

Магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів: варіювання вимірювальних струмів та мінімізація електронних шумів

С.О. Волков, О.П. Ткач, Л.В. Одиногорець, Я.В. Хижня

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

(Одержано 25.08.2016, опубліковано online 03.10.2016)

Розроблені схема і програмне забезпечення електронного блока для варіювання величини вимірювального струму та мінімізації електронних шумів в автоматизованому лабораторному комплексі для вимірювання магнітоопору нанорозмірних плівкових матеріалів. Проведене дослідження магніторезистивних властивостей плівок на основі Co та Al або Cu, Fe та Pd або Au різного фазового складу із загальною товщиною від 20 до 150 нм при різних струмах вимірювання. Установлено, що незалежно від фазового складу плівкових матеріалів при величині вимірювального струму 10 і 100 мкА від плівок спостерігається нестабільний електричний сигнал несиметричної форми з невизначеним нульовим максимумом. Найбільш ефективним для усіх плівкових зразків є величина вимірювального струму 10 мА, при якому сигнал стає симетричним і стабільним.

Ключові слова: Нанорозмірні плівкові матеріали, Магніторезистивні властивості, Чотирьохточкова схема вимірювання, Вимірювальний струм, Стабілізація електричного сигналу.

DOI: 10.21272/jnep.8(3).03030

PACS numbers: 75.70. – i, 75.47.Np

1. ВСТУП

Датчики магнітного поля знайшли широке застосування в електронних пристроях. Вони успішно використовуються у вимірювальній і обчислювальній техніці, автоматизації. Використання магніторезистивного ефекту із застосуванням сучасної інтегральної технології дає можливість створювати датчики і магнітні головки гранично малих розмірів з високою чутливістю (незалежною від частоти) у широкому діапазоні полів і можливістю виготовлення в єдиному технологічному процесі, на одній підкладці датчиків, головок та електронних схем обробки сигналів і керування (див., наприклад, [1]).

Швидкими темпами ускладнюються завдання, які вирішуються за допомогою датчиків, а вимоги до них зростають. При цьому особливе значення надається таким параметрам як висока чутливість, надійність, мініатюрність, технологічність. Одним з актуальних напрямків сучасної магнітоелектроніки є дослідження ефекту магнітоопору (МО), а в останні роки акцент зроблений на явище гігантського магнітоопору (ГМО).

Основною проблемою при розробці ГМО-датчиків та вимірюванні їх магніторезистивних характеристик залишається обмеження сигналу шумами в області слабких магнітних полів. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми і засобом мінімізації електронних шумів та згладжування вихідного сигналу є варіювання величини вимірювального струму в автоматизованих системах фіксації магніторезистивного ефекту.

При вивченні магнеторезистивних властивостей традиційно використовують методи вимірювання за 2-х або 4-х точковими схемами. 2-х точкова схема має меншу точність у порівнянні із 4-х точковою за рахунок відсутності компенсації опорів з'єднувальних провідників. Чотирьох точкова схема використовує принцип, який ґрунтується на вимірюванні падіння опорної напруги зі зміною опорного зразка. У схемі вимірювання такого типу, на основі якої побудована робо-

та сучасних цифрових мультиметрів, на першу пару контактів подається фіксований струм з опорною напругою, а з другої пари контактів знімається падіння напруги. Недоліком 4-х точкових систем є той факт, що дослідник не має можливості змінювати робочий інтервал вимірювального струму, оскільки в цифрових приладах він встановлений автоматично.

Відомо, що плівкові матеріали чутливі до величини струму, тому при зміні його значення можлива зміна амплітуди МО. Так, авторами [1] була встановлена залежність МО мультиспінних на основі Co, Ni або Pt від величини струму вимірювання. Отримані результати пояснені [2] різним ефектом передачі моменту обертання спін-поляризованими носіями заряду при різних значеннях струму. Даний ефект був спрогнозований авторами робіт [3, 4] та досліджений експериментально в роботах [5, 6].

На кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету (див., наприклад, роботу [7]) розроблений автоматизований програмований лабораторний комплекс, принциповою особливістю якого стала можливість автоматичного вимірювання за стандартною 4-точковою схемою зміни МО в тонкоплівкових матеріалах при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання та реалізація повороту зразка в діапазоні кутів $\pm 180^\circ$ з мінімальним кроком 1° .

Мета даної роботи полягала у розробленні схеми і програмного забезпечення електронного блока для варіювання величини вимірювального струму та мінімізації електронних шумів в автоматизованому лабораторному комплексі для вимірювання МО нанорозмірних плівкових матеріалів.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Апаратна частина і програмне забезпечення

Важливим завданням при розробці розробці блока автоматизованої системи була розробка високостабільного джерела струму, який буде задовольняти

таким вимогам: висока температурна і часова стабільність вихідних параметрів та можливість забезпечення різних інтервалів величини вимірювальних струмів при різних значеннях опорних напруг. Метод, описаний раніше в [7], дає можливість установлення трьох основних величин вимірювальних струмів: 10 і 100 мкА; 1 мА.

Нами було розроблений електронний блок автоматизованого комплексу [7], на основі високостабільного джерела струму (на основі інтегрованої мікросхеми LP2951) та стабілізатора напруги (на основі мікросхеми LM 317). Принципова електрична схема і блок-схема блоку для вимірювання магніторезистивних властивостей плівки наведені на рис.1 і 2 відповідно.

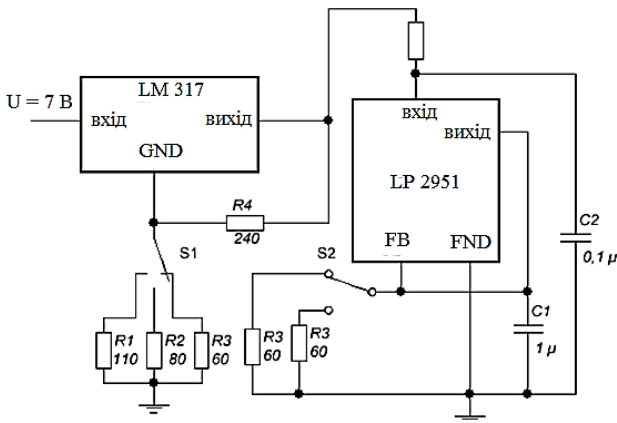


Рис. 1 – Принципова електрична схема високостабільного джерела струму зі стабілізатором опорної напруги

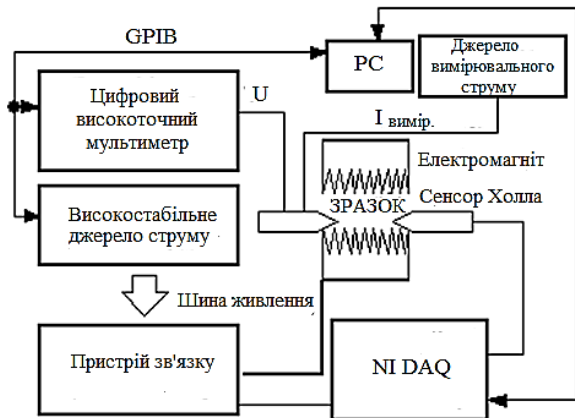


Рис. 2 – Блок-схема системи для дослідження магніторезистивних властивостей плівки із застосування джерела вимірювального струму

Основні робочі параметри пристрою наступні: вимірювальні струми 1, 10 і 30 мА; фіксовані опорні напруги 2,8; 3,8 і 5 В; температурний дрейф джерела струму – не більше 0,01 мкА/К, робоча температура – 20 °С.

Програмне забезпечення для автоматизації вимірювання МО розроблене у середовищі Labview 2013 на основі багатопоточної системи шаблону кінцевого автомату. У загальному випадку алгоритм програмного забезпечення (Рис. 3) реалізує зчитування значення напруги із цифрового вольтметра, визначає величину та зміну полярності магнітного поля наси-

чення. Запис експериментальних даних здійснюється після закінчення вимірювального циклу.

