

PACS numbers: 73.50.It, 64.70.Tg

ЕФЕКТ ХОЛЛА В МУЛЬТИШАРАХ НА ОСНОВІ Pd I Fe

О.П. Ткач, О.С. Грищук, Т.П. Говорун, Л.В. Одноворець

Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна
E-mail: larysa.odnodvoret@gmail.com

У роботі представлені результати експериментальних досліджень особливостей ефекту Холла в мультишарах на основі PdI Fe. Показано, що величина сталої Холла залежить від загальної товщини мультишару (кількості фрагментів), товщини немагнітного шару та інтервалу відпалювання досліджуваних плівкових зразків. Одержана задовільна відповідність експериментальних і розрахованих на основі моделі паралельного з'єднання окремих фрагментів мультишару даних.

Ключові слова: ГАЛЬВАНОМАГНІТНІ ЯВИЩА, МУЛЬТИШАР НА ОСНОВІ Pd I Fe, РОЗМІРНІ ЕФЕКТИ, ЕФЕКТ ХОЛЛА, ТЕМПЕРАТУРА ВІДПАЛЮВАННЯ.

*(Одержано 01.10.2011, у відредагованій формі – 05.11.2011
опубліковано online 30.12.2011)*

1. ВСТУП

Гальваномагнітні ефекти (ГМЕ) – це сукупність явищ, пов'язаних з дією магнітного поля на електричні властивості провідників, по яким протікає струм. Найбільш суттєво проявляють себе поперечні ГМЕ, коли магнітне поле направлено перпендикулярно до напрямку електричного струму. До них відносяться ефект Холла – виникнення різниці потенціалів (ЕРС Холла) в напрямку, який перпендикулярний полю і поперечний магніторезистивний ефект – зміна електричного опору провідника під впливом магнітного поля. ЕРС Холла в феромагнітних плівках визначається поведінкою намагніченості [1], а її величина тим більша, чим менша товщина плівки. У зв'язку з розвитком наноелектроніки і спінтроніки дослідженню ефекту Холла приділяється велика увага, оскільки на його основі можуть бути створені високочутливі вимірювачі магнітного поля, мікроелектронні компаси, датчики переміщення та вимірювання частоти обертання [2, 3], проведений аналіз анізотропних процесів на межі поділу систем феромагнетик/антиферомагнетик [4], вивчені процеси перемагнічування в спін-вентильних структурах [5]. Останнім часом великий інтерес викликає розробка і застосування методик дослідження ефекту Холла в багатошарових плівкових системах, результати яких успішно використовуються для визначення концентрації і рухливості носіїв заряду. На основі датчиків Холла створені амперметри для вимірювання електричного струму до 100 кА, вимірники лінійних і кутових переміщень, прилади для вимірювання градієнта магнітного поля і магнітного потоку, безконтактні перетворювачі постійного струму в змінний, відтворювачі головок систем звукозапису [6].

На сучасному етапі отримана значна інформація про структурні і магнітні властивості двокомпонентних плівкових матеріалів на основі Pd і Fe, які можуть застосовуватись як компоненти чутливих елементів вищевказаних сенсорів, хоча питання про особливості ефекту Холла (ЕХ) в мультишарах на основі цих металів залишається невивченим, що і визначило мету даної роботи.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мультишари на основі Pd і Fe були отримані шляхом пошарової конденсації методом термічного випарування з використанням надвисоковакуумної установки (тиск залишкової атмосфери 10^{-7} Па); високовакуумної камери на основі турбомолекулярного насосу Pfeiffer-Balzors TRH-330 (тиск залишкової атмосфери 10^{-5} Па) для проведення відпалювання плівкових зразків. Ефективна товщина контролювалася методом кварцового резонатора на основі вимірювальної системи із трьох кварцових пластин: головної (калібрувальної) та двох допоміжних (вимірювальних). Вимірювання ЕХ проводилося при кімнатній температурі за чотириточковою схемою (рис. 1). Товщина шарів Pd складала 0,4; 0,6; 0,9; 1,1 та 1,4 нм, а Fe – 0,6 або 0,9 нм.

