

## Магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Fe і Gd та Co і Gd

С.І. Воробйов, О.В. Шутилева, І.О. Шпетний, А.М. Чорноус

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

(Одержано 01.12.2012, у відредагованій формі – 21.12.12, опубліковано online 29.12.2012)

Робота присвячена встановленню загальних закономірностей впливу товщини прошарку на основі Gd та товщини шару феромагнетика на величину магнітоопору і коерцитивної сили в тришарових плівках Fe / a-Gd / Fe і Co / a-Gd / Co при різних геометріях вимірювання та кутах орієнтації зразків у зовнішньому магнітному полі. Встановлено, що найбільше значення величини магнітоопору спостерігається у перпендикулярній геометрії вимірювання. Показано, що при зміні товщини прошарку a-Gd та верхніх шарів феромагнетиків величина магнітоопору і коерцитивної сили має осцилюючий характер.

**Ключові слова:** Структурно-фазовий стан, Магнітоопір, Коерцитивна сила, Багатошарові плівкові системи.

PACS numbers: 68.55.Nq, 73.50.Jt, 75.30.Gw

### 1. ВСТУП

У останні роки велика увага дослідників приділяється вивченню властивостей композиційно-неоднорідних плівок на основі рідкоземельних (R) і 3-d перехідних (T) металів (див., наприклад, [1-2]). Це пов'язано з двома обставинами. По-перше, прогрес у технології вакуумного нанесення дозволяє формувати структури із заданими характеристиками [3-5]. По-друге, удосконалилась техніка дослідження структурно-фазового складу, магнітних, магніторезистивних, оптичних та інших властивостей.

Ці обставини є дуже важливими з точки зору подальшого використання таких систем, як конструктивних елементів для сучасних мікроелектронних приладів і сенсорів. Оскільки з точки зору практичного використання, наприклад, датчика магнітних полів на основі R і T металів, необхідно знати, як на величину магніторезистивних і електрофізичних властивостей впливають розмірні ефекти (залежність властивостей від товщини окремих шарів), орієнтація зразків у зовнішньому магнітному полі. Також стабільність властивостей багатокомпонентних систем істотним чином залежить від дифузійних процесів, які в них протікають, та їх структурно-фазового стану [6].

У зв'язку з цим метою нашої роботи стало та комплексне дослідження структурно-фазового стану тришарових плівок на основі Fe і Gd та Co і Gd та розмірних ефектів в магніторезистивних властивостях у різних геометріях вимірювання.

### 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Тришарові плівки Fe / a-Gd / Fe / П, та Co / a-Gd / Co / П (П – підкладка) були отримані у вакуумі  $P \sim 10^{-4}$  Па шляхом пошарової конденсації шарів металів електронно-променевим методом на підкладках із ситалу (для вивчення магніторезистивних властивостей) та плівках-підкладках із аморфного вуглецю (структурні дослідження). Температура підкладки складала  $T_h \cong 460$  К, середня швидкість конденсації Gd становила 0,05-0,15 нм/с, а Fe і Co – 0,1-0,3 нм/с. Товщина плівкових зразків конт-

ролювалась за допомогою методу кварцового резонатора. Кварцова пластина і підкладки розміщувались на різних тримачах, але на однаковій відстані від випарника. Таке розміщення дозволяло реалізувати локальний підігрів підкладки, а температура кварцової пластини залишалася незмінною ( $T = 320$  К).

Дослідження кристалічної структури і фазового складу плівкових зразків проводилось з використанням просвічуючого електронного мікроскопу ПЕМ-125 К при його роботі у світлопольному та мікродифракційному режимі (без введеної селекторної діафрагми).

Магніторезистивні властивості тришарових плівкових зразків на основі Fe та Co і Gd були досліджені з використанням програмно-апаратного комплексу за цюгириточковою схемою в трьох геометріях вимірювання (поперечна, перпендикулярна, поздовжня) при кімнатних температурах за методикою описаною в роботі [7].

### 3. СТРУКТУРНО-ФАЗОВИЙ СКЛАД

Важливим з точки зору формування багатьох фізичних властивостей плівок, у тому числі і магніторезистивних, є їх структурно-фазовий стан [6, 8-10]. Тому для тришарових плівкових систем потрібно знати не тільки фазовий склад окремих шарів, а й системи в цілому [8, 11], оскільки фазоутворення у дифузійній зоні на межі поділу шарів впливає на якість інтерфейсів, умови розсіювання на них носіїв заряду та як наслідок на електрофізичні і магніторезистивні властивості.