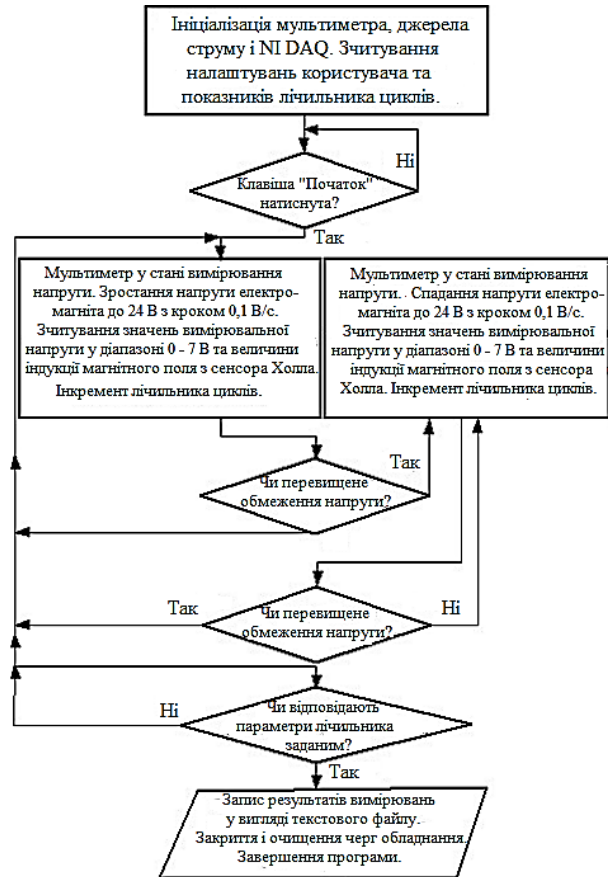


Рис. 3 – Загальний вигляд алгоритму автоматизації системи для дослідження магніторезистивних властивостей плівкових зразків

2.2 Формування плівкових зразків

Для отримання плівкових матеріалів використовувались вакуумна установка типу ВУП-5М ($p \sim 10^{-3}$ – 10^{-4} Па) і високовакуумна установка на основі турбомолекулярного насосу Pfeiffer-Balzors TRH-330 ($p \sim 10^{-5}$ Па). Плівкові матеріали конденсувалися електронно-променевим (Co) та терморезистивним (Fe, Pd, Cu і Au) методами випарування, товщина окремих шарів (d) плівки варіювалась від 5 до 60 нм. Температура підкладки $T_n = 300$ К, температура відпалювання змінювалась в інтервалі $T_v = 300$ -750 К протягом 3 термостабілізаційних циклів «нагрів ↔ охолодження». Як підкладки (П) використовувалися ситалові пластини із нанесеними низькоомними контактними майданчиками. Через спеціальну маску осаджувалася плівка із наперед заданими геометричними розмірами. Товщина сконденсованої плівки визначалася методом кварцового резонатора.

Дослідження магніторезистивних властивостей проводилося в зовнішньому магнітному полі від 0 до 500 мТл. Струм пропускався паралельно площині зразка. Вимірювання МО відбувалось при кімнатній температурі у трьох орієнтаціях магнітного поля відносно напрямку протікання струму: перпендикулярній (\perp), поперечній (\oplus) і поздовжній (\parallel). Вели-

чина магнітоопору розраховувалася за співвідношенням: $MO = [(R(B) - R(0)/R(0)) \cdot 100 \%$, де $R(B)$ – поточне значення опору плівки в магнітному полі; $R(0)$ – опір плівки без дії магнітного поля.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

З метою перевірки ефективності запропонованої методики проведені дослідження магніторезистивних властивостей нанорозмірних плівкових матеріалів на основі Co і Cu або Al, Fe і Au або Pd з різними товщинами шарів та оцінка впливу величини вимірювального струму на амплітуду МО. Були досліджені магніторезистивні властивості дво- і тришарових плівок та мультишарів: двошарові плівки і мультишари на основі Co і Al, в яких зберігається індивідуальність окремих шарів [8]; на основі Co і Cu, в яких утворюється безперервний ряд твердих розчинів (див., наприклад, [9]) або, в окремих випадках зберігається індивідуальність шарів [10]; двошарові плівки на основі Fe і Pd, в яких після відпалювання утворюються плівкові сплави [11]; дво- і тришарові плівки на

основі Fe і Au, в яких формується неупорядкований ОЦК твердий розчин на основі α -Fe [12].

