

## МАГНІТООПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРАНУЛЬОВАНИХ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ Co TA Cu, Ag I Au

Д. М. Кондрахова, З. М. Макуха, О. П. Ткач, І. Ю. Проценко, О. В. Кузовлев<sup>1</sup>

*Сумський державний університет, Україна*

<sup>1</sup>*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна*

Надійшла до редакції 15.12.2014

Проведено дослідження магнітооптичних властивостей плівкових систем Co/Cu(Ag, Au), в яких зберігається індивідуальність окремих шарів або формуються тверді розчини (т. р.). У свіжесконденсованих зразках Co/Cu та Co/Au, на відміну від Co/Ag, має місце прямокутна форма петлі гістерезису, що пояснюється формуванням т. р. вже в процесі конденсації тонких плівок. Введено до розгляду нове поняття деформаційного коефіцієнту коерцитивної сили МОКЕ і отримана його деформаційна залежність.

**Ключові слова:** тверді розчини, МОКЕ, коерцитивна сила, деформаційний коефіцієнт коерцитивної сили.

## МАГНІТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ Co И Cu, Ag И Au

Д. Н. Кондрахова, З. Н. Макуха, Е. П. Ткач, И. Е. Проценко, О. В. Кузовлев

Проведены исследования магнитооптических свойств пленочных систем Co/Cu(Ag, Au), в которых сохраняется индивидуальность отдельных слоев или формируются твердые растворы (т. р.). В свежесконденсированных образцах Co/Cu и Co/Au, в отличие от Co/Ag, имеет место прямоугольная форма петли гистерезиса, что объясняется формированием т. р. уже в процессе конденсации тонких пленок. Введено в рассмотрение новое понятие деформационного коэффициента коэрцитивной силы МОКЕ и получена его деформационная зависимость.

**Ключевые слова:** твердые растворы, МОКЕ, коэрцитивная сила, деформационный коэффициент коэрцитивной силы.

## MAGNETOOPTICAL PROPERTIES OF GRANULAR FILM SYSTEMS BASED ON Co AND Cu, Ag AND Au

D. M. Kondrakhova, Z. M. Makukha, O. P. Tkach, I. Yu. Protsenko, O. V. Kuzovlev

A study of magneto-optical properties of film systems Co/Cu (Ag, Au), which contain the preserved individuality separate layers or formed solid solutions (s. s.). In as-deposited samples Co/Cu and Co/Au, in unlike the Co/Ag, is a rectangular shape of the hysteresis loop, due to the formation of s. s. already in the process of condensation thin films. Introduce a new notion of the strain coefficient of coercive force MOKE and received its strain dependence.

**Keywords:** solid solutions, MOKE, coercive force, strain coefficient of coercive force.

### ВСТУП

З розвитком спінтроники велику увагу привернуло до себе вивчення магнітних та магнітооптичних процесів в металевих та напівпровідникових структурах [1]. Постійно ведуться пошуки нових матеріалів із необхідними магнітними властивостями для створення різноманітних чутливих елементів. У залежності від типу вибраного матеріалу або товщини та кількості його прошарків можна отримати плівкові системи навіть із наперед заданою орієнтацією магнітних моментів. З цієї точки зору найбільш перспективними

можна вважати матеріали із можливим спін-залежним розсіюванням електронів, наприклад, плівкові системи на основі Co/Cu, (Ag або Au), які широко використовуються як елементна база для створення засобів мікроелектроніки та спінтроники, через відкриття в них явища гігантського магнітоопору та стабільності їх вихідних характеристик [2—4]. Системи на основі даних матеріалів утворюють гранульований сплав із розміщенням феромагнітних гранул в немагнітній матриці, вони широко знаходять застосування в приладобудуванні

завдяки низькому рівню шуму, через відсутність доменних стінок, використовуються для формування чутливих елементів датчиків магнітного поля, магнітооптичних пристроїв запису інформації та ін. [5—7]. У гранульованих сплавах магнітними властивостями можна керувати змінюючи розміри феромагнітних частинок або їх концентрацію [8].

### МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Отримання плівкових зразків на основі  $\text{Co}$  з розділяючим шаром  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ag}$  або  $\text{Au}$  проводилося пошаровою конденсацією методом термічного випарування на підкладку з аморфного ситалу та полістиролу (установка ВУП-5М, тиск залишкових газів  $P = 10^{-4}$  Па).