Результати дослідження фазового складу одношарових плівок на основі Fe при ефективних товщинах 1-1,5 нм, показали, що вони знаходяться в квазі-аморфному стані у той час, як плівки Co є нанокристалічними. При збільшенні ефективної товщини плівок Fe і Co від 2 до 10 нм лінії на електроннограмах стають більш чіткими, що свідчить про укрупнення кристалів і перехід від квазіаморфної фази (плівки Fe) до кристалічної. Плівки Fe є однофазними та мають ОЦК решітку. На відміну від них, плівки Co мають двофазний стан. На електроннограмах поряд з лініями, які відповідають ГЦП-Co, фіксу-

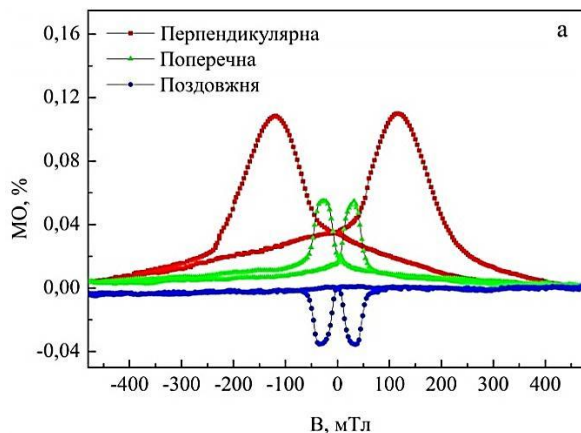
ються дві лінії (111) та (200) для фази ГЦК-Со. Відбиття, які відповідають ГЦК-Со, належать дефектам пакування ГЦП-Со, оскільки, згідно [12] між двома фазами кобальту існує кристалографічна відповідність (111) ГЦК || (100) ГЦП. Одношарові плівки Gd ефективною товщиною від 1 до 10 нм перебувають в аморфному стані, що узгоджується з даними більшості авторів (див., наприклад, [8, 9, 13]).

Дифракційні дослідження тришарових плівкових систем на основі Fe (x) / a-Gd (y) / Fe (x) / П та Co (z) / a-Gd (y) / Co (z) / П, де x, y, z – ефективні товщини окремих шарів, які не перевищують 10 нм, показали, що вони мають фазовий склад ОЦК-Fe + a-Gd, та ГЦП-Со + ГЦК-Со + a-Gd відповідно (a – аморфний).

#### 4. МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ

Магніторезистивні властивості плівкових систем залежать не тільки від структурно-фазового складу, а і від товщин магнітних шарів і прошарків з рідкоземельного металу та геометрії вимірювання.

На рис. 1 проілюстровано типове сімейство польових залежностей магнітоопору (МО) на прикладі тришарових плівок Fe (2) / a-Gd (2) / Fe (6) / П, та Co (10) / a-Gd (1) / Co (10) / П. Проаналізувавши ці результати відмітимо наступне. По-перше, незалежно від товщин кожного з шарів у системах проявляється анізотропний магнітоопір. По-друге, для всіх зразків в поперечній та перпендикулярній геометрії вимірювання величина магнітоопору спочатку зростає зі збільшенням величини індукції (B) зовнішнього магнітного поля, досягає максимуму при  $B_c$  (коерцитивна сила), а потім різко зменшується та виходить на насичення (слід відмітити, що величина  $B_c$  визначалась за положенням максимуму на польових залежностях). При поздовжній геометрії вимірювання спостерігається зворотна тенденція. По-третє, максимальна величина МО 0,1 % та 0,45 % відповідно для систем Fe / a-Gd / Fe та Co / a-Gd / Co спостерігається у перпендикулярній геометрії вимірювання. При переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання величина МО зменшується в обох випадках рис. 1, та становить 0,045 % для системи на основі Fe і Gd рис. 1 а, та 0,25 % для системи на основі Co і Gd рис. 1 б.