Установлено, що незалежно від фазового складу плівкових матеріалів при загальній товщині зразків 20-150 нм при величині вимірювального струму 10 і 100 мкА від плівок спостерігається нестабільний електричний сигнал несиметричної форми з невизначеним нульовим максимумом. При переході до струму вимірювання 1 мА сигнал згладжується, зменшується електронний шум. Результати вимірювань вказують на те, що найбільш ефективним для усіх плівкових зразків є величина вимірювального струму 10 мА, при якому сигнал стає симетричним і стабільним.

Зміну форми залежності МО від індукції магнітного поля при зміні величини вимірювального струму в наноматеріалах з феромагнітними шарами можна пояснити, по-перше, збільшенням кількості носіїв струму, які інжектуються в об'єм зразка, і забезпечують більший кут повороту магнітних доменів при зміні магнітного поля насичення за рахунок ефекту передачі моменту обертання спін-поляризованими носіями [2], по-друге, нагрівом плівкового матеріалу (Рис. 4). Подібні результати були отримані і в роботі [13].

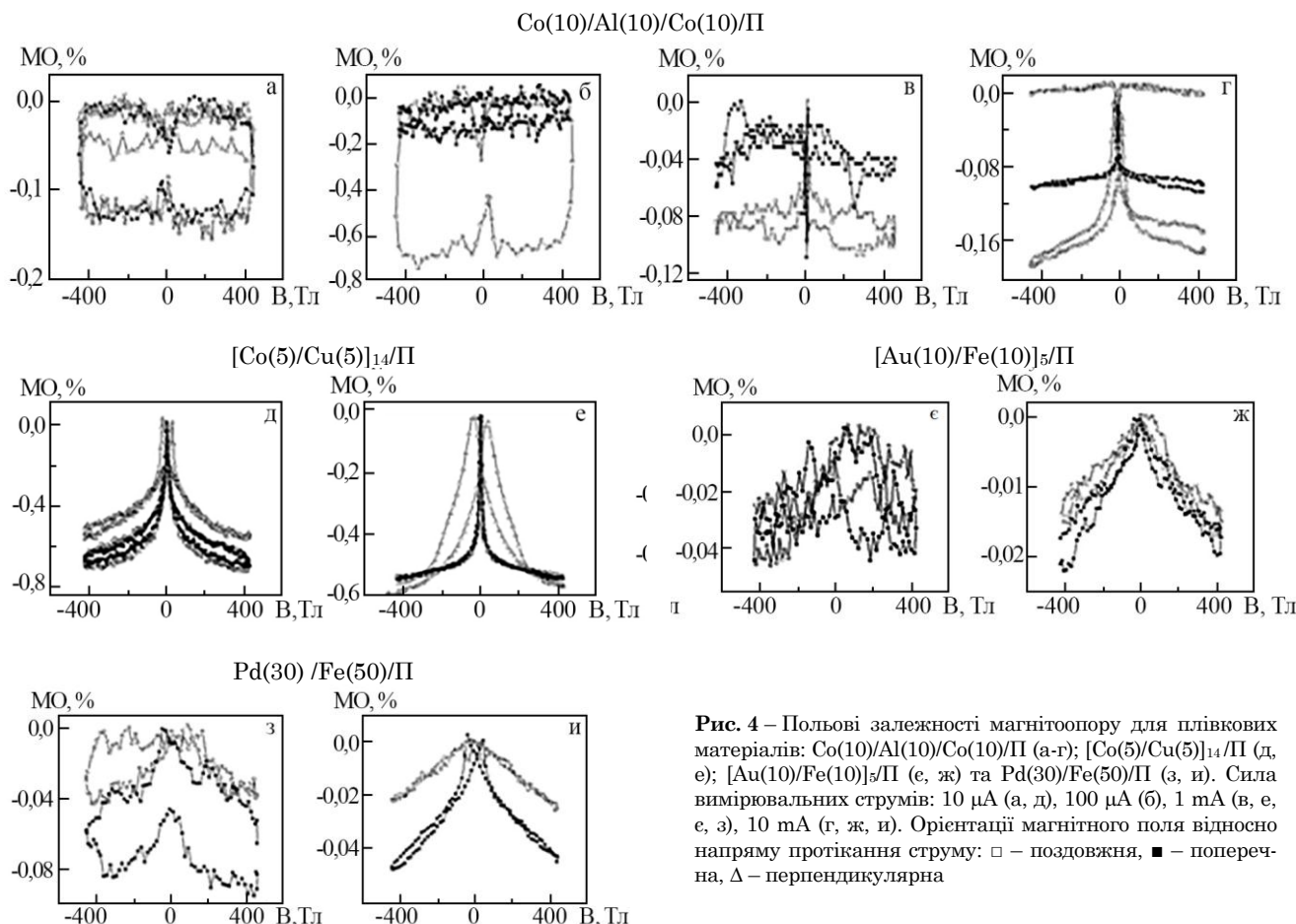


Рис. 4 – Польові залежності магнітоопору для плівкових матеріалів: Co(10)/Al(10)/Co(10)/П (а-г); [Co(5)/Cu(5)]₁₄/П (д, е); [Au(10)/Fe(10)]₅/П (е, ж) та Pd(30)/Fe(50)/П (з, и). Сила вимірювальних струмів: 10 μА (а, д), 100 μА (б), 1 мА (в, е, з), 10 мА (г, ж, и). Орієнтації магнітного поля відносно напрямку протікання струму: □ – поздовжня, ■ – поперечна, Δ – перпендикулярна

4. ВИСНОВКИ

