

УДК 621.316.8

**МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ Fe I Pd****О.П. Ткач, Л.В. Однодворець, С. Непійко\*, С.І. Проценко***Сумський державний університет, Україна**\*Інститут фізики Університету ім. Й. Гутенберга (Майнц)**Німеччина*

Надійшла до редакції 01.10.2009

Проведені дослідження ефекту магнітоопору в одно- і двошарових плівках Pd/Fe/P. Отримано, що залежність магнітоопору від індукції зовнішнього магнітного поля має гістерезисний характер і його величина, як і величина опору, який монотонно зменшується при зростанні індукції. Опір двошарових плівкових систем має більшу величину при вимірюванні в перпендикулярній геометрії у порівнянні із паралельною. Вказана відміна пояснюється різною динамікою руху електронів провідності.

**Ключові слова:** магніторезистивні властивості, магнітоопір, паралельна і перпендикулярна геометрія, динаміка електронів.

Проведены исследования эффекта магнитосопротивления в одно- и двухслойных пленках Pd/Fe/P. Получено, что зависимость магнитосопротивления от индукции внешнего магнитного поля имеет гистерезисный характер и его величина, как и величина сопротивления, монотонно уменьшается при росте индукции. Сопротивление двухслойных пленочных систем имеет большую величину при измерении в перпендикулярной геометрии по сравнению с параллельной. Указанное отличие объясняется разной динамикой движения электронов проводимости.

**Ключевые слова:** магниторезистивные свойства, магнитосопротивление, параллельная и перпендикулярная геометрия, динамика электронов.

Effect of magnetoresistance researches are carried out in one- and double-layered films Pd/Fe/S. It is received, that magnetoresistance from an induction of an external magnetic field character and its size, as well as resistance size has dependence hysteresis, monotonously decreases at induction growth. Resistance of two-layered film systems has the big size at measurement in perpendicular geometry in comparison with the parallel. The specified difference speaks different dynamics of movement of electrons conductivity.

**Keywords:** magnetoresistive properties, magnetoresistance, paralel and perpendicular geometry, dinamic of electrons.

**ВСТУП**

На сучасному етапі інформаційного розвитку та загальної мініатюризації елементів електроніки велика увага приділяється [1 – 3] дослідженню фізики магнітних явищ (магнітна анізотропія, кінетичні та магнітооптичні властивості, процеси перемагнічування) у низькорозмірних магніто-неоднорідних плівкових матеріалах (багатошарові плівкові системи чи мультишари). Такі матеріали на основі Fe і Pd з різною товщиною парамагнітних і феромагнітних шарів – надзвичайно цікаві об'єкти для вивчення магнітооптичних властивостей, створення носіїв інформації з високою щільністю магнітного запису, елементів спінової електроніки та магнітооптичних систем.

Із великої кількості робіт, присвячених дослідженню магнітних властивостей плівкових систем на основі Fe і Pd, ми акцентуємо увагу на роботах [4, 5]. У першій із них проведено детальні дослідження температурної залежності коерцитивної сили ( $H_c$ ) і намагніченості насичення ( $M_s$ ) при  $T = 4,2; 77$  і  $300$  К для плівок  $\text{Fe}_{(65-76)}\text{Pd}_{(35-24)}$  і температурної залежності їх намагніченості в інтервалі  $4,2 - 300$  К при наявності і відсутності зовнішнього магнітного поля. У першому випадку (при наявності магнітного поля) намагніченість залежить від концентрації атомів Pd і практично не залежить від температури, в той час як у другому випадку спостерігається і температурна залежність.

Автори роботи [5] установили, що в ультратонких плівках Fe (2 моношари) на (111)Pd при термовідпалюванні до  $T_b \cong 450$  К спостерігається перпендикулярна магнітна анізотропія, яка виникає завдяки морфологічним змінам і взаємній дифузії атомів при відпалюванні. При товщині плівок Fe у 2,5 – 5,5 моношари перпендикулярна магнітна анізотропія виникає лише при  $T_b \cong 600$  К.

Проведений аналіз показав, що при великому об'ємі досліджень магнітних характеристик плівкової системи Fe/Pd ефект магнітоопору (МО) залишається невивченим, що визначило мету наших досліджень.

### МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Плівкова система Pd/Fe/П (П – підкладка із аморфного ситалу) та одношарові зразки Pd і Fe отримувалися методом термічного випарування і пошарової конденсації у високому вакуумі  $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$  Па. Товщина окремих шарів контролювалася *in situ* методом кварцового резонатора і діапазон товщин ( $d$ ) плівки Fe складав 3 – 50 нм, а Pd – 3 – 10 нм.

Для забезпечення необхідної термостабілізації використовували кварц із спеціальною кристалографічною орієнтацією, якій відповідає низький температурний коефіцієнт лінійного розширення при кімнатних температурах. Це забезпечувало точність вимірювання товщини  $\Delta d = \pm 10\%$ . Для стабілізації магніторезистивних властивостей в окремих випадках здійснювалося термовідпалювання до 850 К. Вимірювання МО у невідпалених і відпалених зразках проводилося при  $T \cong 300$  К з використанням двоточкової схеми в постійному магнітному полі, величина індукції ( $B$ ) якого могла змінюватися у межах 0 – 0,1 Тл. Електричний опір вимірювався із точністю  $\pm 0,06\%$  за допомогою цифрового вольтметра АРРА-109. МО вимірювався в двох геометріях, коли струм через плівку пропускається у площині зразка, а індукція поля має дві орієнтації – паралельну ( $\parallel$ ) і перпендикулярну ( $\perp$ ) площині зразка.

На рис. 1 представлена схема геометрій вимірювання і принципова схема установки. Оскільки в означенні величини МО існує

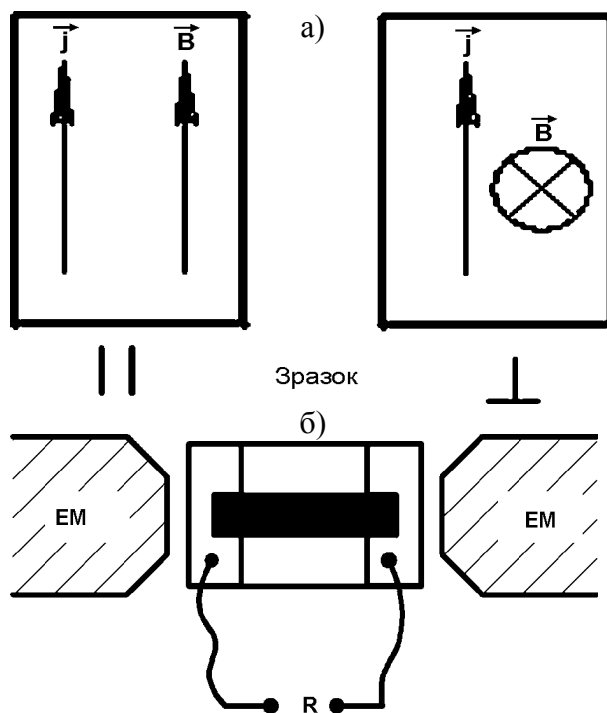


Рис. 1. Схема  $\parallel$  і  $\perp$  геометрій вимірювання (а) і принципова схема установки (б) для вимірювання МО. ЕМ – електромагніт.

певна невизначеність, то нами у всіх випадках використовувалося співвідношення:

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

де  $R(B)$  і  $R_s$  – опір плівки при заданому полі і полі насичення  $B_s$ . У тому випадку, коли визначалась коерцитивна сила, то експериментальні дані перебудовувалися в координатах

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

від величини  $B$ , яка

визначалася за графіком градування (залежність  $B$  від сили струму в обмотці соленоїда) із використанням вимірювача магнітної індукції Ш1-8 (точність вимірювання  $\pm 0,5\%$ ).