Таку різку зміну величини магнітоопору до 2-х разів у перпендикулярній геометрії відносно до поперечної, можна пояснити «витісненням» електричного струму у шари феромагнетика із-за високого питомого опору прошарку a-Gd. Тому магнітоопір R/T плівок в основному відображає магнітоопір шарів феромагнетика. Враховуючи цю особливість, необхідно обирати для подальших досліджень і практичного використання ту геометрію вимірювання, у якій електричний струм по зразку пропускається перпендикулярно поверхні плівки, а намагнічування здійснюється в площині плівок (перпендикулярна геометрія). Оскільки у випадку поперечної і поздовжньої геометрії вимірювання є можливість отримати значення величини магнітоопору не всієї системи в цілому, а лише шарів феромагнетика.

Зважаючи на ці обставини нами було проведено дослідження впливу зміни орієнтації зразка відносно зовнішнього магнітного поля на величину магнітоопору та коерцитивної сили. Це є важливим з точки зору використання даних систем як одного з конструктивних елементів мікроелектронних сенсорів.

На рис. 2 приведено залежність величини магнітоопору від прикладеного зовнішнього магнітного поля при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання з кроком  $10^\circ$  та при поздовжній геометрії на прикладі плівки Co (10) / a-Gd (1) / Co (10) / П. На основі отриманих результатів можна відмітити, що при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання відбувається зміна значень магнітоопору та коерцитивної сили. Про типовий характер залежностей магнітоопору та коерцитивної сили від кута орієнтації зразка в зовнішньому магнітному полі можна судити з даних, які представлені на рис. 3.

Як видно із цих даних залежність магнітоопору від кута має дві характерних ділянки. Для плівки Co (10) / a-Gd (1) / Co (10) / П величина МО зменшується від  $0^\circ$  до  $70^\circ$ , а від  $70^\circ$  до  $90^\circ$  – спостерігається незначне її збільшення. Така тенденція залежності МО від  $d$  є характерною також і для плівки Fe(2) / a-Gd(2) / Fe(6) / П, але мінімум більш виражений. У інтервалі кутів від  $0^\circ$  до  $50^\circ$  величина МО зменшується у 1,5 рази, а потім зростає при збільшенні кута до  $90^\circ$ .

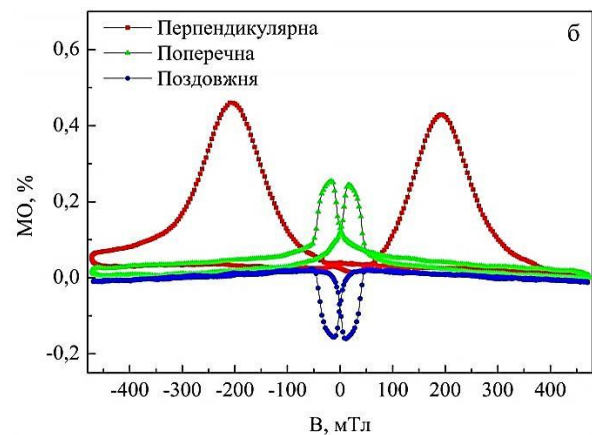
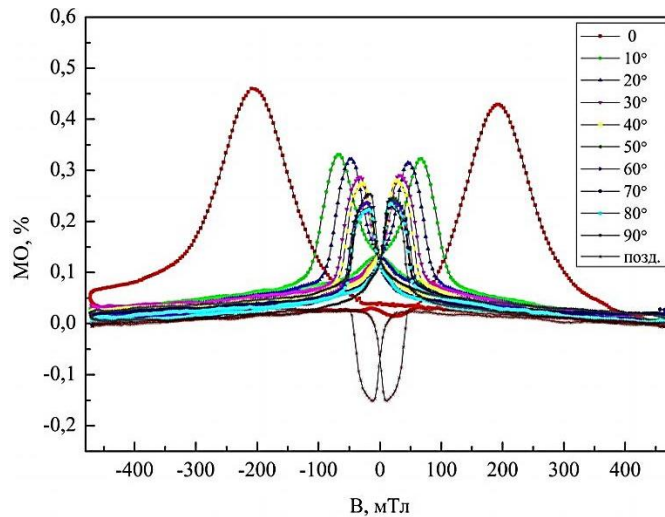
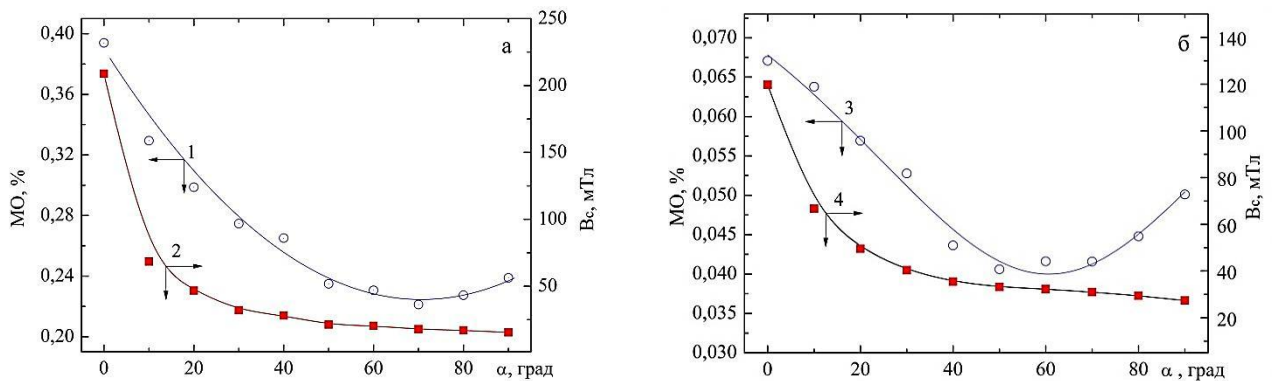