1. Основною проблемою при розробці ГМО-датчиків та фіксації їх робочих характеристик з використанням автоматизованих систем залишається обмеження сигналу шумами в області слабких магнітних полів. Одним із шляхів вирішення цієї про-

блеми і засобом мінімізації електронних шумів є варіювання величини вимірювального струму.

2. У роботі запропоновані електрична схема і програмне забезпечення електронного блока для варіювання величини вимірювального струму та мінімізації електронних шумів в автоматизованому лабораторному комплексі для вимірювання МО нанорозмір-

них плівкових матеріалів.

3. Проведене дослідження магніторезистивних властивостей нанорозмірних плівок на основі Co та Al або Cu, Fe та Pd або Au різного фазового складу із загальною товщиною від 20 до 150 нм при різних струмах вимірювання.

4. Установлено, що незалежно від фазового складу плівкових матеріалів при величині вимірювального струму 10 і 100 мкА від плівок спостерігається нестабільний електричний сигнал несиметричної форми з невизначеним нульовим максимумом. При переході

до струму вимірювання 1 мА сигнал згладжується, зменшується електронний шум, а при вимірювальному струмі 10 мА відбувається стабілізація сигналу.

5. Зміну форми залежності МО від індукції магнітного поля при зміні величини вимірювального струму в плівкових матеріалах з феромагнітними шарами можна пояснити, збільшенням кількості носіїв струму, які інjektуються в об'єм зразка, і забезпечують більший кут повороту магнітних доменів при зміні магнітного поля насичення, та нагрівом плівкового матеріалу в результаті протікання струму.

Робота виконана в рамках держбюджетної тематики МОН України №0115U000689 (2015- 2017 рр.).

