

Магніторезистивні та магнітооптичні властивості двокомпонентних плівкових сплавів на основі заліза

О.В. Власенко, О.П. Ткач, Н.І. Шумакова, Л.В. Олгодворець

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

(Одержано 25.05.2018, у відредагованій формі – 12.08.2018, опубліковано online 25.08.2018)

Представлені результати досліджень магніторезистивних і магнітооптичних властивостей двокомпонентних плівкових систем на основі Fe і Pd, Pt або Ge, сформованих з різною концентрацією пара- або діаманітної компоненти в одному технологічному циклі методом пошарової або одночасної конденсації з наступною термообробкою в інтервалі температур 300-1070 К. Дослідження магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів на основі Fe і Pd або Pt вказують на те, що при загальній концентрації атомів пара- або діаманітного матеріалів від 15 до 68 ат.% в них відбуваються процеси упорядкування з утворенням фаз ГЦТ-FePd і ГЦТ-FePt, а також залишковим ефектом фіксації магнітних інтерфейсів, що спричиняє спін-залежне розсіювання електронів та ефект гігантського магнітоопору, величина якого при $T = 300$ К має величину 0,6 %. Експериментальні дослідження магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів на основі Fe і Ge дозволили встановити, що при $c_{Ge} = 60-68$ ат.% зростання амплітуди магнітоопору від (0,02-0,04) % у невідпалених системах до (0,35-0,44) % у відпалених до 1070 К плівках відбувається за рахунок формування магнітних фаз германідів заліза по усьому об'єму зразка. У відпалених плівках на основі Fe і Pd, Pt або Ge спостерігалась залежність кута Керра від індукції магнітного поля у вигляді прямокутної петлі гістерезису, що пояснюється низькою коерцитивністю відпалених плівкових матеріалів.

Ключові слова: Двокомпонентна плівкова система, Процеси упорядкування, Германіди заліза, ГМО, Магнітооптичний ефект Керра.

DOI: [10.21272/jnep.10\(4\).04016](https://doi.org/10.21272/jnep.10(4).04016)

PACS numbers: 75.70._i, 75.47.De, 85.75.Bb

1. ВСТУП

Останніми роками спостерігається значний інтерес до багатопшарових магнітних структур, в яких виникає ефект гігантського магнітоопору (ГМО) [1, 2], з точки зору їх практичного застосування в галузях обчислювальної техніки та автоматизованих системах з використанням різного роду сенсорів [3-5]. Магніторезистивні і магнітні елементи мають велике значення при створенні приладів мікроелектроніки [6, 7] і сенсорної техніки [8-10] завдяки таким перевагам, як широкий температурний діапазон, радіаційна стійкість, перешкодозахищеність, необмежена кількість перезапису інформації, можливість використання планарної інтегральної технології та мініатюрні розміри (до 0,1 мкм).

Один з напрямів застосування нових матеріалів магнітоелектроніки – це створення високочутливих головок для зчитування інформації з магнітних носіїв (магнітна стрічка, магнітний диск тощо) за допомогою детектування крайових полів, які виникають на межах доменів із протилежною орієнтацією магнітних моментів. Крайові поля фіксуються чутливими матеріалом головки, магнітоопір якого змінюється пропорційно зміні величини індукції магнітного поля. Перемагнічування феромагнітних плівок відбувається за рахунок руху доменних стінок. Коли частота коливань поля сягає десятків мегагерц, пінігування доменних стінок на структурних дефектах починає перешкоджати процесам перемагнічування і відповідно погіршує експлуатаційні характеристики приладів на основі традиційних металевих сплавів. Гранульовані плівкові матеріали позбавлені цього недоліку, оскільки їх

розміри настільки малі, що вони не розбиваються на окремі домени і становлять єдиний монодомен. За таких умов процес перемагнічування феромагнітного сплаву не ускладнюється переміщенням доменних стінок і тому частотні межі якісної роботи гранульованих матеріалів значно вищі, ніж у гомогенних сплавах.