Рис. 1 – Залежність величини магнітоопору від прикладеного зовнішнього магнітного поля при трьох геометріях вимірювання для плівкових систем: а – Fe (2) / a-Gd (2) / Fe (6) / П; б – Co (10) / a-Gd (1) / Co (10) / П. У дужках вказана товщина у нм



**Рис. 2** – Залежність величини магнітоопору від прикладеного зовнішнього магнітного поля при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання з кроком 10°, та при поздовжній геометрії для плівкової системи Co (10) / a-Gd (1) / Co (10) / П



**Рис. 3** – Залежність величини магнітоопору криві (1, 3) та коерцитивної сили криві (2, 4) від кута орієнтації зразка відносно прикладеного зовнішнього магнітного поля для плівкових систем: а – Co (10) / a-Gd (1) / Co (10) / П; б – Fe(2) / a-Gd(2) / Fe(6) / П

Що стосується коерцитивної сили, то при переході від перпендикулярної до поперечної орієнтації її величина зменшується на всьому інтервалі значень кутів у випадку обох систем. Такий характер залежностей пов'язаний з переходом від важкої до легкої осі намагнічування [14, 15]. Таким чином найбільше значення, як величини магнітоопору так і коерцитивної сили спостерігається при перпендикулярній геометрії вимірювання.

Оскільки на величини магнітоопору та коерцитивної сили плівкових систем впливає товщина немагнітних прошарків [16], то нами було досліджено польові залежності опору зі зміною товщини прошарку з рідкоземельного металу від 1 до 10 нм при фіксованих значеннях товщин феромагнітних шарів (10 нм). Вказані залежності проілюстровано на рис. 4. У таблиці приведено числові значення магнітоопору і коерцитивної сили на прикладі системи Fe / a-Gd / Fe. З цих даних витікає, що величини MO і  $B_c$  у залежності від товщини шару a - Gd мають корелюючий між собою осцилюючий характер. Така залежність має місце для всіх геометрій вимірювання. Подібний до приведеної в таблиці осцилюючий тип залежності від товщини немагнітного прошарку вперше спостерігався при дослідженні гігантського

магнітоопору у роботі [17]. Автори [17] пояснюють такий характер залежності магнітоопору осцилюючою залежністю обмінної взаємодії між магнітними шарами через електрони провідності.

