

ДЕФОРМАЦІЙНИЙ, МАГНІТОРЕЗИСТИВНИЙ І МАГНІТОДЕФОРМАЦІЙНИЙ ЕФЕКТИ У ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛАХ НА ОСНОВІ МАГНІТНИХ МЕТАЛІВ

З. М. Макуха, Д. В. Подуремне, К. В. Тищенко, І. Ю. Проценко

*Сумський державний університет,
Україна*

Надійшла до редакції 16.09.2015

Представлені результати досліджень тензочутливості, магнітоопору і анізотропного магнітоопору та магнітодеформаційного ефекту в плівках $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ ($x = 25, 50, 64$ і 75 ат. %), тунельній структурі CoFe/a-Ge/CoFe і одношарових плівках Co . Установлені особливості деформаційної залежності диференціального коефіцієнта тензочутливості у плівкових сплавах $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$. Проведено розрахунок величини магнітоопору (до $0,2\%$) і анізотропного магнітоопору ($3,2\text{--}6,0\%$) в плівках CoFe/a-Ge/CoFe . Особливість магнітодеформаційного ефекту в плівках Co полягає в тому, що у зовнішньому магнітному полі в області пружної деформації відбувається зменшення величини коефіцієнта тензочутливості на 22% , а в області пластичної деформації — збільшується до 25% .

Ключові слова: коефіцієнт тензочутливості, магнітоопір, анізотропний магнітоопір, магнітодеформаційний ефект.

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ, МАГНИТОРЕЗИСТИВНИЙ И МАГНИТОДЕФОРМАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТЫ В ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ

З. Н. Макуха, Д. В. Подуремне, К. В. Тищенко, И. Е. Проценко

Представлены результаты исследований тензочувствительности, магнитосопротивления, анизотропного магнитосопротивления и магнитодеформационного эффекта в пленках $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ ($x = 25, 50, 64$ и 75 ат. %), туннельной структуре CoFe/a-Ge/CoFe и однослойных пленках Co . Установлены особенности деформационной зависимости дифференциального коэффициента тензочувствительности в пленочных сплавах $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$. Проведен расчет величины магнитосопротивления (до $0,2\%$) и анизотропного магнитосопротивления ($3,2\text{--}6,0\%$) в пленках CoFe/a-Ge/CoFe . Особенность магнитодеформационного эффекта в пленках Co состоит в том, что во внешнем магнитном поле в области упругой деформации происходит уменьшение величины коэффициента тензочувствительности на 22% , а в области пластической деформации — увеличивается до 25% .

Ключевые слова: коэффициент тензочувствительности, магнитосопротивление, анизотропное магнитосопротивление, магнитодеформационный эффект.

STRAIN, MAGNETORESISTIVE AND MAGNETOSTRAIN EFFECTS IN THE FILM MATERIALS BASED ON MAGNETIC METALS

Z. M. Makukha, D. V. Poduremne, K. V. Tyshchenko, I. Yu. Protsenkoo

The results of investigations strain effect, magnetoresistance, anisotropic magnetoresistance and magnetostrain effects in films $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ ($x = 25, 50, 64$ and 75 at. %), tunnel structure CoFe/a-Ge/CoFe and Co -layer films. The features of deformation depends differential factor in film strain coefficient alloys $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$. The calculation of the value magnetoresistance (up 0.2%) and anisotropic magnetoresistance ($3,2\text{--}6,0\%$) in the films CoFe/a-Ge/CoFe . Feature films magnetostrain effect in film Co is that in the an external magnetic field in elastic strain decreases the strain coefficient on 22% in the range elastic strain, and in the field of plastic strain — increased to 25% .

Keywords: gauge factor, magnetoresistance, anisotropic magnetoresistance, magnetostrain effect.