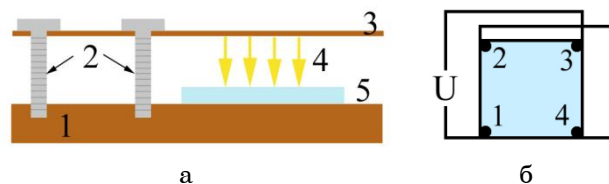


Рис. 1 – Чотириточкова схема для дослідження ефекту Холла (а) та схема зняття вихідної напруги (б): 1 – мідна пластина, що забезпечує тепловідведення, 2 – притискні гвинти, 3 – гнучка текстолітова пластина, 4 – контакти, 5 – зразок

При вимірюванні ЕРС Холла у випадку перпендикулярного напрямку електричного струму і магнітного поля був врахований внесок додаткових (паразитних) ЕРС, які виникають в схемі внаслідок побічних термо- і гальваноманітних ефектів (рис. 1 б). Для зменшення впливу цих негативних факторів і несиметричності розміщення контактів було проведено чотири вимірювання при різних напрямках електричного струму через контакти 2 – 4; 4 – 2 та 1 – 3; 3 – 1 в присутності магнітного поля. Напрямок електричного струму I та індукції магнітного поля B був взаємно-перпендикулярним. Крок зміни індукції магнітного поля складав 0,001 Тл.

Значення сталої Холла R_H було визначене із співвідношення:

$$R_H = U_H d / (IB),$$

де U_H – напруга Холла, I – величина електричного струму, B – значення магнітної індукції, d – товщина зразка.

Авторами використана методика Ван-дер-Пау [6] для вимірювання величини питомого опору (ρ) та R_H для плівкових зразків довільної геометричної форми. Застосування даної методики можливе за виконання

наступних умов: контактні майданчики з мінімальними геометричними розмірами розміщуються по краях (периферії) мультишару; тонкоплівковий зразок має бути суцільним і однаковим за товщиною по всій площині підкладки.

Термічна обробка мультишарів проводилась спеціальному пристрої, схема якого зображена на Рис. 2. Вимірювання опору здійснювалося мультиметром HP 34410A з точністю 0,0015 %. Для контролю температури була використана хромель-алюмелеватермопара (точність ± 1 К) показники, якої фіксувалися мультиметром Escort EDM3150. Вимірювання здійснювалося протягом трьох стабілізаційних циклів в автоматизованому режимі за схемою «нагрівання \leftrightarrow охолодження» при постійній швидкості 2 – 3 К/хв.

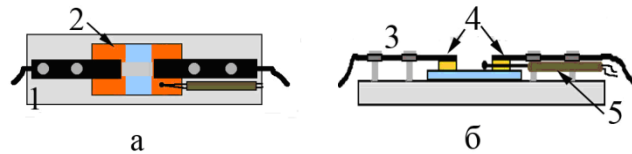


Рис. 2 – Схема пристрою для термічної обробки мультишарів (а – вигляд згори, б – збоку): 1 – підкладка-столік; 2 – зразок; 3 – гвинти для закріплення притискних контактів 4; 5 – термопара

Електронно-мікроскопічні дослідження вказують на те, що окремі шари, які входять в мультишар, складаються з окремих острівців, що дотикаються один до одного і тим самим забезпечують електропровідність системи в цілому. З такої точки зору кожний двошаровий фрагмент мультишарів представляє собою квазібіпластину.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

У роботі представлені результати експериментальних досліджень особливостей ЕХ в мультишарах на основі PdIFe. Як відомо (див., наприклад, [7]), величина R_H металів залежить від зонної структури та форми Фермі поверхні. Межа поділу окремих шарів суттєво впливає на величину R_H . Крім цього слід відмітити, що у феромагнітних шарах на електрони провідності діє не тільки зовнішнє, але і внутрішнє магнітне поле, що обумовлює зв. звичайний і аномальний ефект Холла. В області власної провідності знак ЕРС Холла відповідає знаку носіїв, рухливості яких більше. Якщо експериментальні вимірювання вказують на від'ємне значення напруги Холла, то це свідчить про перевагу електронної провідності в мультишарі. Надалі величину R_H ми будемо розглядати без знаку мінус.

На Рис. 3 наведені узагальнені польові залежності $U_H(B)$ для невідналених ($T = 300$ К) мультишарів $[Pd(1,1) / Fe(0,9)]_3 / \Pi$ і $[Pd(1,1) / Fe(0,9)]_5 / \Pi$, які пройшли термообробку в інтервалах температур: $\Delta T_1 = 300 - 460$ К; $\Delta T_2 = 300 - 680$ К та $\Delta T_3 = 300 - 790$ К. Як видно із рис. 3, розширення інтервалу термовідпалення зразків від 300 до 790 К призводить до зменшення напруги Холла при $B = 1$ Тл від 1,0 до 0,4 мВ. Порівняльний аналіз Рис. 3 і 3 б показує, що при збільшенні загальної товщини від 6 до 10 нм (кількості фрагментів від 3 до 5) величина напруги Холла зменшується в 1,5 – 2 рази.