Контроль структурно-фазового стану здійснювався за допомогою електронного мікроскопу ПЕМ-125К в режимі мікроскопії та мікродифракції. Згідно проведених досліджень при відносно малій товщині плівок ОЦК-Fe фазовий склад свіжесконденсованих дво- і чотиришарових систем відповідає ГЦК-т.р.(Pd, Fe) (т.р. – твердий розчин), а при відносно великих товщинах, сумірних з товщиною плівки Pd, - ГЦК-т.р.(Pd, Fe)+ОЦК-Fe, а при відпалюванні зразків в інтервалі 300 –

900 К відбувається перехід до інтерметаліду ГЦТ-FePd при  $T_c > 600$  К.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ**

На рис. 2 представлені типові залежності опору і МО для відпалених до 850 К одношарових плівок Pd(3)/П і Fe(3)/П та двошарової плівкової системи Pd(3)/Fe(3)/П (тут і далі в дужках вказана товщина шарів у нм). Відмітимо особливості цих залежностей, які мають типовий характер і будуть мати місце і в інших дво- та багатошарових плівкових системах. По-перше, МО в  $\perp$  геометрії завжди більше у порівнянні із  $\parallel$  геометрією, а, як наслідок цього, для МО спостерігається протилежна тенденція. По-друге, величина МО в тонких шарах (до 10 нм) Pd і Fe має близькі значення,

що можна пояснити реалізацією фазового розмірного ефекту в плівках Fe, який призводить до стабілізації неферромагнітної ГЦК фази ( $\gamma$ -Fe) в кристалітах малих розмірів. Деяке збільшення МО для плівки Pd(3)/Fe(3)/П в  $\perp$  геометрії (рис. 2е) можна пов'язати із феромагнетизмом плівки Fe(3), оскільки наведений магнітний момент в атомів Pd появляється при більших товщинах плівки Fe [6]. По-друге, при зменшенні  $T_b$  величина МО збільшується при  $\parallel$  геометрії в чотири рази, а при  $\perp$  геометрії – приблизно в 1,7 разів (рис. 3). Аналогічний ефект спостерігався у плівках FeNi авторами [7].

У явищі МО дуже важливу роль відіграє фундаментальна проблема в магнітних властивостях – динаміка електронів у зовнішніх магнітних полях. Узагальнені дані робіт [8 –