Установка для дослідження магнітооптичних властивостей складалася з генератора світла (лазера), поляризатора, оптичної лінзи, за допомогою якої формувалася пучок світла з довжиною хвилі  $\lambda = 670$  нм та направлявся на зразок, що знаходився в магнітному полі 150 мТл. Після відбиття від зразка світло з плоскополяризованого перетворювалось в еліптично поляризоване, відбувався поворот площини поляризації. Далі сигнал прямував на ще одну збираючу лінзу та модулятор Фарадея, що представляв собою соленоїд зі скляним осердям, де відбувалась компенсація зміни кута площини поляризації за допомогою струму, прикладеного до модулятора Фарадея. Після чого сигнал потрапляв на перетворювач, фотодетектор, підсилювач та виводився на комп'ютер, де будувалася в автоматизованому режимі петля гістерезису, з якої визначались кут повороту Керра ( $\Theta$ ), індукція насичення та коерцитивна сила ( $B_c$ ).

У залежності від напрямку поширення світла  $\vec{k}$  відносно орієнтації вектора намагніченості  $\vec{M}$  виділяють три геометрії вимірювання ефекту Керра (МОКЕ) — полярний, меридіальний та екваторіальний, перші два відносяться до поздовжньої, а останній до поперечної (рис. 1). У нашому випадку, у зв'язку з особливістю установки, досліджувалися лише полярний та меридіальний ефекти Керра. Слід зазначити, суть

полярного та меридіального ефекту Керра полягає у повороті площини поляризації та появи еліптичності у відбитого світла при намагнічуванні зразка (кристала). В свою чергу екваторіальний ефект полягає у зміні інтенсивності та зміщенні фази  $p$ -компоненти світла, яке відбите від феромагнітного матеріалу при його намагнічуванні.

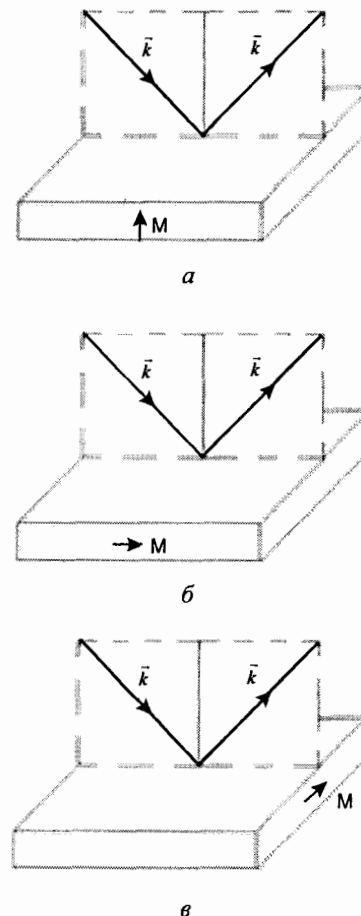


Рис. 1. Схематичне зображення взаємної орієнтації хвильового вектора ( $\vec{k}$ ) та намагніченості ( $\vec{M}$ ) при спостереженні полярного (а), меридіального (б) та екваторіального (в) ефектів Керра

Деформація зразків на розтяг проводилася в магнітному полі з використанням спеціального пристрою, який дозволяв отримувати видовження плівок до 10 % (для цього як підкладки використовувався полістирол).

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Матеріали із можливим спин-залежним розсіюванням електронів розглядаються як основні при створенні чутливих елементів датчиків магнітного поля, сенсорів та пристроїв

магнітного або магнітооптичного записування інформації. У залежності від області застосування до них висувається ряд вимог: висока чутливість до магнітного поля, стабільні магнітні та структурні характеристики тощо. Гранульовані сплави та тверді розчини мають унікальний структурно-фазовий стан та магнітні властивості, але для повного розуміння процесів, що відбуваються в системах під впливом температури та дією зовнішнього магнітного поля необхідно також досліджувати їх магнітооптичні властивості.

Для того, щоб оцінити внесок немагнітних шарів дво- чи тришарових систем на основі Co у величину МОКЕ, нами були проведені дослідження магнітооптичних властивостей одношарових плівок Co (рис. 2). У спін-вентильних структурах не рідко використовують поєднання шарів Co різної товщини, оскільки тонкий шар (вільний) легко переорієнтовується по магнітному полю, а більш товстий ( $d > 40$  нм) виступає у ролі закріплюючого або основного.