ВСТУП

Дослідження властивостей нанорозмірних плівкових матеріалів дозволили розробити концепцію створення сенсорів деформації і магнітного поля, принцип яких заснований на ряді фізичних ефектів: деформаційному — залежності величини опору від деформації [1–4], магніторезистивному — залежності величини опору від індукції магнітного поля і магнітодеформаційному — залежності коефіцієнта тензочутливості (КТ) плівок від величини індукції магнітного поля. Необхідність розроблення багатофункціональних сенсорів для одночасного вимірювання декількох фізичних величин сприяють розвитку напрямку експериментальних досліджень, пов'язаних із вимірюванням та розрахунком величин коефіцієнта тензочутливості, магнітного коефіцієнта тензочутливості, магнітоопору (МО), анізотропного (АМО) і тунельного (ТМО) магнітоопору. Багатошарові плівкові матеріали на основі магнітних металів (Co, Fe і Ni) представляють значний інтерес з дослідницької і прикладної точки зору, оскільки у цих системах відбуваються процеси фазоутворення (утворення твердих розчинів, інтерметалідів і плівкових сплавів), які впливають на характеристики матеріалів та реалізуються ефекти спін-залежного розсіювання і тунелювання електронів.

Мета роботи полягала у дослідженні магніторезистивних, деформаційних і магнітодеформаційних властивостей плівкових матеріалів на основі магнітних металів з метою прогнозування можливості їх застосування як чутливих елементів багатофункціональних сенсорів.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Плівкові зразки у вигляді одно- і багатошарових плівок формувались методом термічного випаровування у вакуумній установці ВУП-5М (10^{-3} – 10^{-4} Па). Товщина контролювалась методом кварцового резонатора (в процесі конденсації) і методом оптичної інтерферометрії (після конденсації). Для дослідження тензорезистивних властивостей та магнітодеформаційного ефекту зразки деформувались методом *in situ* в інтервалі пружної або пластичної деформації з використанням

автоматизованої системи (див., наприклад, [1]), що підвищило точність вимірювання деформації та опору, а також дозволило проводити довільну кількість циклів деформації у статичному та динамічному режимах. Цикл «навантаження-зняття навантаження» проводився без, а потім при дії зовнішнього магнітного поля, орієнтованого перпендикулярно до напрямку розтягу плівки у вигляді полістиролової смужки як підкладки (П).

Середнє інтегральне значення коефіцієнту повздовжньої тензочутливості розраховувалось на основі співвідношення:

$$\gamma_l = \frac{1}{R(0)} \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon_l}, \quad (1)$$

де R_0 — значення електричного опору при нульовій деформації; $\Delta R = R(\varepsilon_{lmax}) - R(0)$ — зміна опору у всьому в інтервалі деформації $\Delta \varepsilon_l$; ε_l — величина поздовжньої деформації).

Диференціальне значення КТ (яке умовно можна назвати «миттєвим») розраховувалося за аналогічним співвідношенням:

$$\gamma_{lm} = \frac{1}{R_i} \frac{\partial R_i}{\partial \varepsilon_{li}}, \quad (2)$$

де індекс «*i*» позначає номер деформаційного інтервалу.

Методика визначення КТ більш детально описана у наших попередніх роботах [1, 3, 6].

Польові залежності опору були побудовані в автоматизованому режимі за чотириточковою схемою в магнітному полі до 500 мТл. Результати вимірювання досліджуваних величин передавалися через інтерфейс GPIB-RS-232 на комп'ютер і оброблялися з використанням програмного забезпечення, що було створене в середовищі LabView. Розрахунок МО і максимальної величини АМО проводився за відомими формулами (див., наприклад, [2]):

$$MO = \Delta R / R(B_{max}), \quad (3)$$

де $\Delta R = R(B) - R(B_{max})$;

$$AMO = \frac{3 \left(R(B)_{||} - R(B)_{+} \right)}{R(B)_{||} + 2R(B)_{+}} \quad (3')$$

або

$$AMO = \frac{3(R(B_{\parallel}) - R(B_{\perp}))}{R(B_{\parallel}) + 2R(B_{\perp})}, \quad (3'')$$

$R(B_{\parallel})$, $R(B_{\perp})$ і $R(B_{+})$ — опір зразка при паралельній, перпендикулярній і поперечній орієнтації вектора індукції зовнішнього магнітного поля відносно напрямку протікання електричного струму у площині плівки, відповідно.