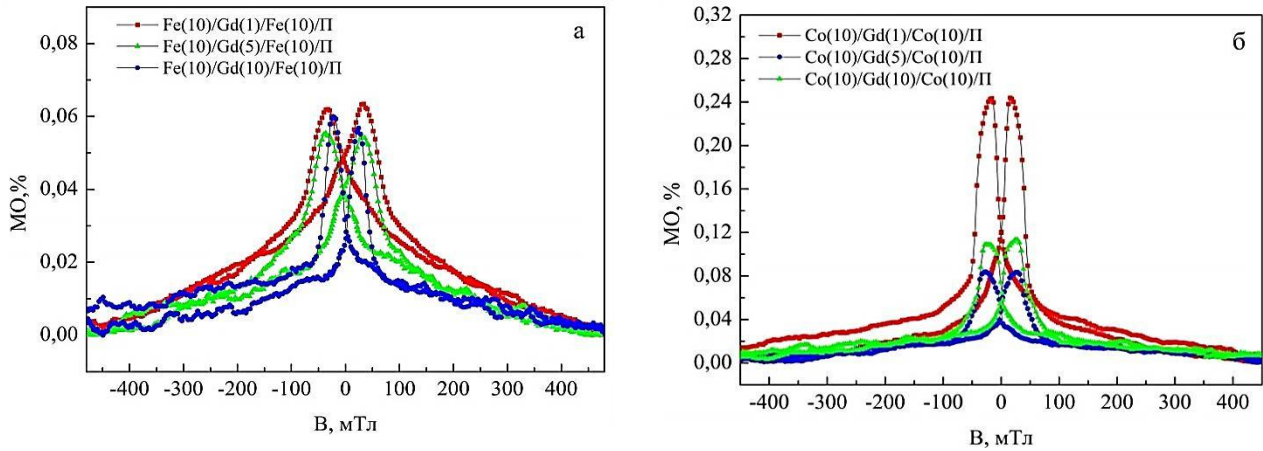
Не менш важливий вплив на величини MO і  $B_c$  має товщина шару феромагнетика. Тому нами досліджено вплив товщини верхнього шару феромагнетика на величину MO і коерцитивної сили у системах Co(x) / a-Gd(3) / Co(5) / П та Fe(x) / a-Gd(3) / Fe(3) / П, де x – ефективна товщина, яка змінювалася від 1 до 5 нм з кроком 1 нм. Результати даних досліджень представлені на рис. 5.

Аналіз цих залежностей показує, що величина магнітоопору (рис. 5, криві 1, 3) та коерцитивної сили (рис. 5, криві 2, 4) має осцилюючий затухаючий характер при збільшенні ефективної товщини верхнього шару феромагнетика. Порівнюючи між собою дані для плівкових систем на основі Fe і Gd та Co і Gd можна вказати, що в цілому значення мінімумів і максимумів спостерігається при різних величинах товщини шарів Fe і Co. Відмітимо той факт, що у системі Fe / a-Gd / Fe в останньому випадку величина MO більша, ніж для системи Co / a-Gd / Co, хоча вище нами було показано (див. рис. 3, 4), що має місце обернена тенденція. Такий результат може бути пов'язаний, як з

окислювальними процесами переважно в верхньому шарі Fe ефективною товщиною менше 5 нм. Хоча наявність оксидної фази не завжди фіксується електронографічно, але її присутність може викликати збільшення МО. Про що зокрема свідчать, як і наші

дані так і інших авторів (див., наприклад, [18-19]).

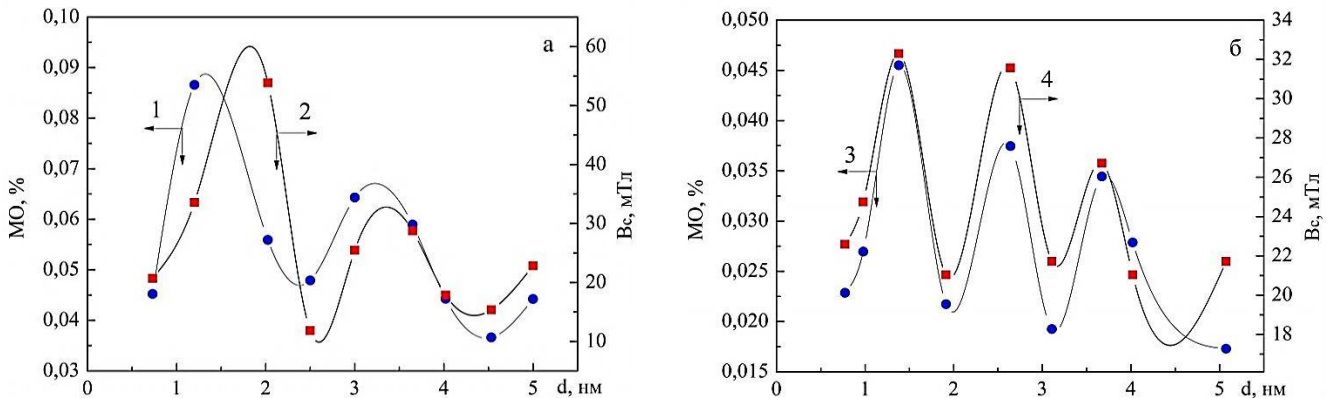
Очевидно, що концентрація оксидної фази у плівках меншої товщини вища. Не виключений той факт, що на величину магнітоопору в даному випадку