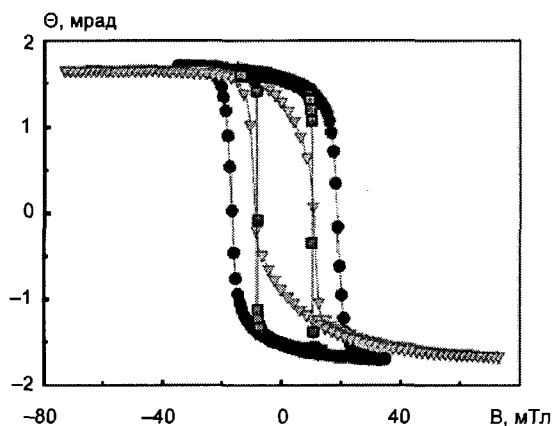


Рис. 2. Залежності МОКЕ в одношарових плівках Co(9)/П (●), Co(25)/П (▼) та Co(36)/П (⊛). У дужках вказана товщина в нм, П — підкладка

Дослідження кристалічної структури та фазового складу одношарових плівок Co та Cu було детально описано в роботах різних авторів (див., наприклад, [9—10]), що дозволило нам визначити необхідні умови конденсації для отримання плівок з кристалічною структурою та майже повною відсутністю оксидної фази. Одношарові плівки, як і масивний Co, мають дві поліморфні модифікації — низькотемпературну

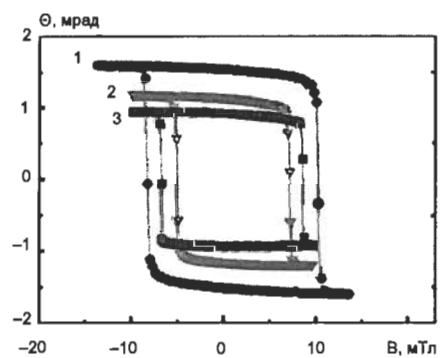
ГЦП-фазу та високотемпературну ГЦК-фазу, з параметром ґратки  $a_0 = 0,2505$  нм,  $c_0 = 0,4089$  нм та  $a_0 = 0,3548$  нм, відповідно. Поліморфний ГЦП → ГЦК перехід у масивних зразках відбувається при температурах  $T = 700$  К, а в тонких плівках, внаслідок фазового розмірного ефекту, при  $T < 700$  К [9]. Слід зазначити, що вихідні одношарові плівки Co дрібнодисперсні.

Одношарові плівки Cu, Ag та Au використовувалися як розділюючий шар в тришаровій системі феромагнетик / немагнітний матеріал / феромагнетик. Для них характерний середній розмір кристалітів ( $L$ ) знаходиться в межах 10—15 нм, проте в процесі термовідпалювання значення  $L$  збільшується у декілька разів, що свідчить про інтенсивне проходження процесів рекристалізації у даних плівках.

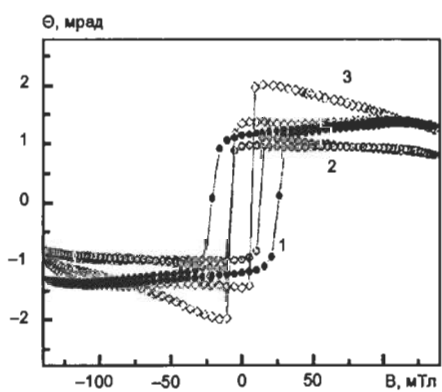
Для коректного аналізу фазового складу плівкової системи на основі Co та Cu були проведені дослідження дво- та тришарових зразків, з різною концентрацією Co компоненти, з послідовним порівнянням їх структурно-фазових властивостей. Як свідчать дані електронографічних досліджень, двошарові плівкові системи Cu/Co/П втрачають індивідуальність шарів ще в процесі пошарової конденсації компонент. При розшифруванні електронограм від таких систем встановлено, що при  $T = 300$  К фазовий склад відповідає т. р. (Cu, Co) + ГЦП-Co. У процесі відпалювання до 700 К та подальшому охолодженні до 300 К не спостерігається істотних змін у фазовому стані плівкових систем. Середній параметр ґратки (т. р.(Cu, Co) становить  $0,3590 \pm 0,0005$  нм. Отримані дані узгоджуються з рядом робіт інших авторів [11—15].

Для свіжесконденсованих плівок Co характерна прямокутної форми петля гістерезису з малою величиною магнітного поля, яке необхідно прикласти для переорієнтації магнітних моментів (рис. 3). Осадження шару Cu на Co дає свій внесок у вихідний сигнал МОКЕ плівкових зразків, що проявляється у зменшенні значення залишкової намагніченості та коерцитивної сили (від 8,2 до 4,9 мТл). Така поведінка обумовлена наявністю діаманітного матеріалу,

формуванням т. р. (Cu, Co) за рахунок конденсаційно-стимульованої дифузії в процесі осадження плівки, а також чутливістю установки МОКЕ. Додавання верхнього шару Co, при отриманні тришарової системи Co(6)/Cu(10)/Co(36)/П, приводить до збільшення  $B_c$  за рахунок магніто-жорстких властивостей Co та його фазового стану, що відповідає ГЦП-Co, оскільки осадження усіх плівок Co відбувалося при температурах  $T_n \cong 300$  К. Ефект МОКЕ у плівкових матеріалах на основі Co і Cu (рис. 3.) проявляє збереження форми вихідного сигналу, що дозволяє використовувати дану систему як чутливий елемент датчика перемикача магнітного поля при кімнатних температурах. Згідно роботи [16] величина коерцитивної сили залежить від концентрації Co у т. р., так при її зменшенні від 50 до 30 %  $B_c$  зростає вдвічі, подібна тенденція спостерігається і у наших зразках Co(5)/Cu(x)/Co(20)/П, де  $x = 5, 10, 15$  нм (рис. 3 б).