Для кількісної оцінки магнітодеформаційного ефекту (МДЕ) при повздовжній деформації зразка було розраховано магнітний коефіцієнт коефіцієнту тензочутливості [4, 5]:

$$\beta_{\gamma_{lB}} = \frac{1}{\gamma_l(0)} \left(\frac{\Delta\gamma_l}{\Delta B} \right)_{\epsilon_l}, \quad (4)$$

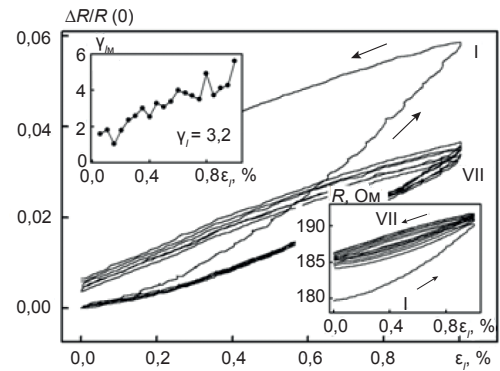
де $\Delta\gamma_l = \gamma_l(B) - \gamma(0)$; ΔB — зміна індукції прикладеного магнітного поля.

Дослідження кристалічної структури і фазового складу зразків проводилося з використанням просвічуючого електронного мікроскопу ПЕМ-125К.

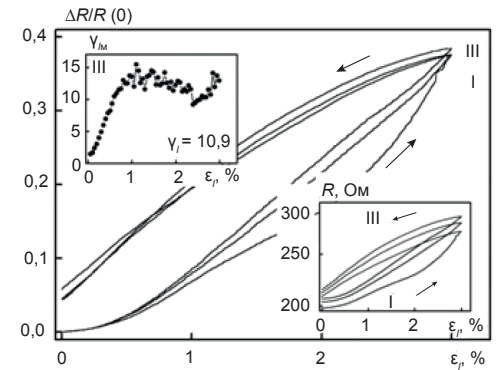
РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Деформаційний ефект. Для дослідження деформаційних властивостей двокомпонентних плівок на основі Ni і Fe було за методикою, описаною в роботах [1, 6], отримано серії деформаційних залежностей для зразків з різною концентрацією компонент ($c_{Fe} = 25, 50, 64$ і 75 ат. %) у трьох деформаційних інтервалах — $\Delta\epsilon_{l1} = 0-1$ %, $\Delta\epsilon_{l2} = 0-2$ % та $\Delta\epsilon_{l3} = 0-3$ %. Розрахунок середньої інтегральної величини КТ здійснювався за формулою (1), а диференціальної — за формулою (2). На рис. 1 наведені типові деформаційні залежності для плівок з різною концентрацією компонент в двох інтервалах деформації.

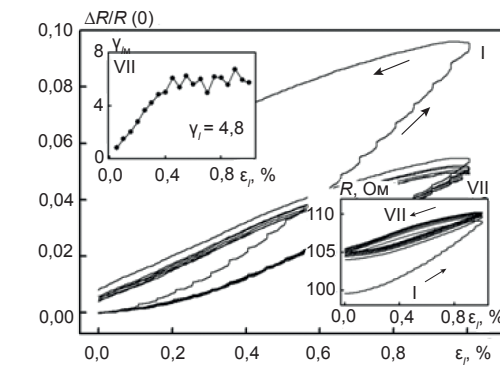
Результати експериментальних досліджень деформаційних властивостей плівкових сплавів на основі Ni і Fe показують, що при концентрації $c_{Fe} = 25$ ат. % у плівках при відносно малих деформаціях ($\Delta\epsilon_{l1} = 0-1$ %) у діапазоні товщин від 15 до 60 нм спостерігається близька до лінійної розмірна залежність γ_l від d . При більших деформаціях (інтервали $\Delta\epsilon_{l2}$ та $\Delta\epsilon_{l3}$) спостерігається зміна кута нахилу залежності, починаючи з товщини 55 нм, що свідчить про