Для інтервалів термообробки $\Delta T_1, \Delta T_2$ і ΔT_3 криві $U_H(B)$ мають різний кут нахилу, що відображає фазові перетворення в плівці: при $T = 680$ К індивідуальність шарів PdFe зникає, утворюється плівковий сплав із неупорядкованою структурою (рис. 3 а); при $T = 790$ К має місце гістерезис кривої, наявність якого свідчить про утворення упорядкованої фази $L1_0$ та присутність перпендикулярної складової намагніченості в плівковому зразку (Рис. 3 б).

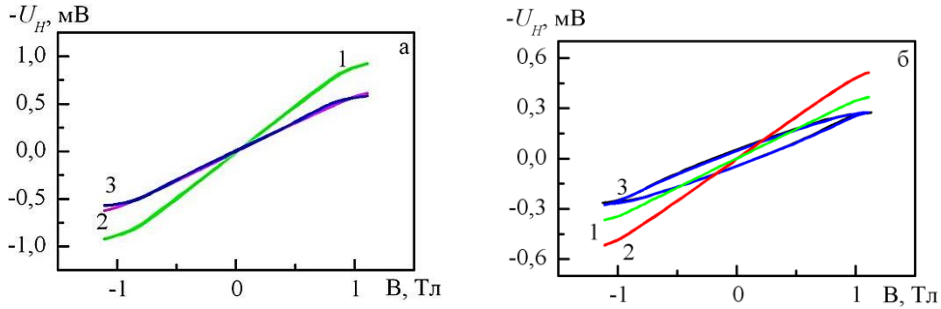


Рис. 3 - Польова залежність напруги Холла для плівкових систем $[Pd(1,1) / Fe(0,9)]_3 / П$ (а) і $[Pd(1,1) / Fe(0,9)]_5 / П$ (б) невідпалених (1) та які пройшли термообробку до 680 К (2) і 790 К (3)

Величина напруги U_{HV} мультишарах залежить не тільки від інтервалу термообробки і кількості фрагментів, а й від товщини немагнітного шару, в даному випадку Pd (рис. 4). Так в мультишарах $[Pd(x)/Fe(0,6)]_{10}/П$ при варіюванні товщини шару Pd від 0,4 до 1,4 нм максимальне значення напруги Холла відповідає товщині $d_{Pd} = 0,6$ нм, тобто у випадку коли $d_{Pd} = d_{Fe}$, мінімальне значення напруги Холла спостерігається при $d_{Pd} = 1,4$ нм, коли $d_{Pd} > d_{Fe}$.

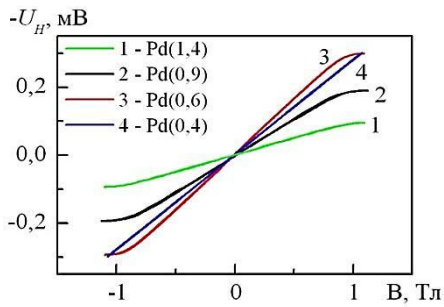


Рис. 4 - Залежність напруги Холла від товщини проміжного шару плівкового зразка $[Pd(x) / Fe(0,6)]_{10} / П$ при $T = 300$ К

Для розрахунку величини R_H скористаємося теоретичною моделлю для ЕХ двошарових плівок Ni/Cu і Ta/Cu, запропановану авторами [8], в якій двошарова плівка (в нашому випадку – фрагмент мультишару) розглядається як паралельне з'єднання окремих шарів. Згідно [8] величина R_H виражається співвідношенням

$$R_H = (d_1 + d_2) \cdot \left(\frac{R_{H1}\rho_2^2 d_1 + R_{H1}\rho_1^2 d_2}{(\rho_2 d_1 + \rho_1 d_2)^2} \right),$$

де R_{H1} і R_{H2} , d_1 і d_2 , ρ_1 і ρ_2 – відповідно сталі Холла для матеріалу 1-го і 2-го шарів, товщини шарів та питома провідність окремих шарів, яка відповідає товщинам d_1 і d_2 .

Результати порівняння експериментальних і розрахункових даних наведені в таблиці 1. Дані таблиці 1 показують, що для ЕХ характерна розмірна залежність, зокрема, при загальній товщині мультишару від 10 до 20 нм R_H зменшується від $4,84 \cdot 10^{-9}$ до $3,69 \cdot 10^{-9}$ м³/Кл.