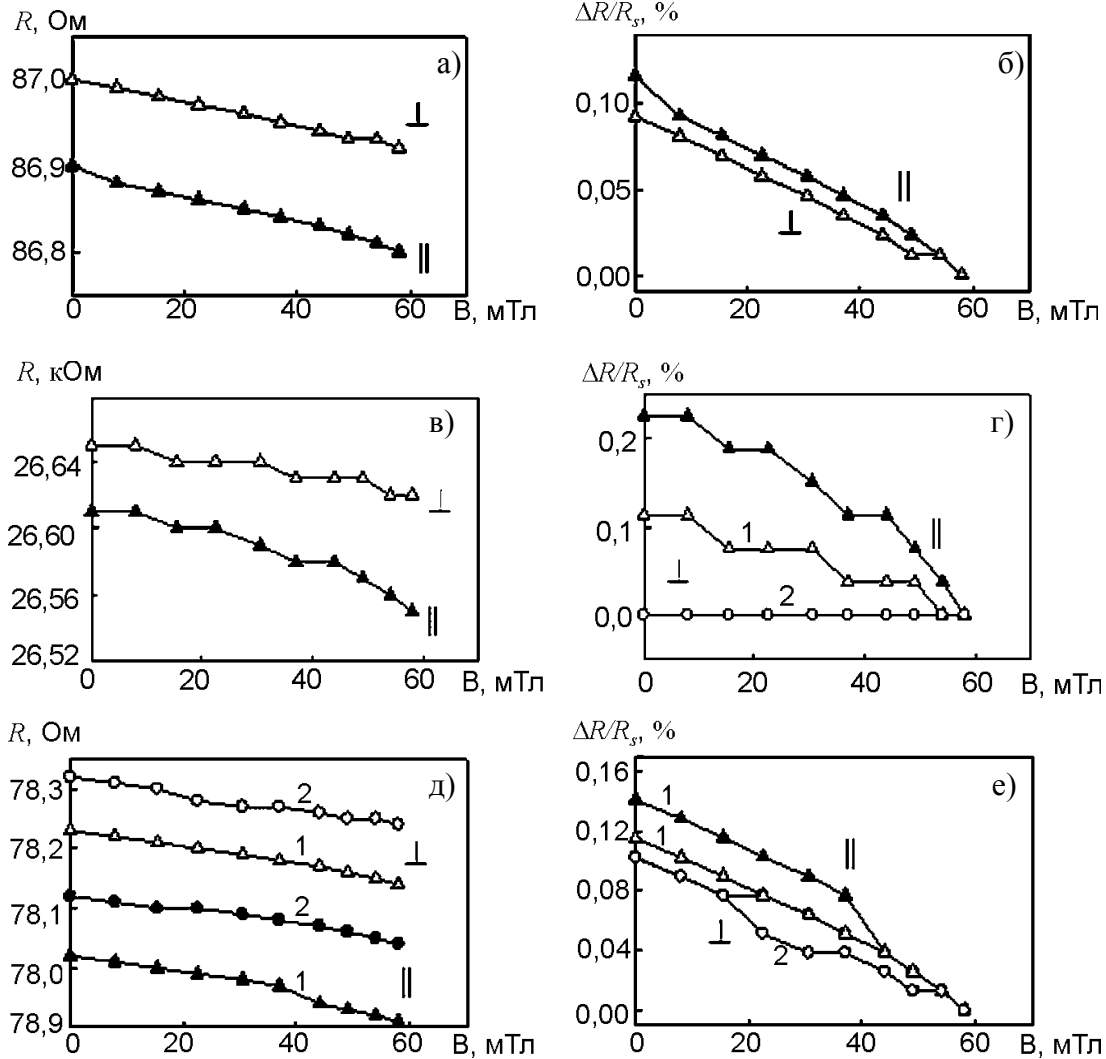


Рис. 2. Залежність  $R(B)$  і  $\frac{\Delta R}{R_s}(B)$  для відпалених до  $T_c \cong 850$ К плівок Pd(3) (а, б), Fe(3) (в, г) та Pd(3)/Fe(3)/П (д, е) із ГЦТ решіткою. В дужках вказана товщина в нм. 1, 2 – номери циклів намагнічування.

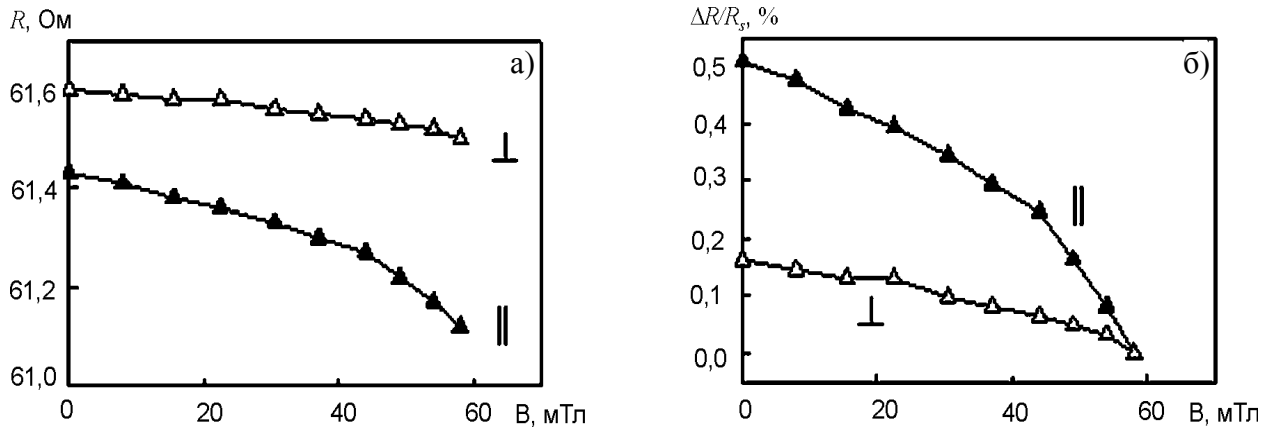


Рис. 3. Залежність  $R(B)$  і  $\Delta R/R_s$  для плівкової системи Pd(3)/Fe(3)/Пн при  $T_g \cong 300$  К.

11] можна представити у вигляді рис. 4. Відмітимо, що перші дві геометрії з точки зору динаміки руху електронів не мають принципової різниці (поздовжня орієнтація – це граничний випадок поперечної при куті  $(\theta) = 0$ ), тому на рис. 4 вони об'єднуються спільною назвою “паралельна орієнтація”.