а



б

Рис. 3. Залежності МОКЕ в плівкових системах: а — Co(36)/П (1), Cu(10)/Co(36)/П (2), Co(6)/Cu(10)/Co(36)/П (3) та б — Co(5)/Cu(x)/Co(20)/П, де  $x = 5$  (крива 1), 10 (2) і 15 (3) нм

В результаті термовідпалювання системи Cu/Co/П до 700 К внаслідок формування т. р. (Cu, Co) та поліморфного перетворення ГЦП → ГЦК петля гістерезису звужується і стає більш пологою (рис. 4).

В тришарових системах Co/Cu/Co/П, які були відпалені до 500, 700 та 900 К, на залежностях МОКЕ спостерігається зміна петлі гістерезису (рис. 4 з). При температурах вищих 300 К у системі Co/Cu/Co внаслідок термовідпалювання відбувається заліковування дефектів кристалічної решітки та повне перемішування компонент з формуванням т. р. (Cu, Co). Підвищення температури відпалення до 900 К приводить до розшарування т. р. (Cu, Co) і появи гранул Co, що співпадає з результатами авторів роботи [17].

Система Ag/Co характеризується незмішуваністю компонент при низьких температурах. Відмічаємо зміну форми петлі МОКЕ у зразках Ag(8)/Co(36)/П та Co(6) Ag(8)/Co(36)/П у порівнянні з одношаровими плівками Co(36)/П (рис. 5). У даному випадку форма петлі гістерезису майже не видозмінюється, коливаються лише значення залишкової намагніченості, на що впливає наявність немагнітного матеріалу (Ag).

При відпалюванні плівкових зразків Ag/Co/П до 700 К відбувається перехід до т. р. (Ag, Co). На розмір кристалітів суттєво впливає концентрація Co. Так при  $c_{Co} = 40\text{--}70$  ат.%  $L$  змінюється від 20 до 9 нм [18], внаслідок чого змінюються і вихідні характеристики МОКЕ, зокрема, величина коерцитивної сили. Форма петлі МОКЕ у двошаровій системі Ag(4)/Co(25)/П у невідпаленому стані має форму подібну до одношарової плівки Co, а тонкий шар Ag вносить свій внесок лише після термовідпалювання, внаслідок чого формується т. р. (Ag, Co).

Подібною до Ag/Co є система Au/Co, в якій зберігається індивідуальність шарів під час конденсації та утворення т. р. з виділенням гранул Co при термообробці  $T = 700$  К. Рис. 6 ілюструє форму петлі МОКЕ у плівках Co та дво- і тришарових плівках на основі Co і Au. Додавання шару Au зменшує величину залишкової намагніченості.