Магніторезистивные свойства наноразмерных материалов: варьирование измерительных токов и минимизация электронных шумов

С.А. Волков, Е.П. Ткач, Л.В. Однедворець, Я.В. Хижня

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

Разработаны схема и программное обеспечение электронного блока для варьирования величины измерительного тока и минимизации электронных шумов в автоматизированном лабораторном комплексе для измерения магнитосопротивления наноразмерных пленочных материалов. Проведено исследование магніторезистивных свойств пленок на основе Co и Al или Cu, Fe и Pd или Au разного фазового состава с общей толщиной от 20 до 150 нм при различных токах измерения. Установлено, что независимо от фазового состава пленочных материалов при величине измерительного тока 10 и 100 мкА от пленок наблюдается нестабильный электрический сигнал несимметричной формы с неопределенным нулевым максимумом. Наиболее эффективным для всех пленочных образцов является величина измерительного тока 10 мА, при котором сигнал становится симметричным и стабильным.

Ключевые слова: Наноразмерные пленочные материалы, Магніторезистивные свойства, Четырехточечная схема измерения, Измерительный ток, Стабилизация электрического сигнала.

Magnetoresistive Properties of Nanodimensional Materials: Variation Measuring Currents and to Minimize Electronic Noise

S.O. Volkov, O.P. Tkach, L.V. Odnodvoretz, Yu.V. Khyzhnya

Sumy State University, 2, Rymyskogo-Korsakova st., 40007 Sumy, Ukraine

The circuit and software of the electronic block for varying the magnitude of the measuring current and minimization of electronic noise in the automated laboratory complex for measuring of the magnetoresistance in nanodimensional film materials have been designed. Investigation of the magnetoresistive properties of films based on Co and Al or Cu, Fe, and Pd or Au different phase structure with a total thickness of 20 to 150 nm at different measuring currents were performed. It was established that irrespective of the phase composition of the film materials at the value of the measuring current of 100 mA and 10 from films of unstable electrical signal asymmetric shape with a maximum zero uncertain is observed. The most effective for all film samples is measuring current 10 mA, at which the signal becomes a symmetrical and stable.

Keywords: Nanodimensional film materials, Magnetoresistive properties, Four-measuring circuit, Measuring the current, Stabilization of the electrical signal.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. S.A. Nepijko, D. Kutnyakhov, L.V. Odnodvoretz, S.I. Protsenko, *J.Nanopart. Res.* **13**, 12, 6263 (2011).
2. S. Mangin, D.Ravelosona, J.A. Katine, M.J. Carey, B.D. Terris, E.E. Fullerton, *Nat. Mater.* **5**, 210 (2006).
3. L. Berger, *Phys. Rev. B* **54**, 9353 (1996).
4. J.C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.* **159**, L1 (1996)
5. X. Waintal, E.B. Myers, P.W. Brouwer, D.C. Ralph, *Phys. Rev. B* **62**, 12317 (2000).
6. M.D. Stiles, A. Zangwill, *Phys. Rev. B* **66**, 014407 (2002).
7. M.H. Demydenko, S.I. Protsenko, D.M. Kostyuk, I.V. Cheshko, *J. Nano- Electron. Phys.* **3** No 4, 81 (2011).
8. V. Vovk, G. Schmitz, R. Kirchheim, *Microelectron. Eng.* **70**, 533 (2003).
9. I.V. Cheshko, I.Yu. Protsenko, *Metalofiz. Nov. Technol.* **31** No 7, 963 (2009).
10. M. Marszalek, A. Polit, V. Tokman, Y. Zabala, I. Protsenko, *Surf. Sci.* **601**, 4454 (2007).
11. O.V. Synashenko, O.P. Tkach, I.P. Buryk, L.V. Odnodvoretz, S.I. Protsenko, N.I. Shumakova, *Problems Atomic Sci. Technol.* **7** 3, 169 (2009).
12. O.V. Pylypenko, L.V. Odnodvoretz, M.O. Shumakova, I.Yu. Protsenko, *Problems Atomic Sci. Technol.*, 3 (105) (2016) - accepted for publication.
13. I.Yu. Protsenko, P.K. Mehta, L.V. Odnodvoretz, C.J. Panchal, K.V. Tyschenko, Yu.M. Shabelnyk, N.I. Shumakova, *J. Nano- Electron. Phys.* **6** No 1, 01031 (2014).