Сумісне використання матеріалів, у яких реалізується спін-залежне розсіювання електронів, з напівпровідниковими діодними і транзисторними структурами приводить до збільшення щільності запису інформації, підвищення чутливості датчиків і створення радіаційно-стійких логічних мікросхем. Можливість керування спінами електронів в напівпровідниках дозволяє формувати нові приладові матеріали – магнітні напівпровідники (гібридна структура на основі феромагнетика і напівпровідника) та спінові транзистори.

Розроблення методик формування плівок германідів металів та вивчення їх властивостей обумовлене можливістю їх застосування для елементів енергонезалежної пам'яті з надвисокою щільністю запису інформації та низьким енергоспоживанням. Оскільки кристалічні решітки Ge і GaAs мають кубічну гранецентровану структуру типу алмазу і близькі параметри (0,5658 і 0,5653 нм, відповідно), то це дає можливість сформувати на їх основі гетероструктури для польових транзисторів, фотодетекторів і датчиків температури [9].

Усе вищевказане обумовило актуальність даної роботи, мета якої полягала в дослідженні магніторезистивних і магнітооптичних властивостей двокомпонентних плівкових систем на основі Fe і Pd, Pt або Ge, сформованих з різною концентрацією атомів пара- або діаманітного матеріалів в одному техно-

логічному циклі методом пошарової або одночасної (плівки на основі Fe і Pd або Pt) конденсації з наступною термообробкою в інтервалі температур 300-1070 К.

2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для отримання плівкових зразків використовувалася вакуумна установка типу ВУП-5М (вакуум $\sim 10^{-3}$ - 10^{-4} Па). Пошарова конденсація проводилася терморезистивним методом зі швидкістю 1,0-1,4 нм/с при температурі підкладки $T_{\text{п}} \cong 300$ К. Осадження відбувалося на ситалову підкладку через маску з геометричними розмірами 1×10 мм. Товщина окремих шарів (d) змінювалась від 5 до 40 нм. Пристрої для отримання плівкових зразків та подальшого їх дослідження розміщувались в корпусі робочої камери. За допомогою цифрових мультиметрів типу UT70D та UT70B контролювалися відповідно електричний опір плівок та температура підкладки. Відпалювання проводилось в інтервалі температур $\Delta T \cong 300$ -850 К (для металевих плівок) та $\Delta T \cong 300$ -1070 К (для плівок на основі металу і напівпровідника) протягом трьох термостабілізаційних циклів «нагрівання \leftrightarrow охолодження».

Магніторезистивні властивості досліджувались в автоматизованому режимі при $T = 300$ К з використанням чотириточкової схеми у трьох геометріях вимірювання магнітоопору (МО): поздовжній, поперечній та перпендикулярній.

Розрахунок величини МО проводився за співвідношенням:

$$MO = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)},$$

де $R(B)$ та $R(0)$ – опір зразка у зовнішньому магнітному полі та при його відсутності.

Керування ходом експерименту здійснювалось з використанням автоматизованого комплексу із програмним забезпеченням на основі середовища LabVIEW. Вимірювання електричного опору проводилось за чотирьохточковою схемою з використанням 8 каналних 16 бітних АЦП ADAM-4018 і ADAM-4118. Товщини шарів у процесі осадження контролювалися методом кварцового резонатора.

При розрахунку концентрації i -го компонента плівкових зразків використовувалось співвідношення:

$$c_i = \frac{D_i d_i \mu_i^{-1}}{\sum_{i=1}^n D_i d_i \mu_i^{-1}},$$

де D_i – густина металів; d_i – товщина i -го шару; μ – молярна маса.

Дослідження магнітооптичних властивостей проводилось на основі вимірювання ефекту Керра (МОКЕ).

3. МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ

Упорядковані плівкові сплави на основі феро- і парамагнітних металів, такі, наприклад, як FePd і FePt, завдяки структурним і магнітним властивостям стали претендентами для створення носіїв високощільного магнітного запису. Слід відмітити, що атоми Pd, буду-

чи парамагнітними, в сполуках із Fe або Co мають магнітний момент до $10\mu_B$ [11].