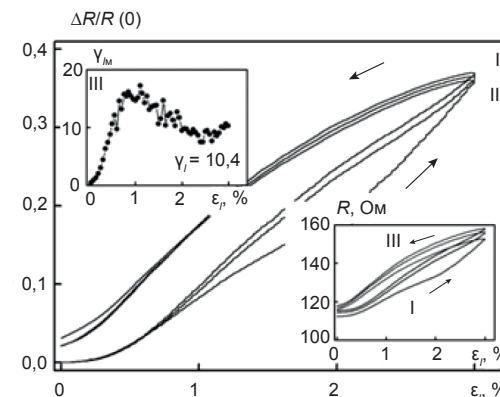
а



б



в



г

Рис. 1. Деформаційні залежності $\Delta R/R(0)$, γ_{lm} і R для плівок $Ni_{0.75}Fe_{0.25}$ (62 нм)/П (а, б) та $Ni_{0.5}Fe_{0.5}$ (61 нм)/П (в, г). На вставках залежностей γ_{lm} від ϵ_l вказане середнє значення диференціального КТ. Римськими цифрами позначені номери деформаційних циклів

їх пластичну деформацію і, як наслідок цього, зміну умов розсіювання електронів.

Для плівок з концентрацією $c_{\text{Fe}} = 75$ ат. % у діапазоні товщин 4–80 нм характерна лінійна розмірна залежність γ_l від d у всьому інтервалі деформацій. Значне відхилення від умов лінійності спостерігається на графіках залежності γ_l від d для плівок із $c_{\text{Fe}} = 50$ та 64 ат. % при деформаціях зразків більше 1 %. Починаючи з товщин $d \approx 30$ нм γ_l різко зростає з виходом на насичення, чого не спостерігалось у зразках з іншими концентраціями компонент. Для даних плівок також характерне зменшення питомого опору у порівнянні зі зразками із $c_{\text{Fe}} \approx 25$ і 75 ат. %.

Аналіз отриманих результатів, а також результати робіт [2, 5], вказують на те, що в деформаційних властивостях плівкових сплавів на основі магнітних металів велику роль відіграють концентраційні та розмірні ефекти, а також ті структурні зміни, які відбуваються у плівці при деформації.

Моделювання розмірно-концентраційних залежностей КТ (рис. 2) проводилося

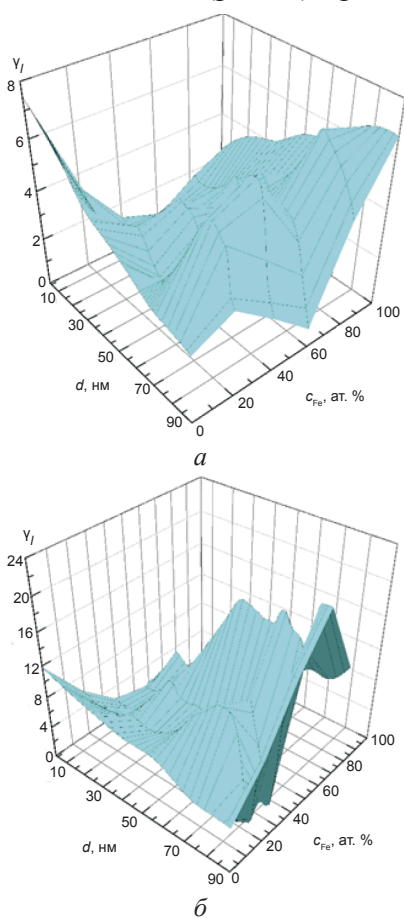


Рис. 2. Залежність γ_l від d та c_{Fe} для плівкових сплавів $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}/\text{П}$. Інтервал деформацій: $\Delta\epsilon_{11} = 0\text{--}1$ % (а) і $\Delta\epsilon_{33} = 0\text{--}3$ % (б)

на основі експериментальних розмірних залежностей КТ для плівкових сплавів з $c_{\text{Fe}} = 25, 50, 64$ і 75 ат. %, які доповнені даними для одношарових плівок Fe і Ni. Установлено, що величина межі переходу між типами деформації ϵ_{11} поступово зменшується із ростом товщини плівки у всьому концентраційному інтервалі. Разом із цим, на залежностях, поблизу інварної області сплаву ($c_{\text{Fe}} \approx 64$ ат. %), спостерігається зменшення величини ϵ_{11} , у порівнянні із зразками з іншими концентраціями компонент у сплаві.