**Рис. 4** – Залежність величини магнітоопору від про шарку з a-Gd для системи: а – Fe (10) / a-Gd (n) / Fe(10) / П та б – Co (10) / a-Gd (n) / Co (10) / П

**Таблиця 1** – Залежність величини магнітоопору та коерцитивної сили від про шарку з a-Gd для системи Fe (10) / a-Gd (n) / Fe(10) / П

$d_{Gd}$ , нм	1,2	2,2	3	3,5	4	5	6	7	8,3	9	10
МО, %	0,061	0,076	0,069	0,049	0,053	0,056	0,045	0,062	0,063	0,048	0,058
$B_c$ , мТл	25,988	32,44	32,77	18,04	26,09	35,73	25,37	25,86	29,51	21,20	32,04



**Рис.5** – Залежність величини магнітоопору криві (1, 3) та коерцитивної сили криві (2, 4) від товщини верхнього шару Fe для системи Fe(n) / a-Gd(3) / Fe(5) / П та Co для системи Co (n) / a-Gd(3) / Co(5) / П, де n – ефективна товщина Fe і Co

впливає і структурний стан шарів заліза, а саме наявність аморфної фази.

Для аморфної фази характерне вище значення питомого опору ніж для кристалічної [20]. Тому питомий опір всієї системи збільшується.

У такому випадку при проходженні електричного струму через зразок не відбувається шунтування, у результаті чого спостерігається більше значення МО.

### 5. ВИСНОВКИ

Таким чином, за результатами даної роботи можна зробити наступні висновки.

1. Тришарові системи на основі Fe і Gd та Co і Gd, які отримані при  $T_h \cong 460$  К мають фазовий склад ОЦК-Fe + a-Gd та ГЦК-Co + ГЦК-Co + a-Gd.

2. Найбільше значення магнітоопору спостерігається у перпендикулярній геометрії вимірювання і становить 0,1 % для плівок Fe / a-Gd / Fe / П та 0,5 % для плівок Co / a-Gd / Co / П. При переході від перпендикулярної до поперечної орієнтації зразка у зовнішньому магнітному полі величина магнітоопору зменшується на інтервалі від  $0^\circ$  до  $50^\circ-70^\circ$  (у залежності від типу системи та ефективних товщин шарів), а потім зростає. У той час, як значення коерцитивної сили в цих системах зменшується при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання.

3. При зміні ефективної товщини про шарку з рідкоземельного металу та верхнього шару феромагнетика величина магнітоопору та коерцитивної сили мають осцилюючий характер.

Робота виконана у рамках НДР № 0112U004688.



**Магниторезистивные свойства пленочных систем на основе Fe и Gd и Co и Gd**

С.И. Воробьев, О.В. Шутылева, И.А. Шпетный, А.Н. Черноус

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

Работа посвящена установлению общих закономерностей влияния толщины слоя на основе Gd и толщины слоя ферромагнетика на величину магнитосопротивления и коэрцитивной силы в трехслойных пленках Fe / a-Gd / Fe и Co / a-Gd / Co при различных геометриях измерения и углах ориентации образцов во внешнем магнитном поле. Установлено, что наибольшее значение величины магнитосопротивления наблюдается в перпендикулярной геометрии измерения. Показано, что при изменении толщины прослойки a-Gd и верхних слоев ферромагнетиков величина магнитосопротивления и коэрцитивной силы имеет осциллирующий характер.

**Ключевые слова:** Структурно-фазовое состояние, Магнитосопротивление, Коэрцитивная сила, Многослойные пленочные системы.