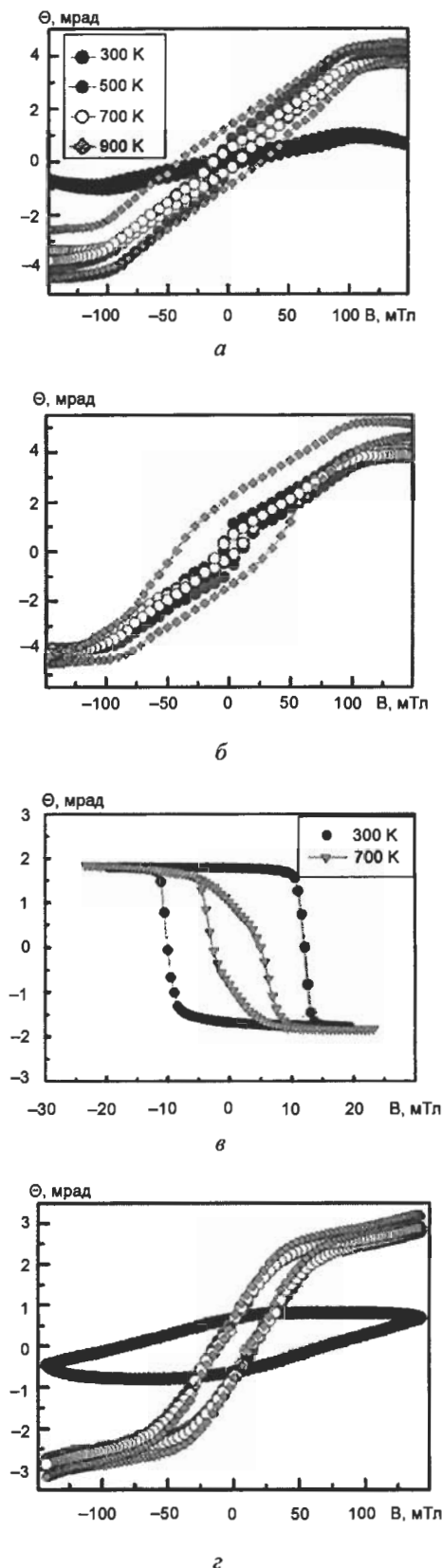


Рис. 4. Залежності величини МОКЕ від магнітного поля у свіжосконденсованих та відпалених до 500, 700, 900 К зразків: Cu(10)/Co(15)/П (*a* — поздовжня геометрія, *b* — перпендикулярна геометрія), Cu(4)/Co(25)/П (*b*) та Co(10)/Cu(6)/Co(10)/П (*c*)

## МАГНІТООПТИЧНИЙ ДЕФОРМАЦІЙНИЙ КОЕФІЦІЄНТ

Дослідження впливу деформації на МОКЕ — цікаві з точки зору можливості виготовлення чутливого елемента датчику, який би реєстрував відразу декілька величин одночасно, зокрема деформацію та зміну магнітного поля.

В роботі [19] розглядається вплив повздовжньої деформації на МОКЕ для двошарової плівкової системи Fe(32 нм)/Pt(3 нм)/П та мультишару [Fe(3 нм)/Pt(3 нм)]<sub>8</sub>/П. Автори спостерігали збільшення кута повороту площини поляризації при деформації ( $\varphi_d$ ) у порівнянні з  $\varphi_0$  (кут повороту при  $\epsilon$ ).

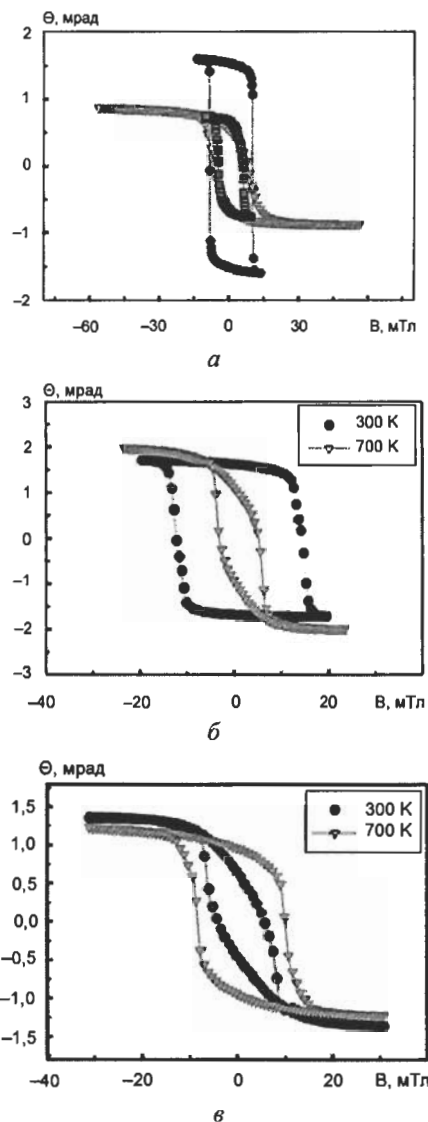


Рис. 5. Залежності МОКЕ від магнітного поля у свіжосконденсованих плівкових зразків (*a*, *b*, *c*) та відпалених до 700 К (*b*, *c*): *a* — Co(36)/П (●), Ag(8)/Co(36)/П (▼) та Co(6)Ag(8)/Co(36)/П (■); *b* — Ag(4)/Co(25)/П; *c* — Ag(3)/Co(7)/Ag(4)/Co(25)/П

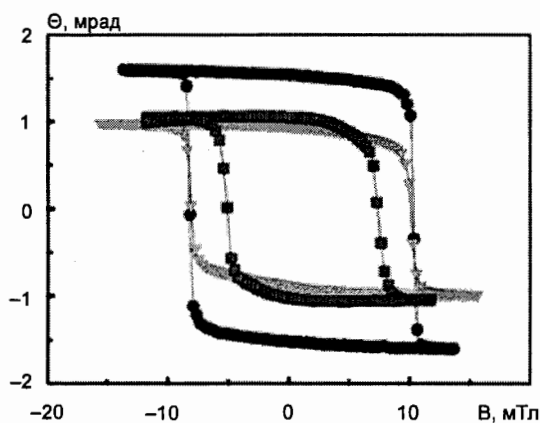


Рис. 6. МОКЕ у плівках Co(36)/П (•), Au(6)/Co(36)/П (▼) та Co(6)/Au(6)/Co(36)/П (■)