Як указувалось вище, плівкові матеріали були сформовані методами пошарової або одночасної конденсації з наступною термообробкою, що дало можливість отримати системи з різними структурними особливостями і фазовим складом. Для зменшення або уникнення впливу матеріалу підкладки на структуру плівкових матеріалів як підкладки використовувалися пластини Si із природним шаром оксиду. Питомий опір зразків складав величину $(1-3) \cdot 10^{-7}$ Ом·м, що дає підстави стверджувати про достатню чистоту отриманих зразків і мінімальний вплив домішкових атомів на їх магніторезистивні властивості.

На рис. 1 наведені польові залежності МО двокомпонентних плівкових систем на основі Fe і Pd, в яких спостерігаються ознаки ГМО. У відпалених до 850 К зразках амплітуда ГМО зростає до (0,2-0,3 %) у порівнянні із невідпаленими плівками (0,13-0,18 %), що можна пояснити залишковими ефектами утворення магнітних інтерфейсів (пошарова конденсація) та формуванням, можливо, гранульованого стану (одночасна конденсація). Магніторезистивні властивості плівкових систем Pt(5-30 нм)/Fe(30нм)/П у вихідному стані аналогічні властивостям плівок на основі Fe і Pd, в тому ж діапазоні концентрацій атомів феромагнітного металу.

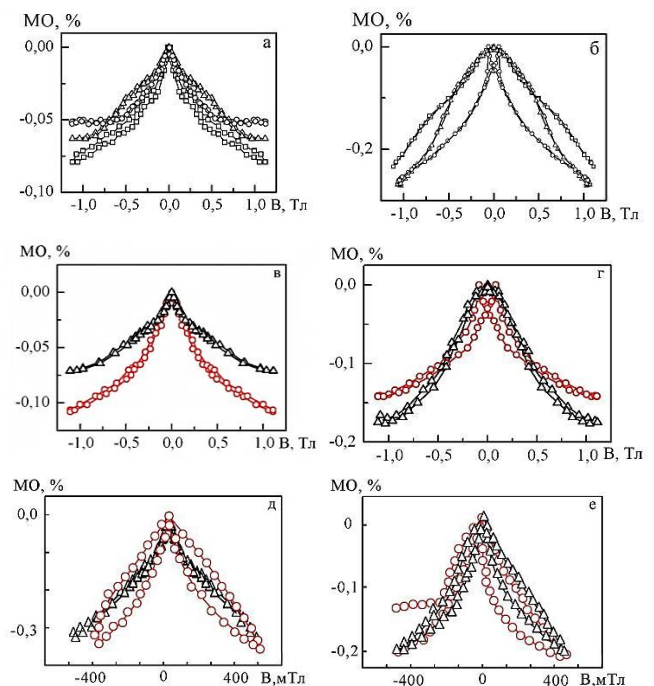


Рис. 1 – Залежність МО від індукції магнітного поля для двокомпонентних плівкових систем Pd(5)/Fe(5)/П (а, б); Pd(5)/Fe(5)/Pd(5)/Fe(20)/П (в, г) у вихідному стані та (Fe + Pd)/П загальною товщиною 40 нм при $T = 300$ К (а, в, д) і після відпалювання до 780 К (б, г, е). Загальна концентрація атомів Fe, ат. %: 50 (а-г); 20 (д) і 35 (е). Геометрії вимірювання: перпендикулярна (Δ), паралельна (\circ) і поперечна (\square)

Таким чином, плівкові матеріали на основі Fe і Pd або Pt можуть бути ефективними чутливими елементами, оскільки упорядковані фази FePd і FePt термічно стабільні до 1570 К [12] в інтервалі концент-

рацій $c_{Fe} = 30-60$ ат. % (системи на основі Fe і Pd) і $c_{Fe} = 18-70$ ат. % (системи на основі Fe і Pt), що є певною компенсацією відносно малої амплітуди магнітоопору.

