

INNOVATIVE DEVELOPMENT OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND EDUCATION

Proceedings of IX International Scientific and Practical Conference
Vancouver, Canada
6-8 June 2024

Vancouver, Canada

2024

38. *Магоцький О. І., Василюк А. С.* 200
ПРОЄКТ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З НАДСИЛАННЯ
ПЕРСОНАЛІЗОВАНИХ РЕКЛАМНИХ СПОВІЩЕНЬ
39. *Матвієнко А. І., Малініч І. П.* 204
СИМУЛЯЦІЯ ЛОНГБОРДИНГУ У КОМП'ЮТЕРНИХ ІГРАХ
40. *Медяник В. Ю., Пойманов С. М.* 207
ГЕОПРОЄКТУВАННЯ ТА МОНИТОРИНГ ЗА БЕЗПЕЧНИМ
ВИКОНАННЯМ РОБІТ З ВИКОРИСТАННЯМ 3-D ЛІДАР
СКАНЕРІВ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ РОДОВИЩ КОРИСНИХ
КОПАЛИН ПІДЗЕМНИМ СПОСОБОМ
41. *Савчук Т. О., Тарасюк М. Б.* 213
УДОСКОНАЛЕНИЙ АЛГОРИТМ СОРТУВАННЯ
ОДНОВИМІРНИХ ЦІЛОЧИСЕЛЬНИХ МАСИВІВ
42. *Сиротинська В. В.* 218
ПОБУДОВА РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ
43. *Сющук І. О.* 224
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ЗА
ДОПОМОГОЮ ЧАТ-БОТІВ: СТРАТЕГІЇ ТА ПЕРЕВАГИ
44. *Хачатурян К. К., Гегія Н. А., Макадзе М. В., Энукидзе Л. Т.* 232
МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ
МАРТВИЛЬСКОЙ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ
45. *Яновський П. О., Кульбашевський В. А., Горбань Р. О.,
Вернигора А. І.* 241
ВИКОРИСТАННЯ РОЗСУВНИХ КОЛІСНИХ ПАР ПРИ
ПЕРЕТИНІ ЗАЛІЗНИЦЕЮ МІЖДЕРЖАВНИХ КОРДОНІВ У
СВІТІ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

46. *Кондратенко П. О.* 250
ДИФЕРЕНЦІАЛЬНЕ ОБЕРТАННЯ СОНЦЯ
47. *Кравченко В. О., Кравченко Ю. А.* 260
ЕФЕКТ ГІГАНТСЬКОГО МАГНІТООПОРУ У СПІН-
ВЕНТИЛЬНИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ СИСТЕМАХ
48. *Мусій Р. С., Клапчук М. І., Пелех Р. Я.* 268
РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ У ПЛИТІ ЗА
НАЯВНОСТІ НЕСТАЦІОНАРНИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛА

GEOGRAPHICAL SCIENCES

49. *Korzhov Ye. I.* 274
PECULIARITIES OF THE THERMAL REGIME FORMATION OF
THE TYLIGUL ESTUARY IN THE SPRING-SUMMER PERIOD

**ЕФЕКТ ГІГАНТСЬКОГО МАГНІТООПОРУ У СПІН-ВЕНТИЛЬНИХ
НЕСИМЕТРИЧНИХ СИСТЕМАХ**

Кравченко Володимир Олексійович

к.ф.-м.н., ст. викладач

Сумський національний аграрний університет,

м. Суми, Україна

Кравченко Юлія Анатоліївна

к.ф.-м.н., ст. викладач

Сумський державний університет,

м. Суми, Україна

Анотація. В роботі представлені результати експериментальних досліджень магніторезистивного ефекту в тришарових несиметричних структурах з немагнітним розділяючим шаром. Показано, що при значній товщині немагнітного шару в зразках спостерігається ефект гігантського магнітоопору, що свідчить про утворення системи без обмінного зв'язку між феромагнітними шарами. В процесі термообробки відбувається перехід до анізотропного магніторезистивного ефекту, що, очевидно, пояснюється руйнуванням за рахунок процесів високотемпературної дифузії немагнітного шару.

Ключові слова: магнітні датчики, ефект гігантського магнітоопору, анізотропний магніторезистивний ефект.

З розвитком технічних засобів автоматики та автоматизації датчики є одним з основних елементів ланцюжка «датчик – пристрій керування – виконавчий пристрій – керований об'єкт». Магнітні датчики знайшли широке застосування в банкоматах, детекторах валют, апаратах для зчитування даних магнітної смуги на карті, магнітних сканерах, комп'ютерах, стільникових телефонах. У машинобудуванні та автомобілебудуванні вони використовуються для визначення швидкості, положення обертового вала

електродвигуна, зміни лінійного і кутового положення. Використання магнітних датчиків в електроенергетиці пов'язане з задачами визначення струмів та вимірюванням магнітних полів.