**Magnetoresistive Properties of Thin Film Systems Based on Fe - Gd and Co - Gd**

S.I. Vorobiov, O.V. Shutileva, I.A. Shpetnyi, A.M. Chornous

*Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine*

The paper is devoted to general laws impact layer thickness based on Gd and thickness of the ferromagnet on the value of magnetoresistance and coercivity in layered films Fe / a-Gd / Fe and Co / a-Gd / Co at different measurement geometry and orientation angles of the samples in an external magnetic field. Found that the greatest value of magnetoresistance observed in perpendicular geometry measurement. It is shown that by changing the thickness of the a-Gd layer and the upper layers of ferromagnetic value of magnetoresistance and coercivity has oscillatory character.

**Keywords:** Structural-phase state, Magnetoresistance, Coercivity, Multilayer film systems.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. S. Mangin, L. Thomas, F. Montaigne, W. Lin, T. Hauet, Y. Henry, *Phys. Rev. B* **80**, 224424 (2009).
2. T. Hauet, F. Montaigne, M. Hehn, Y. Henry, S. Mangin, *Phys. Rev. B* **79**, 224435 (2009).
3. H. Nagura, K. Takanashi, S. Hitani, K. Saito, T. Shima, *J. Magn. Magn. Mater.* **240**, 183 (2003).
4. H. Miyagawa, K. Shiraoka, M. Tani, K. Fujii, N. Takahashi, S. Kashiba, Y. Tanaka, N. Tsurumachi, S. Nakanishi, H. Itoh, *J. Cryst. Growth.* **311**, 2143 (2009).
5. B. Altunsevahir, A.R. Koymen, *J. Magn. Magn. Mater.* **261**, 424 (2003).
6. И.Е. Проценко, А.Н. Черноус, В.А. Хворост, *Тонкие пленки в оптике и электронике*, с. 6 (Харьков: ННЦ ХФТИ: 2002).
7. М.Г. Демиденко, С.И. Проценко, Д.М. Костюк, І.В. Чешко, *Ж. Нано-Електрон. Фіз.* **3** №4, 106 (2011) (M.H. Demydenko, S.I. Protsenko, D.M. Kostyuk, I.V. Cheshko, *J. Nano-Electron. Phys.* **3** No 4, 106 (2011)).
8. В.О. Васильковский, А.В. Свалов, А.В. Горбунов, Н.Н. Щеголева, С.М. Задворкин, *ФТТ* **43**, №4 (2001).
9. *Магнетизм наносистем на основе редкоземельных и 3-d переходных металлов*, (Ред. В.О. Васильковского) (Екатеренбург: 2007).
10. М.А. Мильяев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, А.М. Бурханов, Н.С. Банникова, В.В. Устинов, *Физика металлов и металловедение* **112**, № 2 (2011) (M.A. Milyaev, L.I. Naumova, V.V. Proglyado, T.P. Krinitsina, A.M. Burkhanov, N.S. Bannikova, V.V. Ustinov, *Phys. Metal. Metallogr.* **112** No2, 138 (2011)).
11. N. Sato, K. Habu, *J. Appl. Phys.* **61**, No8 (1987).
12. Т.Б. Горбачева, *Рентгенография твердых сплавов* (Москва: Металлургия, 1985).
13. K.V. Tyschenko, L.V. Odnodvoret, I.Yu. Protsenko, *Metallofiz. Noveishie. Tekhnol.* **33** No 0, 1351 (2011).
14. L. Xi, J.H. Du, J.J. Zhou, J.H. Ma, X.Y. Li, Z. Wang, Y.L. Zuo, D.S. Xue, *Thin Solid Films* **520**, 5421 (2012).
15. M. Delalande, J. de Vries, L. Abelmann, J. C. Lodder, *J. Magn. Magn. Mater.* **324**, 1277 (2012).
16. S.S.P. Parkin, *Annu. Rev. Mater. Sci.* **25**, 357 (1995).
17. S. Parkin, R. Bhadra, K. Roche, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2152 (1991).
18. S. Bae, J.H. Judy, D.B. Fenner, J. Hautala, W.F. Egelhoff, P.J. Chen, L. Gan, *J. Magn. Magn. Mater.* **320**, 2001 (2008).
19. S.L. Ren, B. You, X.J. Bai, J. Zhang, W. Zhang, J. Du, A. Hu, X.X. Zhang, *Phys. Lett. A* **372**, 2118 (2008).
20. І.Ю. Проценко, В.А. Саенко, *Тонкі металеві плівки (технологія та властивості)* (Суми: СумДУ: 2002).