У сформованих при $T = 300$ К і відпалених в інтервалі $\Delta T = 300-1070$ К плівкових системах Fe(10)/Ge(2-15)/Fe(20)/П ($c_{Fe} > c_{Ge}$), фазовий склад відповідає твердому розчину т.р. Fe(Ge) із ОЦК-решіткою і параметром $a = 0,284$ нм ($c_{Ge} = 0$) та $0,286$ нм ($c_{Ge} = 12$ ат.%). Не виключено, що поряд з т.р. атомів на основі α -Fe відбувається формування і т.р. на основі α -фази Ge, тобто мова йде про евтектичний стан плівкової системи. У плівках, отриманих на основі тришарових систем Fe(10)/Ge(2-15)/Fe(20)/П, відпалених до 1070 К, на основі т.р Ge(Fe) формуються германіди заліза FeGe_x, де $1 \leq x < 2$ (див., наприклад, [13]).

Результати досліджень магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів на основі Fe і Ge, показують, що у відпалених до 1070 К системах з товщиною діаманітного шару $d_{Ge} = 25-40$ нм ($c_{Fe} < c_{Ge}$) ГМО має амплітуду 0,28-0,40 %.

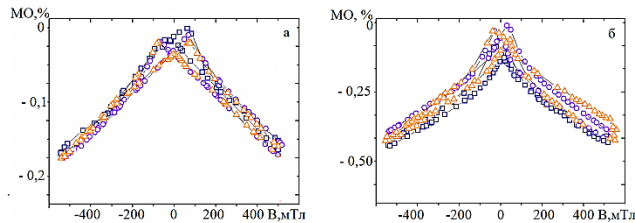


Рис. 2 – Залежність МО від індукції магнітного поля для двокомпонентних плівкових систем Fe(10)/Ge(10)/Fe(10)/П у вихідному стані при $T = 300$ К (а) і після відпалювання до 1070К (б). Загальна концентрація атомів $c_{Fe} = 80$ ат.%. Геометрії вимірювання: перпендикулярна (Δ), паралельна (\circ) і поперечна (\square)

4. МАГНІТООПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Порівняння характеру МОКЕ залежностей для невідпалених і відпалених двокомпонентних плівок на основі Fe і Pd або Pt (рис. 3) вказує на те, що у свіжосконденсованих зразках переключення (зміна напрямку магнітних моментів) відбувається в діапазоні від 8,3 до 75,8 мТл при кутах Керра від $0,90^\circ$ до $0,71^\circ$. У плівках після термообробки до 850 К переключення відбувається у вузькому діапазоні магнітних полів $\Delta B \approx 0,15$ мТл, що можна пояснити процесами упорядкування в плівках та реалізацією механізму утворення магнітних інтерфейсів. Прямокутна форма петлі МОКЕ свідчить про утворення стабільних доменів з результирующим вектором намагнічування, направленим перпендикулярно до поверхні плівок.

Результати дослідження магнітооптичних властивостей тришарових плівкових систем Fe(10)/Ge(5-20)/Fe(10)/П у вихідному стані (рис. 4) показало, що при збільшенні товщини напівпро-відникового шару від 5 до 20 нм коерцитивність плівкових систем зменшується: від 42 до 15 мТл (невідпалені зразки) та від 70 до 8 мТл (відпалені до 1070 К).

Зміна величини коерцитивної сили після термообробки, пов'язана із формуванням феромагнітних

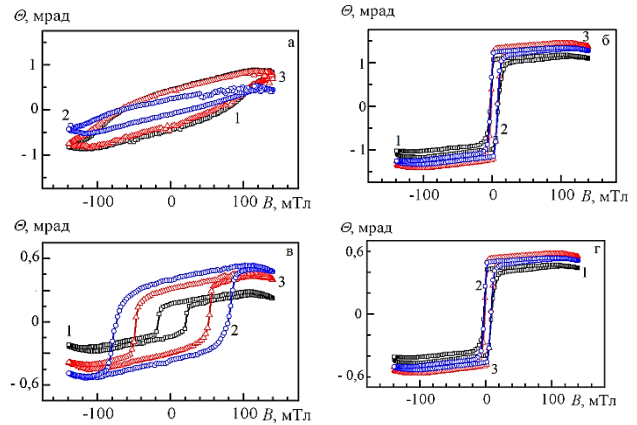


Рис. 3 – Залежності МОКЕ для двокомпонентних плівкових систем (Fe + Pd)/П (а, б); (Fe + Pt)/П (в, г) для свіжосконденсованих (а, в) і відпалених до 850 К (б, г) систем загальною товщиною 40 нм. Концентрація атомів Fe 55 ат.%. 1 – 0° ; 2 – 45° ; 3 – 90°

