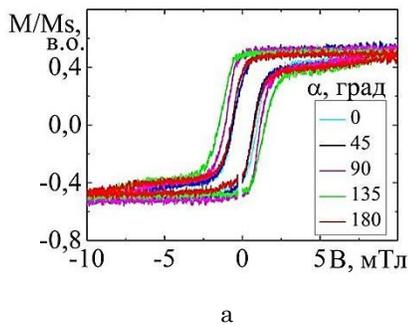
Рис. 5 – Магнітооптичні залежності кута Керра від індукції магнітного поля при поздовжній геометрії вимірювання для систем Au(3)/Co(30)/Fe(30)/MgO (а) та Au(3)/Co(30)/Fe(30)/SiO₂/Si після відпалювання до 750 К (б) при різних кутах повороту зразка (α); залежності $V_c(\alpha)$ у полярних координатах при різних температурах відпалювання для систем на монокристалі (110) MgO (в) та SiO₂/Si (г). Із роботи [4]

3.2 Магніто-оптичні дослідження

Магнітооптичні дослідження у поздовжній геометрії виявили чіткий прояв анізотропії для системи, яка вирощена направлено на монокристалі MgO(100). У цьому випадку характер залежності суттєво змінюється після відпалювання до 570 К, що не безпосередньо свідчить про наявність процесів дифузії та фазоутворення. На рис. 5 представлені залежності кута Керра від індукції магнітного поля та величини V_c від кута повороту α , які ілюструють вплив анізотропії монокристалевої підкладки на польову і кутову залежності магніто-оптичних характеристик та величину кута Керра тришарових плівок. У випадку ізотропної підкладки SiO₂/Si

польова залежність намагніченості чотиришарових плівок та їх коерцитивність повністю визначається порядком чергування магнітних і немагнітних шарів (рис. 6, 7).

Відносно товсті плівки Fe або Co ($d \cong 20$ нм) не впливають на величину намагніченості та коерцитивності, якщо конденсуються безпосередньо на підкладку, а не між шарами Au (рис. 6). Відмітимо, що у випадку монокристалічної підкладки у плівкових системах реалізується двовісна анізотропія (рис. 5), в той час, як у випадку аморфної підкладки має місце фактично одновісна анізотропія (див. також [5]), що пояснюється особливостями магнітної взаємодії шарів Co і Fe через тонкий ($d \cong 6$ нм) прошарок Au (рис. 7).



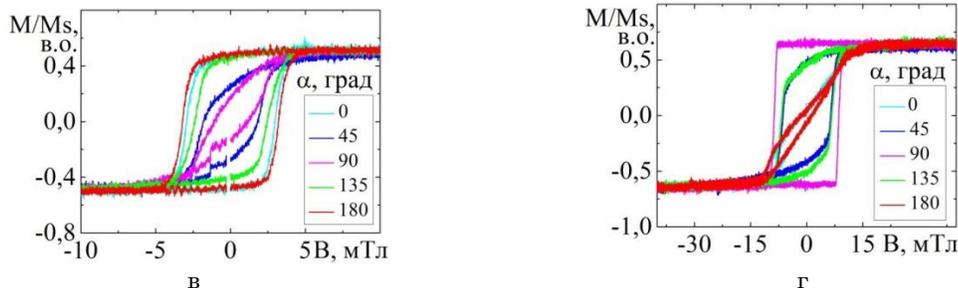


Рис. 6 – Залежність намагнічування від індукції магнітного поля для плівкових систем: Au(3)/Co(3)/Au(6)/Fe(20)/П (а), Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/П (б), Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/П (в) та Au(3)/Co(20)/Au(6)/Fe(3)/П (г). $T_B \cong 300$ К, M_S – намагніченість насичення, П – SiO₂/Si

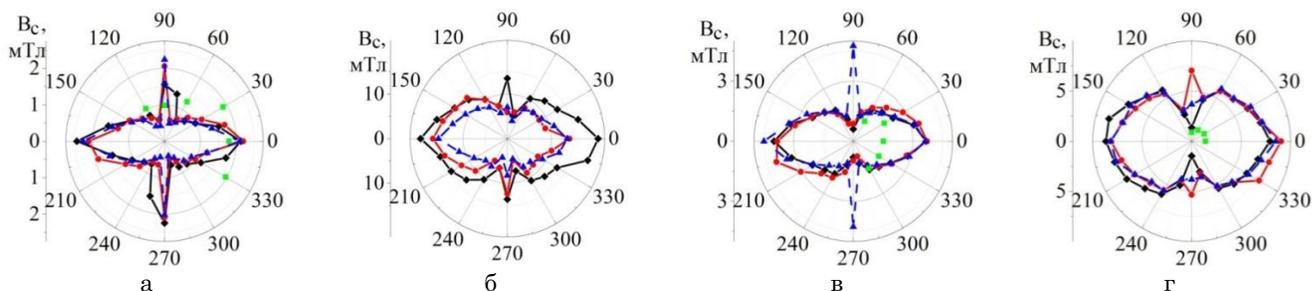


Рис. 7 – Залежності $B_c(\alpha)$ у полярних координатах при різних температурах відпалювання для плівкових систем: Au(3)/Co(3)/Au(6)/Fe(20)/П (а), Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/П (б), Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/П (в) та Au(3)/Co(20)/Au(6)/Fe(3)/П (г). Позначення, T_B , К: \blacklozenge – 300 К; \bullet – 450 К; \blacktriangle – 600 К та \blacksquare – 750 К