Крім цього, дуже важливо розуміти, для правильної інтерпретації результатів, також і кінетику руху електронів у магнітному полі. Мова іде про те, що під дією поля відбувається зміна величини середньої довжини вільного пробігу електронів ( $\lambda_0$ ), коефіцієнтів дзеркальності зовнішньої поверхні ( $p$ ) і

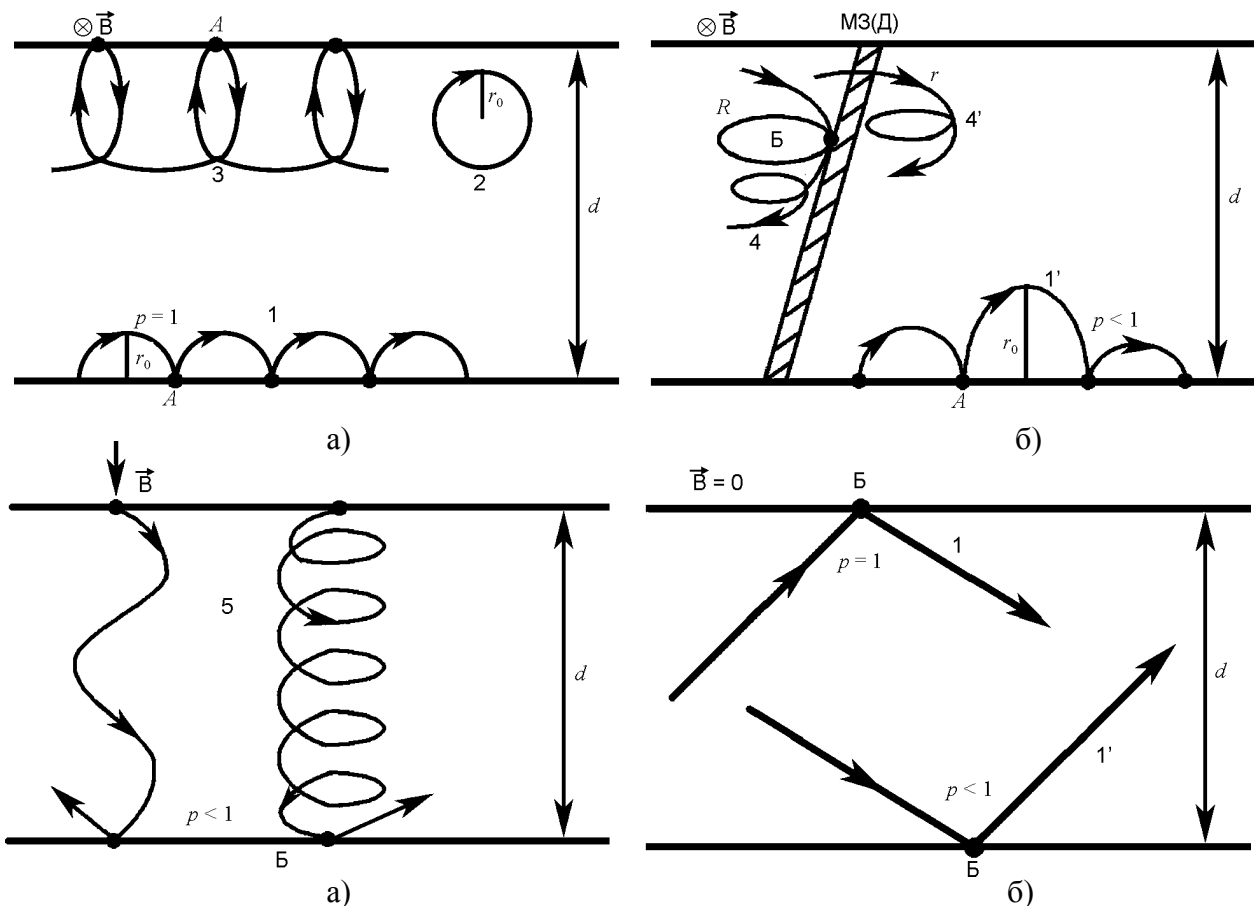


Рис. 4. Траєкторії руху електронів у тонкій плівці при паралельній (а, б), перпендикулярній (в) орієнтації зовнішнього поля та при його відсутності (г). 1, 1', 3 – відсікання траєкторії електронів при дзеркальному (1, 3) та дифузному (1') відбитті електронів від поверхні плівки; 2 – замкнута траєкторія електрона; 4 – дифузне або дзеркальне відбиття електрона від межі зерна (МЗ) або межі домена (МД); 4' – когерентне або некогерентне проходження МЗ(Д) електроном; 5 – гелікоїдальна траєкторія електронів. А, Б – точки відсікання траєкторії або відбиття електрона від поверхні плівки або МЗ(Д)