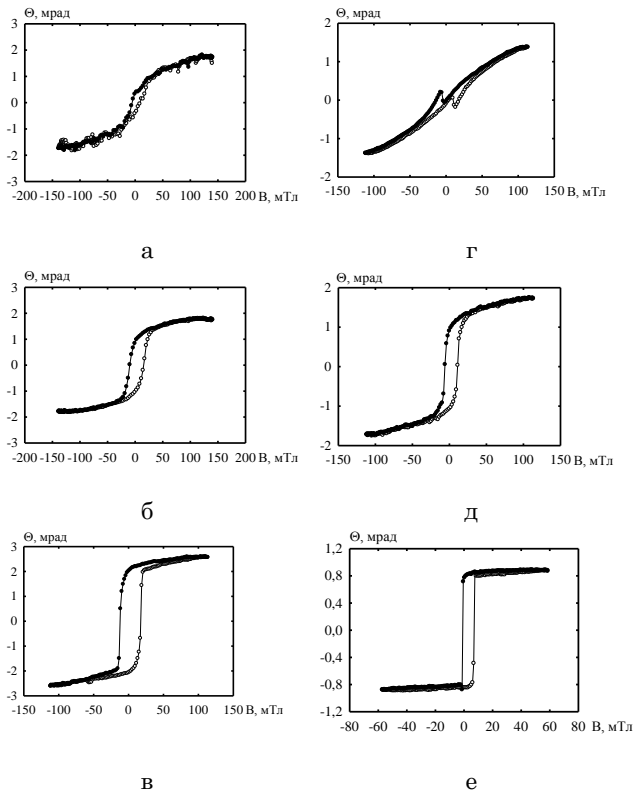


Рис. 4 – МОКЕ від величини прикладеного магнітного поля для плівок Fe(10)/Ge(7)/Fe(10)/П при $c_{Ge} = 15$ ат.%. (а-в) та Fe(10)/Ge(10)/Fe(10)/П при $c_{Fe} = 80$ ат.%. (г-е). Температура відпалювання, $T_v = 300$ К (а, г); 600 К (б, д); 1070 К (в, е)

германідів заліза по усьому об'єму зразка. Нами, як і випадку систем на основі Fe і Pd або Pt спостерігалась залежність кута Керра від індукції магнітного поля у вигляді «ступінчатої» петлі гістерезису.

Таким чином, дослідження методом МОКЕ вказують на те, що магнітооптичні властивості двокомпонентних плівкових матеріалів суттєво залежать від типів упорядкування (атомного або магнітного), що полягає, зокрема, у різних величинах коерцитивної сили і прояві ефекту ГМО при переході від невідпаленої до відпаленої системи, пов'язане із процесами фазоутво-

рення, формуванням різних фаз залежно від співвідношення концентрацій атомів окремих компонент і температури, переходом від структурно-розупорядкованої до упорядкованої фази та формування германідів.

ВИСНОВКИ

1. У плівкових матеріалах на основі Fe і Pd або Pt, сформованих пошаровою або одночасною конденсацією компонент, при загальній концентрації атомів заліза від 30 до 85 ат. % відбуваються процеси упорядкування з утворенням фаз ГЦТ-FePd і ГЦТ-FePt. Указані плівкові системи можуть бути використані як чутливі елементи сенсорів, оскільки гранульований плівковий сплав має широкі температурні і концентраційні інтервали стабільності.

2. У плівкових системах на основі Fe і Pd, Pt або Ge як до, так і після відпалювання спостерігаються ознаки ГМО, що обумовлено процесами упорядкування, рекристалізаційними процесами і утворенням феромагнітних фаз германідів металу; амплітуда МО при $T = 300$ К становить 0,2-0,4 % (невідпалені зразки) і 0,3-0,6 % (відпалені зразки).