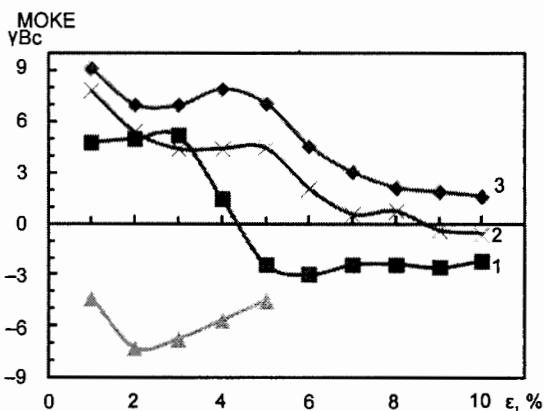


Рис. 7. Залежність ДККСМ від деформації плівкових систем: 1 — Co(36)/П, 2 — Ag(8)/Co(36)/П, 3 — Au(5)/Co(36)/П, 4 — Cu(10)/Co(36)/П

Кількісною характеристикою магнітооптичного деформаційного ефекту, на наш погляд, може бути деформаційний коефіцієнт коерцитивної сили МОКЕ (ДККСМ), який записаний по аналогії для коефіцієнту тензочутливості або магнітодеформаційного ефекту [19, 20]:

$$\gamma_{B_c}^{\text{МОКЕ}} = \frac{1}{B_{c_0}} \cdot \frac{\Delta B_c}{\Delta \epsilon_l}$$

де  $B_c$ ,  $B_{c_0}$  — величина коерцитивної сили при поздовжній деформації ( $\epsilon_l$ ) та за її відсутності.

Отримані результати розрахунків представлені на рис. 7. Для одношарових плівок Co та зразків, в яких зберігається індивідуальність шарів, (Ag(8)/Co(36)/П, та Au(5)/Co(36)/П) величина ДККСМ є додатною величиною і від'ємною для плівкової системи Cu(10)/Co(36)/П, в якій відбувається формування т. р. вже у процесі осадження плівок. Така поведінка обумовлена появою великої кількості дефектів кристалічної будови, пластичною деформацією зразків, що в цілому приводить до збільшення коерцитивної сили.

Вимірювання  $B_c$  використовується у коерцитометрії — неруйнівний контроль металевих конструкцій. Внаслідок накопичення структурних мікро- та макродефектів і зміни фазового складу значення  $B_c$  також буде змінюватися в сторону збільшення.

## ВИСНОВКИ

Розглядаючи системи на основі Co та Cu, Ag або Au із урахуванням особливостей формування т. р. та гранульованих сплавів в них, можна зробити наступні висновки. При кімнатних температурах у свіжесконденсованому стані плівкові зразки Co та Co/Au/Co можуть використовуватися як чутливі елементи магнітних датчиків або перемикачів, системи Co/Ag/Co через пологість кривої петлі гістерезису краще використовувати в датчиках вимірювання магнітного поля. Згідно розрахунків ДККСМ, при деформаціях більших за 4,2 % в плівці Co процеси дефектоутворення перестають давати внесок у величину коерцитивної сили.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми № 112U001381 за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України (2012 — 2014 рр.).

## ЛІТЕРАТУРА

1. Куницький Ю. А., Курилюк В. В., Однодворець Л. В., Проценко І. Ю. Основи спітроніки: матеріали, прилади та пристрої: навч. посіб. / — Суми: СумДУ, 2013. — 127 с.
2. Barheleny A., Gros V., Duvail J. L., Fert A., Morel R., Parent F., Petroff F., Steren L. B. Giant magnetoresistance in magnetic nanostructures // Nanostruct. Mat. — 1995. — Vol. 6. — P. 217—226.
3. Alphen A. M., Heijden P. A. A., Jonge W. J. M. Influence of annealing on structural and magnetic properties of Co/Ag multilayers with thin Co layers // J. Magn. Magn. Mater. — 1995. — Vol. 140—144. — P. 609—610.