проходження межі зерен або доменів ( $r$ ) та інтерфейсів ( $Q$ ). Кількісними характеристиками вказаних змін можуть виступати магніт-

ний коефіцієнт (для  $\lambda$ ) та від-

повідні коефіцієнти (для  $p$ ),

$i$  (для  $r$  і  $Q$ ). Однак

з методичної точки зору визначати ці коефіцієнти надто складно, тому обговорювати їх роль в явищі МО можна лише на якісному рівні.

Узагальнюючи отримані результати стосовно МО одно- і двошарових плівок, відмічаємо вузлові моменти.

По-перше необхідно мати на увазі, що одношарові плівки Pd в усіх випадках знаходяться у парамагнітному стані (наведений магнітний момент виникає тільки при наявності феромагнітного шару Fe), а плівка Fe при малих товщинах знаходиться в суперпарамагнітному стані (причиною цього можуть бути як фазовий розмірний ефект (перехід до  $\gamma$ -Fe), так і розмірний ефект в магнітних властивостях).

По-друге, при переході до двошарових плівкових систем Pd/Fe/П в шарах Pd виникає наведений магнітний момент, який при певних товщинах може бути направлений в протилежну сторону магнітних моментів атомів Fe у нижніх шарах [12]. У плівкових системах Pd/Fe/П може виникнути магнітна анізотропія, яка пов'язана із віссю легкої намагнічуваності, а також перпендикулярна анізотропія як компонента площинної анізотропії (як правило ця анізотропія пов'язана із віссю важкої намагнічуваності). Оскільки характер магнітної анізотропії трудно контролюється, то ми не можемо виділити внесок площинної і перпендикулярної анізотропії в загальну величину МО.

По-третє, для всіх досліджених нами зразків характерним є гістерезис МО, що говорить про його зв'язок із доменною структурою.

Крім вказаного необхідно відмітити, що, оскільки, в системі на основі Pd і Fe відбувається фазоутворення, то наші кількісні результати слід порівняти із подібними системами. У даному випадку ми маємо на увазі результати робіт [13–15] для плівкових систем на основі Co і Ag [12], Co і Au [14] та Co і Cu [15]. У випадку [13] і [14] характер петлі гістерезису МО і порядок його величини такий же як у нашому випадку, а в системі на основі Co і Au [14] характер петлі МО аналогічний, але звертає на себе увагу велике значення МО: 2,8 % (при концентрації 9 ат.% Co) і 13,5 % (при 23 ат.% Co).

Накінець, необхідно звернути увагу і на той факт, що при відпалюванні плівок величина МО, як правило, збільшується. Якісно цей результат можна пояснити, виходячи із напівемпіричного правила Колера, згідно якого величина МО є функцією відношення  $V/c$ , де  $c$  – питомий опір зразка. У процесі відпалювання зразка питомий опір плівок зменшується (відбувається заліковування дефектів і рекристалізація) і в результаті цього величина МО збільшується.

## ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень ефекту магнітоопору (МО) в одно- і двошарових плівках Pd/Fe/П в поздовжній і перпендикулярній геометрії можна зробити наступні висновки:

1. Отримано, що залежність МО від індукції зовнішнього магнітного поля має гістерезисний характер і його величина, як і величина опору, монотонно зменшується при зростанні індукції.
2. У найбільш типових ситуаціях опір двошарових плівкових систем має більшу величину при вимірюванні в перпендикулярній геометрії у порівнянні із паралельною; отриману відміну можна пояснити різною динамікою руху електронів провідності: у перпендикулярній геометрії вони рухаються по гелікоїді під кутом до електричного поля і відбиваються від зовнішніх поверхонь або меж поділу шарів, а при паралельній геометрії рухаються вздовж плівки, приймаючи участь у дзеркальному чи дифузному відбитті з відсіканням або без відсікання траєкторії.