Магніторезистивний ефект. Завдяки унікальним властивостям, плівкові матеріали на основі феромагнітних металів застосовуються в інформаційних і сенсорних системах як чутливі елементи магнітних запам'ятовуючих пристроїв з довільною вибіркою та сенсорах, принцип функціонування яких заснований на явищах ГМО і ТМО.

Для плівок Fe/a-Ge/Co(a-Ge — аморфний Ge) [7], CoFe/Al₂O₃/Co [8] і Fe/Al₂O₃/Fe [9] величина ТМО при кімнатній температурі складає 14; 12 і 18 % відповідно. У зв'язку з розвитком напівпровідникової спінтроніки ведуться пошуки нових функціональних матеріалів. На відміну від магнітних напівпровідників, які формуються методом введення магнітних домішок у напівпровідник, можлива реалізація систем з можливим спін-залежним розсіюванням електронів і тунельних структур при чергуванні магнітних і напівпровідникових шарів.

Нами досліджені магніторезистивні властивості тунельних структур CoFe(15–30 нм)/a-Ge(3–6 нм)/CoFe(15–30 нм)/П, отриманих пошаровою конденсацією при $T \approx 300$ К. Фазовий склад плівок відповідає ОЦК-CoFe (параметр решітки $a_{\text{CoFe}} = 0,2859$ нм) + a-Ge + сліди оксиду GeO₂.

Експериментальні польові залежності МО (рис. 3) вказують на анізотропний характер їх властивостей. Величини МО, які розраховані за формулою (3), при кімнатній температурі для тунельних структур на основі сплаву CoFe і a-Ge приймають значення від 0,1 до 0,2 % при зміні товщини ФМ шару в інтервалі 15–30 нм.

Розрахунок максимального значення АМО (при $B = 450$ мТл) за співвідношенням (3') дає

величину від 3,2 до 3,5 %. Якщо розрахунок здійснити за співвідношенням (3''), то величина АМО зменшується до 6,0 %.

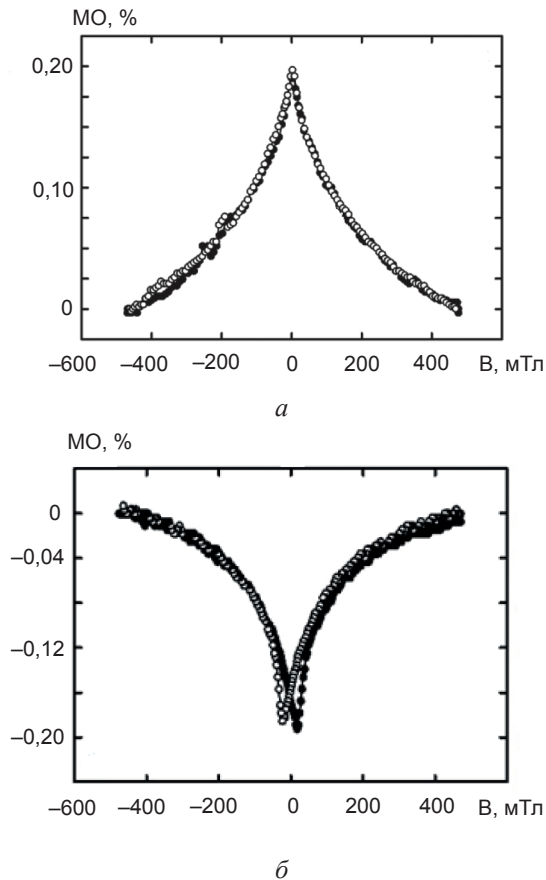


Рис. 3. Залежність МО від індукції магнітного поля в свіжосконденсованих плівках CoFe(10)/a-Ge(6)/CoFe(10)/П при поперечній (а) і перпендикулярній (б) орієнтації магнітного поля відносно напрямку електричного струму