3. У відпалених плівках на основі Fe і Pd, Pt або Ge спостерігається залежність кута Керра від індукції магнітного поля у вигляді прямокутної петлі гістерезису, що пояснюється низькою коерцитивністю відпалених плівкових матеріалів.

Робота виконана при фінансовій підтримці МОН України в рамках держбюджетної тематики кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики СумДУ (№0118U003580, 2018-2020 рр.).

Magnetoresistive and Magneto-optical Properties of Double-component Film Alloys Based on Iron

O.V. Vlasenko, O.P. Tkach, N.I. Shumakova, L.V. Odnodvoretz

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

The results of investigations of magnetoresistive and magneto-optical properties of two-component film systems based on Fe and Pd, Pt or Ge formed with different concentrations of paramagnetic or diamagnetic component in one technological cycle by the method of layer or simultaneous condensation with subsequent annealing in the temperatures interval 300-1070 K. The researches of magnetoresistive properties of film materials based on Fe and Pd or Pt indicate that at a total concentration of paramagnetic or diamagnetic metal atoms from 15 to 68 at.% the processes of ordering with the formation of the phases of hct-FePd and hct-FePt, as well as the residual effect of the magnetic interfaces fixation, which causes spin-dependent electron scattering and the giant magnetoresistance effect, whose magnitude at $T = 300$ K is 0.6 %. Experimental investigations of the magnetoresistive properties of film materials based on Fe and Ge allowed to establish that at $c_{Ge} = 60-68$ at.% increase in magnetoresistance amplitude from (0,02-0,04) % in as-deposition systems to (0,35-0,44) % in the films after annealing to 1070 K occurs due to the formation of magnetic phases of the iron germanides throughout the volume of the sample. In the annealed films based on Fe and Pd, Pt or Ge, the Kerr angle dependence of the magnetic field induction in the form of a rectangular hysteresis loop was observed, which is explained by low coercivity of annealed film materials.

Keywords: Two-component film system, Ordering processes, Iron germanides, GMR, Magneto-optical Kerr effect.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A. Fert, *Usp. Phys. Nauk* **178** No 12, 1336 (2008).
2. P. Grunberg, *Usp. Phys. Nauk* **178** No 12, 1349 (2008).
3. P. Grunberg, R. Schreiber, Y. Pang, M.B. Brodsky, H. Sowers, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2442 (1986).
4. J.E. Lenz, *Proc. IEEE* **78** No 6, 973 (1990).
5. I.Yu. Protsenko, L.V. Odnodvoretz, A.M. Chornous, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* **20** No 1, 36 (1998).
6. Ia. Lytvynenko, I.M. Pazukha, O.V. Pylypenko, V.V. Bibyk, *J. Nano-Electron. Phys.* **6** No 2, 02014 (2014).
7. V.B. Loboda, Yu.O. Shkurdoda, V.O. Kravchenko, S.M. Khursenko, V.M. Kolomiets, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* **33** No 2, 161 (2011).
8. I.P. Buryk, D.V. Velykodnyi, L.V. Odnodvoretz, I.Yu. Protsenko, E.P. Tkach, *Tech. Phys.* **56** No 2, 232 (2011).
9. E.B. Svedberg, K.J. Howard, M.C. Bonsager, *J. Appl. Phys.* **94**, 1001 (2003).
10. O.V. Synashenko, O.P. Tkach, I.P. Buryk, L.V. Odnodvoretz, S.I. Protsenko, N.I. Shumakova, *Prob. At. Sci. Technol.* **6**, 169 (2009).
11. S.C. Hong, J.I. Lee, R. Wu, *Phys. Rev. B* **75**, 172402 (2007).
12. F. Wang, S. Doi, K. Hosoiri, T. Watanabe, *Mater. Sci. Eng. A* **375-377**, 1289 (2004).
13. O.V. Vlasenko, L.V. Odnodvoretz, I.Yu. Protsenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* **35** No 12, 1637 (2013).