3. Якщо проаналізувати відомі теоретичні моделі для МО, то можна зробити висновок, що класичні моделі необхідно доповнити положенням про польову залежність, коефіцієнтів  $\rho$ ,  $r$  та  $Q$ , кількісною характеристикою якої можуть бути магнітні коефіцієнти

та

Автори виражають щире подяку проф. Проценку І.Ю. за участь у обговоренні результатів роботи і асп. Синашенко О.В. – за допомогу при проведенні експерименту.

Робота виконана в рамках спільного науково-технічного проекту між Сумським державним університетом та Інститутом фізики Університету ім. Й. Гутенберга (м. Майнц, Німеччина).

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Шалыгина Е., Цидаева Н., Карсанова М. Магнитные и магнитооптические свойства Fe/Pt и Fe/Pt/Fe тонкопленочных магнитных структур//Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т.71, Вып.1. – С. 53 – 58.
2. Ганьшина Е.А., Богородицкий А.А., Кумаринова Р.Ю., Бибикина В.В., Смирницкая Г.В., Цидаева Н.И. Магнитооптические свойства многослойных пленок Fe/Pd//ФТТ. – 2001. – Т. 43, Вып. 6. – С. 1061-1066.
3. Камзин А.С., Снеткова Е.В., Янг З., Вей Ф., Хианг В. Исследования тонких пленок FePt, синтезированных методом последовательного распыления//Письма в ЖЭТФ. – 2008. – Т.34, Вып.1. – С.57-64.
4. Kumar M. Temperature dependence of magnetization in Fe-Pd thin films//Mater Science Engineering B. – 2009. – Vol. 162. – P. 59-63.
5. Choi J. H., Nahm T. U., Kim W. et al. Change of magnetic property in ultrathin Fe films grown on Pd(111) induced by morphological change and interdiffusion//Surf. Sci. – 2001. – Vol. 495. – P. 173-184.
6. Ганьшина Е.А., Богородицкий А.А., Кумаринова Р.Ю., Бибикина В.В., Смирницкая Г.В., Цидаева Н.И. Магнитооптические свойства многослойных пленок Fe/Pd//ФТТ.–2001.– Т.43, Вып. 6. – С. 1061-1066.
7. Tanaka K., Ichitsubo T., Koiwa M. Effect of external fields on ordering of FePd//Mater Science Engineering A. – 2001. – Vol. 312.– P. 118-127.
8. Колесниченко Ю. А. Влияние диффундирующего слоя примесей на электропроводность тонких металлических пластин//ФНТ. – 1995. – Т. 11. – С. 1165-1171.
9. Klama S. Electron dynamics in thin film in an external longitudinal magnetic field//J. Phys. C: Solid State Phys. – 1987. – Vol. 20, № 4. – P. 551-563.
10. Панченко О. А., Сологуб С. В. Розмірні явища і поверхневе розсіювання носіїв струму в металах (огляд)//ФХТТ. – 2003. – Т. 4, № 1. – С. 7-42.
11. Дехтярук Л.В. Осцилляционный гальваномагнитный эффект в двухслойных металлических пленках // Изв. вузов. Физика. – 2007. – №7. – С.26-33.
12. Nait-Laziz H., Bouarab S., Demangeat C. The Pd polarization at the Pd/Fe interface//J. Magn. Magn. Mater. – 1993. – Vol. 118. – P. 365-372.
13. Paje S. E., Arranz M. A., Andres J. P. et al. Study of the different magnetoresistance sources in Ag/Co multilayers//J. Phys.: Condens. Matter. – 2003. – Vol. 15. – P. 1071-1079.
14. Kitada M. Magnetoresistance and microstructure of sputtered Au-Co thin films//J. Magn. Magn. Mater. – 2000. – Vol. 208. – P. 244-250.
15. Лобода В.Б., Шкурдода Ю.А., Пирогова С.Н. Структура и гальваномагнитные свойства трехслойных пленок Co/Cu/Co//Вісник СумДУ. Серія: фізика, математика, механіка. – 2004. – № 8 (67). – С. 107-115.

© О.П. Ткач, Л.В. Однодворець, С. Непийко, С.І. Проценко, 2009.