Принцип дії магнітних датчиків базується на магніторезистивному ефекті та ефекті Холла. Магніторезистивний ефект (магнітоопір) в загальному випадку – це зміна електричного опору матеріалу, що викликається магнітним полем. Магніторезистивний ефект буває кількох видів, і кожен з них має різну природу. При конструюванні датчиків найчастіше застосовуються анізотропний магніторезистивний ефект (AMR), ефекти гігантського (GMR) та тунельного (TMR) магнітоопору. В роботі представлені результати дослідження магніторезистивного ефекту в несиметричних тришарових структурах, які можуть використовуватися в якості матеріалів для створення магнітних датчиків.

Ефект гігантського магнітоопору, виявлений у магнітних багат шарових структурах, відрізняється за своєю величиною та природою від класичного магніторезистивного ефекту. Величина магнітоопору в магнітних мультишарах більш ніж на порядок перевищує величину магнітоопору у масивних феромагнітних матеріалах. Крім того, ефект гігантського магнітоопору не залежить від відносної орієнтації магнітного поля і струму, визначаючись відносною орієнтацією намагніченостей у сусідніх феромагнітних шарах. Для досліджень було обрано систему, в якій феромагнітні шари виконані на основі сплавів CoNi, FeNi розділених відносно товстими немагнітними прошарками ($d_N = 3-15$ нм) благородних металів Ag і Cu.

Отримання магнітних тришарових структур, у яких спостерігається антиферомагнітна взаємодія (або антипаралельна конфігурація (AP)) між феромагнітними шарами через немагнітний прошарок, у результаті якої магнітні моменти в сусідніх феромагнітних шарах орієнтуються антипаралельно [1], стало першим кроком до відкриття ГМО. Але наявність антиферомагнітного зв'язку не є необхідною умовою отримання ефекту ГМО.

Антипаралельна конфігурація намагніченостей сусідніх феромагнітних шарів може досягатися і тоді, коли в якості феромагнітних шарів використовуються два феромагнетики з різною величиною коерцитивної сили [2]. Сам термін “спін – вентиль” означає, що магнітне поле керує переходом електронів з певною орієнтацією спінів стосовно вектора локальної намагніченості магнітного шару через межу поділу шарів, тобто тим самим створюється магнітний затор. Для отримання таких структур необхідно, щоб шари металу перемагнічувалися у різних магнітних полях, тобто мали б різну коерцитивну силу. У таких системах під дією зовнішнього магнітного поля, величину якого підбирають проміжною між двома значеннями коерцитивної сили, відбувається перехід зразка від антипаралельної до паралельної конфігурації. Перевагою таких систем є відносно малі значення поля насичення H_s , при яких спостерігається ефект GMR ($H_s \sim 4-40$ кА/м), що дуже важливо для практичного використання ефекту в магніторезистивних зчитуючих головках та магнітних сенсорах. У нашому випадку така ситуація реалізується в асиметричній тришаровій структурі CoNi/Ag(Cu)/FeNi.

Характерною особливістю магнітовпорядкованих речовин зі спонтанною намагніченістю є наявність для них кривої намагнічування та петлі гістерезису. У зв'язку з цим у всіх досліджуваних зразках на основі феромагнітних сплавів ($d_F = 10-50$ нм) спостерігається гістерезис МО при циклічній зміні магнітного поля $H_{max} \rightarrow 0 \rightarrow (-H_{max}) \rightarrow 0 \rightarrow H_{max}$. Основними причинами магнітного і магніторезистивного гістерезису є необоротний зсув доменних стінок, необоротне обертання спонтанної намагніченості та затримка утворення і росту зародків перемагнічування.

Для всіх досліджуваних зразків CoNi/Ag(Cu)/FeNi з товщиною немагнітного шару до 2 нм спостерігається позитивний повздовжній магніторезистивний ефект (опір збільшується при прикладенні зовнішнього магнітного поля), що є ознакою звичайного анізотропного магнітоопору, властивого однорідним феромагнітним матеріалам.

Причиною анізотропного магнітоопору (AMR) є взаємодія електронів провідності із зовнішніми електронами атома, спінові моменти яких спричиняють спонтанну намагніченість. Слід зазначити, що величина МО для невідпалених плівок CoNi, FeNi та CoNi/Ag(Cu)/FeNi з AMR становить дуже малу величину і при кімнатній температурі не перевищує 0,15%. Це пояснюється тим, що при малій товщині немагнітного прошарку у тришарових плівках існує пряма обмінна взаємодія між магнітними шарами через феромагнітні містки в немагнітному прошарку. Таку плівку можна розглядати як двошарову плівку товщиною $2d_F$ із включенням острівців срібла чи міді між феромагнітними шарами. Гігантський магнітоопір у таких плівках нами не був виявлений.

Для невідпалених тришарових плівок з товщиною прошарку $d_{Ag} = 3-15$ нм спостерігається тільки зменшення електричного опору незалежно від напрямку прикладеного магнітного поля, струму й орієнтації зразка (відсутність анізотропії МО). Знак “-” показує, що електричний опір зменшується при внесенні розмагніченого зразка у магнітне поле.

Цей факт є характерною ознакою GMR. На рис. 1 в якості ілюстрації представлені залежності повздовжнього та поперечного магнітоопору від напруженості зовнішнього магнітного поля для тришарової системи CoNi/Ag/FeNi з $d_F = 30$ нм і $d_{Ag} = 5$ нм, отримані при різних температурах.