4. ВИСНОВКИ

Проведені дослідження магніторезистивних властивостей три- і чотиришарових плівок на основі тонких шарів α -Fe і Co ($d \cong 20$ нм) і ультратонких шарів Au ($d \cong 3$ і 6 нм) та α -Fe і Co ($d \cong 3$ нм) однозначно вказують на відсутність в них ефекту ГМО і його ознак, оскільки у всіх трьох геометріях вимірювання має місце анізотропний МО із малою амплітудою (від 0,1-0,2 % до 0,5-0,7 %). Причина цього пов'язана із нашим вибором немагнітної компоненти у вигляді ультратонких шарів Au, що не сприяє формуванню системи феромагнітних гранул у матриці Au як у невідпалених, так і відпалених

зразках, а значить не сприяє реалізації спін-залежного розсіювання електронів (СЗРЕ) і ефекту ГМО. Несуцільний характер плівки Au також не дозволяє реалізувати СЗРЕ на межах поділу (інтерфейсах) Au/Co і Au/ α -Fe. Таким чином, у наших дослідженнях формується пошаровою конденсацією плівкова система із звичайним феромагнітним МО, який має анізотропний характер. Додаткові дослідження магніто-оптичних характеристик вказують на те, що при формуванні плівкової системи на монокристалічній підкладці (100)MgO і аморфній SiO₂/Si магнітна анізотропія має двовісний або одновісний характер відповідно.

Magnetoresistive and Magneto-optical Effects in Granulare Film Alloys Based on Co, Au and Fe

O.V. Fedchenko, S.I. Protsenko, L.V. Odnodvoretz, I.V. Cheshko, I.Yu. Protsenko

Sumy State University, 2, Rymskyi-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine

The results of the study magnetoresistive properties (magnetoresistance) and Kerr effect (Kerr rotation angle versus magnetic field, coercive and magnetization) of three- and four-layer films Au(3)/Co(20)/Fe(70)/S, Au(3)/Co(3)/Au(6)/Fe(20)/S, Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/S, Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/S and Au(3)/Co(20)/Au(6)/Fe(3)/S (in parentheses indicate the thickness in nm), which was condensed in vacuum 10^{-8} Pa on single-crystal (100) MgO and amorphous SiO₂/Si substrates. It is established that the film systems implemented anisotropic ferromagnetic resistance with an amplitude from 0.1-0.2 % to 0.5-0.7 %. Based on Kerr measurements was established that the value coercive varies from a few mT to 40 mT. Films on substrates with a (100)MgO with two-axis anisotropy, and on the SiO₂/Si – uniaxial magnetic anisotropy.

Keywords: Films based on Co, Au and Fe, Magnetoresistance, Kerr effect, Coercive, Magnetization.

Магниторезистивные и магнито-оптические эффекты в гранулированных пленочных сплавах на основе Co, Au и Fe

Е.В. Федченко, С.И. Проценко, Л.В. Одиногорец, И.В. Чешко И.Е. Проценко

Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

Приведены результаты исследования магниторезистивных свойств (магнитосопротивление) и эффекта Керра (угол поворота Керра в зависимости от индукции магнитного поля, коэрцитивность и намагниченность) трех- и четырехслойных пленок Au(3)/Co(20)/Fe(70)/П, Au(3)/Co(3)/Au(6)/Fe(20)/П, Au(3)/Fe(20)/Au(6)/Co(3)/П, Au(3)/Fe(3)/Au(6)/Co(20)/П и Au(3)/Co(20)/Au(6)/Fe(3)/П (в скобках указана толщина в нм), сконденсированных в вакууме 10^{-8} Па на монокристаллическую (100)MgO и аморфную SiO₂/Si подложки. Установлено, что в пленочных системах реализуется анизотропное ферромагнитное сопротивление с амплитудой от 0,1-0,2 % до 0,5-0,7 %. На основе измерения эффекта Керра получено, что величина коэрцитивности изменяется в пределах от нескольких до 40 мТл. Пленки на подложках (100)MgO имеют двухосную а на SiO₂/Si – одноосную магнитную анизотропию.

Ключевые слова: Пленки на основе Co, Au и Fe, Магнитосопротивление, Эффект Керра, Коэрцитивность, Намагниченность.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. R. Wood, *J. Magn. Magn. Mat.* **321**, 555 (2009).
2. G.A. Held, G. Grinstein, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1501 (2001).
3. I.V. Cheshko, I.Yu. Protsenko, L.V. Odnodvoretz, M.O. Shumakova, O.P. Tkach, *J. Nano- Electron. Phys.* **8** No 4, 04028 (2016).
4. O.V. Fedchenko, A.I. Saltykova, S.I. Protsenko, *J. Nano- Electron. Phys.* **4** No 3, 03016 (2012).
5. S. Kenane, J. Voiron, N. Benbrahim, E. Chainet, F. Robaut, *J. Magn. Magn. Mat.* **297**, 99 (2006).