Магнітодеформаційний ефект. Проведені експериментальні дослідження МДЕ на прикладі одношарових плівок Со в області пружності ($\Delta\epsilon_p = (0-0,2) \%$) або пластичності ($\Delta\epsilon_p = (0-2) \%$) при дії магнітного поля з індукцією $B = 30$ мТл.

На рис. 4 наведені типові деформаційні залежності відносної зміни опору від деформації для одношарових плівок Со в області пластичної деформації. Як видно із цих залежностей, перший цикл «навантаження-зняття навантаження» відрізняється від наступних, які, в свою чергу, практично повторюють один одного, що є типовою ситуацією для плівок Со. В області пластичної деформації залежності мають гістерезисний характер (рис. 4), в той час як в області пружної деформації (рис. 4) залежності $\Delta R/R$ і R

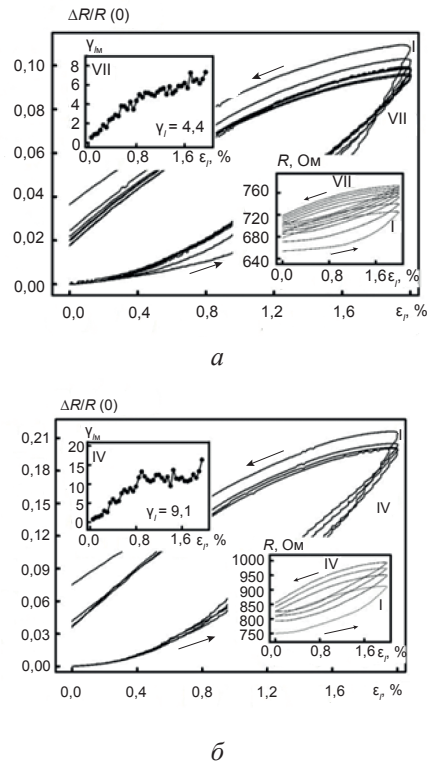


Рис. 4. Деформаційні залежності $\Delta R/R$ та R і γ_m (на вставках) при відсутності (а) та дії (б) магнітного поля для плівки Со(19)/П в області пластичної деформації

від ϵ_p практично співпадають і мають лінійний характер (рис. 5).

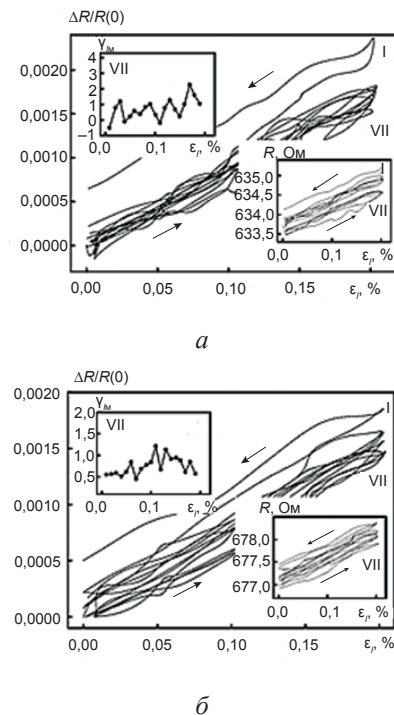


Рис. 5. Деформаційні залежності $\Delta R/R$ та R і γ_m (на вставках) при відсутності (а) та при дії (б) магнітного поля для плівки Со(19)/П в області пружної деформації

Узагальнені результати досліджень можна подати у вигляді розмірної залежності $\gamma_l(d)$ (рис. 6). Установлено, що в цілому величина КТ в області пластичності (рис. 6 а) має більше значення у порівнянні з КТ в області пружності (рис. 6 б). Цей ефект збільшення γ_l можна пояснити підсиленням ефекту зерномежового розсіювання електронів при пластичній деформації.