Таблиця 1 – Порівняння експериментальних та розрахункових даних для сталі Холла мультишарів Pd / Fe

Зразок	$R_H^{екс} \cdot 10^9$, м ³ /Кл	$R_H^{роз} \cdot 10^9$, м ³ /Кл	$(R_H^{роз} - R_H^{екс}) / R_H^{екс}$, %
[Pd(0,4)/Fe(0,6)] ₁₀ /П	4,80	3,23	33
[Pd(0,6)/Fe(0,6)] ₁₀ /П	4,84	2,65	45
[Pd(0,9)/Fe(0,6)] ₁₀ /П	4,24	2,12	50
[Pd(1,4)/Fe(0,6)] ₁₀ /П	3,69	1,65	55
[Pd(1,1)/Fe(0,9)] ₃ /П	5,49	2,38	57
[Pd(1,1)/Fe(0,9)] ₅ /П	5,07	2,38	53
[Pd(1,1)/Fe(0,9)] ₁₀ /П	3,97	2,38	40
[Pd(1,4)/Fe(0,9)] ₁₀ /П	3,77	2,08	45
Pd(3)/Fe(3)/Pd(6)/Fe(20)/П	0,97	0,20	29
Pd(5,7)/Fe(4,3)/П	1,62	2,28	-40

Вищевказана теоретична модель не враховує процесів розсіювання електронів на межах поділу окремих шарів, які, як відомо [9, 10], суттєво впливають на електрофізичні і гальваномагнітні властивості плівок. Розходження між експериментальними і розрахунковими величинами сталі Холла (Рис. 5 а) пояснюється нами впливом інтерфейсного розсіювання електронів, хоча багато деталей цього процесу залишаються поки що не зрозумілими. Зокрема, не зрозуміла причина зменшення величини $R_H^{екс}$ (Рис. 5 а) при збільшенні числа фрагментів, а значить і числа інтерфейсів, що може обумовити однакове значення $R_H^{роз}$ і $R_H^{екс}$ при екстраполяції N на велике значення (залежності на рис. 5 а будуть сходиться в точку). Не до кінця зрозуміла причина розходження експериментальних і розрахункових залежностей на рис. 5 б і зовсім не зрозуміло, чому вони не екстраполюються при $d_{Pd} \rightarrow 0$ на відповідне значення $R_H(d_{Fe} = 0,9 \text{ нм})$, а при $d_{Pd} \rightarrow \infty$ на величину R_H для масивного Pd.

Із даних таблиці 1 видно, що в залежності від кількості фрагментів і загальної товщини мультишару внесок процесів розсіювання електронів складає від 33 до 55 % (мультишари з кількістю фрагментів $N = 10$); 53 – 57% ($N = 3, 5$) та від 29 до 40 % для дво- і чотиришарових плівок з довільною товщиною окремих шарів.

ВИСНОВКИ

На основі результатів експериментальних досліджень ефекту Холла в мультишарах на основі Pd і Fe можна зробити наступні висновки:

Ефект Холла проявляє розмірну і температурну залежності. Величина сталі Холла залежить від декількох факторів: кількості фрагментів,

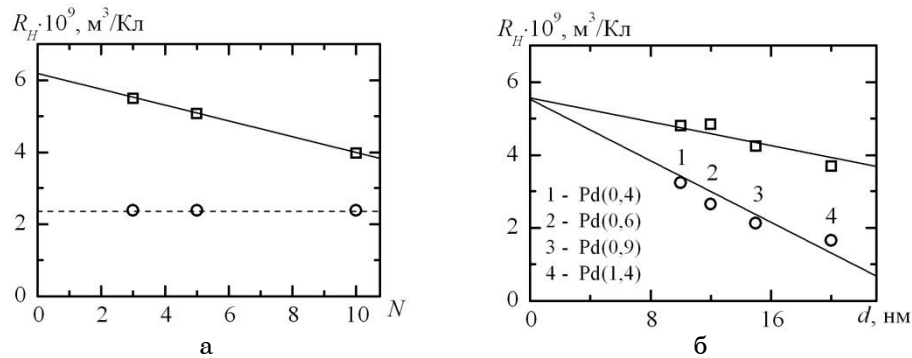


Рис. 5 – Залежність сталості Холла від кількості фрагментів (а) для плівкової системи $[\text{Pd}(1,1)/\text{Fe}(0,9)]_N / \Pi$ і загальної товщини (б) плівкової системи $[\text{Pd}(x)/\text{Fe}(0,6)]_{10} / \Pi$: \square – експериментальні та \circ – розрахункові результати

загальної товщини мультишару, товщини шару Pd та інтервалу відпалювання досліджуваних плівкових зразків. Максимальний ефект Холла для мультишарів $[\text{Pd}(0,6)/\text{Fe}(0,6)]_N / \Pi$ спостерігається у випадку $d_{\text{Fe}} = d_{\text{Pd}} = 0,6$ нм.