4. Vavra W., Lee C. H., Lamelas F. J., He Hui, Clarke Roy, Uher C. Magnetoresistance and Hall effect in epitaxial Co/Au superlattices // *Phys. Rev. B.* — 1990. — Vol. 42, No. 7. — P. 4889—4892.
5. Djamal M., Ramli. Development of sensors based on giant magnetoresistance material // *Proc. Eng.* — 2012. — Vol. 32. — P. 60—68.
6. Freitas P. P., Silva F., Oliveira N. J., Melo L. V., Costa L., Almeida N. Spin valve sensors // *Sens. Actuat.* — 2000. — Vol. 81. — P. 2—8.
7. Vorobiov S. I., Shutylieva O. V., Pazukha I. M., Chornous A. M. Sensitive element of the magnetic field sensor based on three-layer film system Co/X/Co ( $X = Dy, Gd$ ) // *Technical Physics.* — 2014. — Vol. 59, No. 11, P. 1644—1649.
8. Исхаков Р. С., Фролов Г. И, Жигалов В. С. и др. Эффекты магнитного взаимодействия между суперпарамагнитными частицами в наногранулированных пленках Co // *Письма в ЖТФ.* — 2004. — Т. 30, № 16. — С. 51—57.
9. Фролов Г. И., Жигалов В. С., Мальцев В. К. Влияние температуры на структурные превращения в нанокристаллических пленках кобальта // *ФТТ.* — 2000. — Т. 42, № 2. — С. 326—328.
10. Мирзаев Д. А., Счастливец В. М., Ульянов В. Г. и др. Закономерности  $\beta \rightarrow \alpha$ -полиморфного превращения в кобальте при возрастании скорости охлаждения // *ФММ.* — 2002. — Т. 93, № 6. — С. 58—64.
11. Чешко И. В., Проценко С. И., Однодворец Л. В. и др. Магнитооптические и магниторезистивные свойства спин-клапанных структур на основе Co, Cu и Au // *Письма в ЖТФ.* — 2009. — Т. 35, № 19. — С. 53—60.
12. Чеботкевич Л. А., Огнев А. В., Грудин Б. Н. Структура и магнитная анизотропия пленок Co/Cu/Co // *ФТТ.* — 2004. — Т. 46, вып. 8. — С. 1449—1554.
13. Yang G. H., Geng K. W., Zeng F. et al. Formation of metastable phases and their effect on the magnetic properties of Co-Cu multilayers // *Thin Solid Films.* — 2005. — Vol. 484. — P. 283—288.
14. Касютич О. И., Федосюк В. М., Точицкий Т. А. Структура наноразмерных систем Co/Cu и механизм его формирования // *Поверхность.* — 2000, № 3. — С. 34—41.
15. Маршалек М., Приходько І., Проценко С. Особливості фазового складу двошарових плівок Co/Cu // *Фізика і технологія тонких плівок.* — Івано-Франківськ: ПРНУ ім. В. Стефаніка, 2003. — Т. 1. — С. 94 — 96.
16. Вдовичев С. Н., Грибков Б. А., Климов А. Ю., Рогов В. В. Коэрцитивность гранулированных ферромагнитных пленок и многослойных структур на их основе // *Письма в ЖТФ.* — 2008. — Т. 34, вып. 15. — С. 81—88.
17. Kondrakhova D. M., Pazukha I. M., Protsenko I. Yu. Thin film system based on Co and Cr or Cu: magnetoresistive properties and application // *Universal J. Phys. Appl.* — 2014. — Vol. 2, No. 2. — P. 85—89.
18. Чешко І. В., Проценко С. І., Шифалович П. Магнітооптичні та магніторезистивні властивості плівкових функціональних елементів на основі Co і Cu та Au // *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка.* — 2008. — № 2 — С. 3—7.
19. Cheshko I. V., Makukha Z. M., Odnodvoretz L. V., Shumakova M. O., Velykodnyi D. V., Protsenko I. Yu. Strain effect on magneto-optical and magnetic properties of film system based on Fe and Pt // *Universal J. Mater. Sci.* — 2013. — № 1(2). — P. 13—17.
20. Макуха З. М., Проценко І. Ю. Магнітодеформаційний ефект у двошарових плівках Co/Cu // *ФІП.* — 2014. — Т. 12, № 2. — С. 279—284.