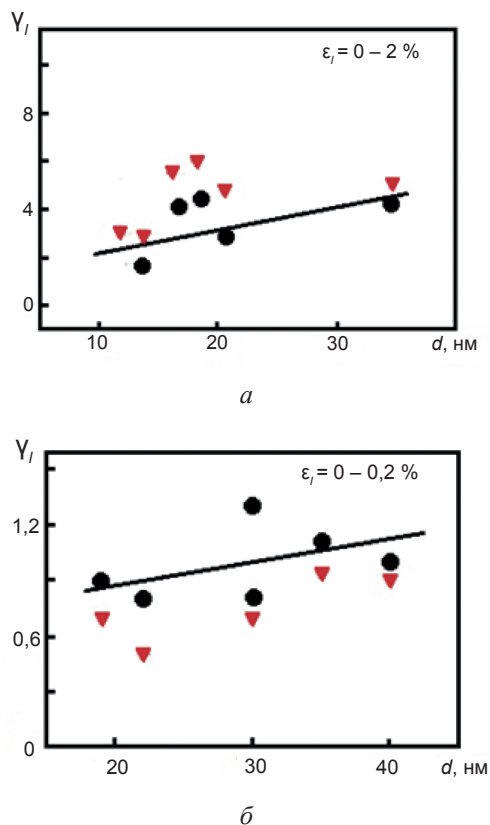


Рис. 6. Розмірна залежність γ_l від товщини d (нм) для плівок Co(d)/П при відсутності (●) та при дії (▼) магнітного поля

Питання про вплив динаміки руху електронів на їх розсіювання було розглянуто в нашій попередній роботі [10].

Виходячи із формули (4), здійснений розрахунок середнього магнітного коефіцієнта тензочутливості, величина якого дорівнює $7,4 \text{ Тл}^{-1}$ (область пружної деформації) та $8,3 \text{ Тл}^{-1}$ (область пластичної деформації).

ВИСНОВКИ

1. Проведені експериментальні дослідження деформаційного ефекту в плівкових сплавах на основі Fe і Ni дозволили встановити особливості залежності диференціального КТ від деформації; його середнє значення добре відповідає

експериментальній і прогнозованій інтегральній величині КТ.

2. Досліджені МО і АМО в тунельній плівковій структурі CoFe/a-Ge/CoFe, які мають величину до 0,2 % або від 3,2 до 6,0 %, відповідно.
3. Аналіз результатів дослідження магнітодеформаційного ефекту в одношарових плівках Co в інтервалах пружності та пластичності, показав, що величина КТ зменшується на 22 % або збільшується на 25 %, відповідно.
4. Абсолютна величина магнітного коефіцієнта тензочутливості суттєво не залежить від типу деформації, оскільки його середнє значення дорівнює $7,4 \text{ Тл}^{-1}$ (область пружної деформації) та $8,3 \text{ Тл}^{-1}$ (область пластичної деформації).

Робота виконана у рамках держбюджетної тематики № 0115U000689 Міністерства освіти і науки України (2015–2017 рр.).

ЛІТЕРАТУРА

1. Тищенко К. В., Одноворець Л. В., Проценко І. Ю. Особливості тензоефекту в плівках на основі ОЦК-Fe і a-Gd / Металофиз. новейшие технол. — 2011. — Т. 33, № 310. — С. 1351–1359.
2. Куницький Ю. А., Курилюк В. В., Одноворець Л. В., Проценко І. Ю. Основи спітроніки: матеріали, прилади та пристрої: навчальний посібник. — Суми: Сумський державний університет, 2013. — 127 с.
3. Buryk I. P., Velykodnyi D. V., Odnodvoretz L. V., Protsenko I. E., Tkach E. P. Tensorial effect in thin metal films in the range of elastic and plastic strain // Techn. Phys. — 2011. — Vol. 56, No. 2. — P. 232–237.
4. Protsenko S. I. Magnetodeformation effect in thin metal films // J. Nano- Electron. Phys. — 2009. — Vol. 1, No. 2. — P. 7–10.
5. Makukha Z. M., Protsenko S. I., Odnodvoretz L. V., Protsenko I. Yu. Magneto-strain effect in double-layer film system // J. Nano-Electron. Phys. — 2012. — Vol. 4, No. 2. — 02043 p.
6. Protsenko S. I., Velykodnyi D. V., Kheraj V. A., Desai M. S., Panchal C. J., Protsenko I. Yu. Electrophysical properties of Cu/Cr and Fe/Cr film systems within elastic and plastic