Одержана задовільна відповідність експериментальних і розрахованих даних, на основі якої можна оцінити внесок у ефект Холла процесів інтерфейсного розсіювання електронів. Показано, що в залежності від кількості фрагментів і загальної товщини зразка внесок процесів розсіювання складає від 30 до 57 %.

Автори висловлюють щире подяку проф. М. Маршалек за можливість проведення експериментальних досліджень в Лабораторії тонких плівок і мультишарів Інституту ядерної фізики ПАН (м. Краків).

HALL EFFECT IN MULTILAYERS BASED ON Pd AND Fe

O.P. Tkach, O.S. Hryshuk, T.P. Hovorun, L.V. Odnodvoretz

Sumy State University,
2, Rymsky-Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine
E-mail: larysa.odnodvoretz@gmail.com

The paper presents results of experimental investigations of singularities of the Hall effect in multilayers based on Pd and Fe. It is shown that the value of the Hall coefficient depends on the total thickness of the multilayer (the number of fragments), thickness of the nonmagnetic layer and the range of annealing studied film samples. A satisfactory agreement between experimental and calculated data of based on the model of parallel connection of individual fragments of a multilayer.

Keywords: GALVANOMAGNETIC EFFECTS, MULTILAYER BASED ON Fe AND Pd, THE SIZE EFFECTS, HALL EFFECT, ANNEALING TEMPERATURE.

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В МУЛЬТИСЛОЯХ НА ОСНОВЕ Pd И Fe

Е.П. Ткач, А.С. Грищук, Т.П. Говорун, Л.В. Однодворец

Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина
E-mail: larysa.odnodvorets@gmail.com

В работе представлены результаты экспериментальных исследований особенностей эффекта Холла в мультислоях на основе PdFe. Показано, что величина постоянной Холла зависит от общей толщины мультислоя (количества фрагментов), толщины немагнитного слоя и интервала отжига исследуемых пленочных образцов. Получено удовлетворительное соответствие экспериментальных и рассчитанных на основе модели параллельного соединения отдельных фрагментов мультислоя данных.

Ключевые слова: ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ, МУЛЬТИСЛОЙ НА ОСНОВЕ Pd И Fe, РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ, ЭФФЕКТ ХОЛЛА, ТЕМПЕРАТУРА ОТЖИГА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б.А. Аронзон, А.Б. Грановский, С.Н. Николаев, Д.Ю. Ковалев, Н.С. Перов, В.В. Рыльков, *ФТТ* **46**, 1441 (2004) (B.A. Aronzon, A.B. Granovskii, S.N. Nikolaev, D.Yu. Kovalev, N.S. Perov, V.V. Ryl'kov *Phys. Solid State* **46**, 1482 (2004)).
2. F. Montaigne, A. Schuhl, F. Nguyen Van Dau, A. Encina, *SensorActuat. A-Phys.* **81**, 324 (2000).
3. F.G. Ogrin, S.L. Lee, Y.F. Ogrin, *J.Magn.Magn.Mater.* **219**, 331 (2000).
4. G. Li, T. Yang, Q. Hu, W. Lai. *Appl. Phys. Lett.* **77**, 1032 (2000).
5. Z.Q. Lu, G. Pan, Y.K. Zheng. *J. Appl. Phys.* **91**, 2161 (2002).
6. Е.В. Кучис, *Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования*. (Москва: Радио и связь: 1990).
7. Б.В. Коробіцин, В.Е. Горбачов, *Фізика твердого тіла. Методичний посібник* (Одеса: ОНАЗ: 2005).
8. G. Reiss, K. Kapfberger, G.Meier, J. Vancea, H. Hoffman, *J. Phys.: Condens. Matter.* **1**, 1275(1989).
9. І.М. Pазukha, І.Е. Protsenko, *Tech. Phys.* **55**, 571 (2010).
10. О.А. Панченко, С.В. Сологуб, *ФХТТ* **4** №1, 7 (2003).