## LITERATURA

1. Kunickij Yu. A., Kurilyuk V. V., Odnodvoretz L. V., Protsenko I. Yu. Osnovi spintroniki: materiali, priladi ta pristroi : navch. posib. / — Sumi : SumDU, 2013. — 127 p.
2. Barheleny A., Gros V., Duvail J. L., Fert A., Morel R., Parent F., Petroff F., Steren L. B. Giant magnetoresistance in magnetic nanostructures // *Nanostruct. Mat.* — 1995. — Vol. 6. — P. 217—226.
3. Alphen A. M., Heijden P. A. A., Jonge W. J. M. Influence of annealing on structural and magnetic properties of Co/Ag multilayers with thin Co layers // *J. Magn. Mater.* — 1995. — Vol. 140—144. — P. 609—610.
4. Vavra W., Lee C. H., Lamelas F. J., He Hui, Clarke Roy, Uher C. Magnetoresistance and Hall effect in epitaxial Co/Au superlattices // *Phys. Rev. B.* — 1990. — Vol. 42, No. 7. — P. 4889—4892.
5. Djamal M., Ramli. Development of sensors based on giant magnetoresistance material // *Proc. Eng.* — 2012. — Vol. 32. — P. 60—68.
6. Freitas P. P., Silva F., Oliveira N. J., Melo L. V., Costa L., Almeida N. Spin valve sensors // *Sens. Actuat.* — 2000. — Vol. 81. — P. 2—8.
7. Vorobiov S. I., Shutylieva O. V., Pazukha I. M., Chornous A. M. Sensitive element of the magnetic field sensor based on three-layer film

- system Co/X/Co ( $X = Dy, Gd$ ) // Technical Physics. — 2014. — Vol. 59, No. 11, P. 1644—1649.
8. Ishakov R. S., Frolov G. I., Zhigalov V. S. i dr. Effekty magnitnogo vzaimodejstviya mezhdu superparamagnitnymi chasticami v nanogranulirovannyh plenkah So // Pisma v ZhTF. — 2004. — Vol. 30, No. 16. — P. 51—57.
  9. Frolov G. I., Zhigalov V. S., Malcev V. K. Vliyanie temperatury na strukturnye prevrascheniya v nanokristallicheskih plenkah kobalta // FTT. — 2000. — Vol. 42, No. 2. — P. 326—328.
  10. Mirzaev D. A., Schaslivcev V. M., Ulyanov V. G. i dr. Zakonomernosti  $\beta \rightarrow \alpha$ -polimorfno prevrascheniya v kobalte pri vozrostanii skorosti ohlazhdeniya // FMM. — 2002. — Vol. 93, No. 6. — P. 58—64.
  11. Cheshko I. V., Procenko S. I., Odnodvorec L. V. i dr. Magnitoopticheskie i magnitorezistivnye svojstva spin-klapannyh struktur na osnove Co, Cu i Au // Pisma v ZhTF. — 2009. — Vol. 35, No. 19. — P. 53—60.
  12. Chebotkevich L. A., Ognev A. V., Grudin B. N. Struktura i magnitnaya anizotropiya plenok Co/Cu/Co // FTT. — 2004. — Vol. 46, vyp. 8. — P. 1449—1554.
  13. Yang G. H., Geng K. W., Zeng F. et al. Formation of metastable phases and their effect on the magnetic properties of Co-Cu multilayers // Thin Solid Films. — 2005. — Vol. 484. — P. 283—288.
  14. Kasyutich O. I., Fedosyuk V. M., Tochickij T. A. Struktura nanorazmernih sistem Co/Cu i mehanizm ego formirovaniya // Poverhnost. — 2000, No. 3. — P. 34—41.
  15. Marshalek M., Prihodko I., Procenko S. Osoblivosti fazovogo skladu dvosharovich plivok Co/Cu // Fizika i tehnologiya tonkih plivok. — Ivano-Frankivsk: PrNU im. V. Stefanika, 2003. — Vol. 1. — P. 94—96.
  16. Vdovichev S. N., Gribkov B. A., Klimov A. Yu., Rogov V. V. Koercitivnost granulirovannyh ferromagnitnyh plenok i mnogoslojnyh struktur na ih osnove // Pisma v ZhTF. — 2008. — Vol. 34, vyp. 15. — P. 81—88.
  17. Kondrakhova D. M., Pazukha I. M., Protsenko I. Yu. Thin film system based on Co and Cr or Cu: magnetoresistive properties and application // Universal J. Phys. Appl. — 2014. — Vol. 2, No. 2. — P. 85—89.
  18. Cheshko I. V., Procenko S. I., Shifalovich P. Magnitooptichni ta magnitorezistivni vlastivosti plivkovih funkcionalnih elementiv na osnovi So i Cu ta Au // Visnik SumDU. Seriya: Fizika, matematika, mehanika. — 2008. — No. 2 — P. 3—7.
  19. Cheshko I. V., Makukha Z. M., Odnodvoret L. V., Shumakova M. O., Velykodnyi D. V., Protsenko I. Yu. Strain effect on magneto-optical and magnetic properties of film system based on Fe and Pt // Universal J. Mater. Sci. — 2013. — No. 1(2). — P. 13—17.
  20. Makuha Z. M., Procenko I. Yu. Magnitodeformacijnij efekt u dvosharovich plivkah Co/Cu // FIP. — 2014. — Vol. 12, No. 2. — P. 279—284.