- deformation range // *J. Mater. Sci.* — 2009. — Vol. 44, No. 18. — P. 4905–4910.
7. Julliere M. Tunneling between ferromagnetic films // *Phys. Lett. A.* — 1975. — Vol. 54, No. 3. — P. 225–226.
 8. Moodera J. S., Kinder L. R., Wong T. M., Meservey R. Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions // *Phys. Rev. Lett.* — 1995. — Vol. 74. — P. 3273–3276.
 9. Miyazaki T., Tezuka N. Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction // *J. Magn. Magn. Mater.* — 1975. — Vol. 139. — P. L231–L234.
 10. Ткач О. П., Одноворець Л. В., Непійко С., Проценко С. І. Магніторезистивні властивості на-норозмірних плівкових систем на основі Fe і Pd // *ФІП.* — 2009. — Т. 7, № 3. — С. 256–261.
 4. Protsenko S. I. Magnetodeformation effect in thin metal films // *J. Nano- Electron. Phys.* — 2009. — Vol. 1, No. 2. — P. 7–10.
 5. Makukha Z. M., Protsenko S. I., Odnodvoretz L. V., Protsenko I. Yu. Magneto-strain effect in double-layer film system // *J. Nano- Electron. Phys.* — 2012. — Vol. 4, No. 2. — 02043 p.
 6. Protsenko S. I., Velykodnyi D. V., Kheraj V. A., Desai M. S., Panchal C. J., Protsenko I. Yu. Electrophysical properties of Cu/Cr and Fe/Cr film systems within elastic and plastic deformation range // *J. Mater. Sci.* — 2009. — Vol. 44, No. 18. — P. 4905–4910.
 7. Julliere M. Tunneling between ferromagnetic films // *Phys. Lett. A.* — 1975. — Vol. 54, No. 3. — P. 225–226.
 8. Moodera J. S., Kinder L. R., Wong T. M., Meservey R. Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions // *Phys. Rev. Lett.* — 1995. — Vol. 74. — P. 3273–3276.
 9. Miyazaki T., Tezuka N. Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction // *J. Magn. Magn. Mater.* — 1975. — Vol. 139. — P. L231–L234.
 10. Tkach O. P., Odnodvoretz L. V., Nepijko S., Protsenko S. I. Magniterezistivni vlastivosti na-norozmirnih plivkovih sistem na osnovi Fe i Pd // *FIP.* — 2009. — Vol. 7, No. 3. — P. 256–261.

LITERATURA

1. Tyschenko K. V., Odnodvoretz L. V., Protsenko I. Yu. Osoblivosti tenzoefektu v plivkah na osnovi OCK-Fe i a-Gd / *Metallofiz. Noveishie Teknol.* — 2011. — Vol. 33, No. 310. — P. 1351–1359.
2. Kunits'kyi Yu. A., Kurylyuk V. V., Odnodvoretz L. V., Protsenko I. Yu. Osnovi spintroniki: materiali, priladi ta pristroi: navchalnij posibnik. — Sumi: Sumskij derzhavnij universitet, 2013. — 127 p.
3. Buryk I. P., Velykodnyi D. V., Odnodvoretz L. V., Protsenko I. E., Tkach E. P. Tensoresistive effect in thin metal films in the range of elastic and plastic strain // *Techn. Phys.* — 2011. — Vol. 56, No. 2. — P. 232–237.