Як видно з рисунка, характерною ознакою для всіх залежностей $(\Delta R/R_0)(H)$ є різка зміна магнітоопору в інтервалі полів $-20 - +20$ Ое і явна тенденція до насичення в більш сильних полях.

Отже, відносно слабке магнітне поле переводить систему від антиферомагнітного впорядкування до феромагнітного, що й викликає зменшення опору провідника, тобто реалізується GMR-ефект. Джерелом гігантського магнітоопору є механізм неоднакового розсіювання двох груп електронів зі спінами, що відрізняються орієнтацією, по відношенню до напрямку намагніченості розсіюючої електрони магнітної структури.

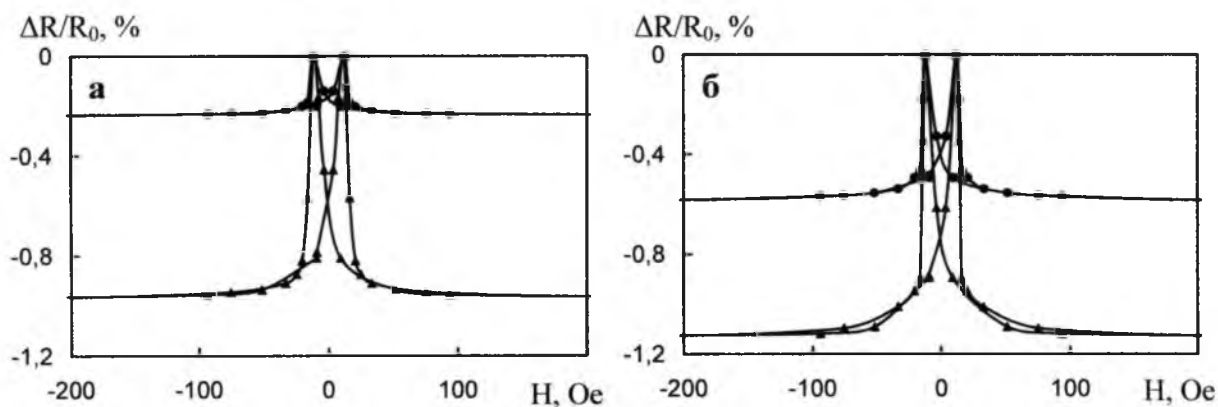


Рис. 1. Залежність повздовжнього (●●●) та поперечного (▲▲▲) магнітоопору від напруженості зовнішнього магнітного поля для невідпаленої тришарової структури CoNi/Ag/FeNi ($d_{\text{CoNi}} = 40$ нм, $d_{\text{Ag}} = 7$ нм, $d_{\text{FeNi}} = 40$ нм): а – температура вимірювання 300 К; б – температура вимірювання 150 К

У роботі, в якій вперше описаний ефект GMR [3], була висунута гіпотеза, згідно з якою він обумовлений спін-залежним розсіянням носіїв заряду на інтерфейсах багатошарової плівки [3] та в об'ємі шарів металу [4].

Факт виникнення GMR несе певну інформацію про параметри гетерогенної системи. Зокрема, характерний розмір магнітних елементів, відповідальних за ГМО, і середня відстань між ними не повинні значно перевищувати довжину вільного пробігу електронів провідності. У нашому випадку такими елементами є магнітні шари, розділені досить товстим немагнітним прошарком, який суттєво послаблює обмінний зв'язок між магнітними шарами. Також, при товщині шару срібла $d_{\text{Ag}} > 3$ нм проміжний шар стає структурно-суцільним і феромагнітні шари вже не зв'язуються прямою взаємодією. Величина GMR, за яку приймалася відносна різниця між максимальним і мінімальним значеннями опору за цикл перемагнічування у полі з максимальною напруженістю 1,5 кЕ, при цьому досягає 1% при кімнатній температурі.

При подальшому збільшенні товщини срібного прошарку ($d_{\text{Ag}} = 5-15$ нм) зберігається ізотропність польових залежностей, але величина ГМО

зменшується ($(\Delta R/R_0)_{\max} < 0,5\%$).

При охолодженні зразків до 150 К (рис. 1б) вид петель гістерезису магніторезистивного ефекту практично не змінюється (незалежно від товщини шарів). Спостерігається тільки збільшення ефекту і незначний зсув піків на залежності $(\Delta R/R_0)(H)$ в область більш сильних полів та зростання амплітуди ефекту. Зменшення амплітуди ефекту при підвищенні температури пов'язане з розсіянням електронів на фонах (особливо в немагнітному прошарку), що приводить до зменшення ролі процесів спін-залежного розсіювання, які і формують амплітуду ефекту, а також перешкоджає проходженню електронів з одного феромагнітного шару в інший [5].

Особливістю МО невідпалених зразків з мідним прошарком (рис. 2) є наявність лише поперечного магніторезистивного ефекту.

Відсутність повздовжнього ефекту, на нашу думку, пов'язане з появою незначного спін-залежного розсіювання носіїв заряду. Але про реалізацію ефекту гігантського магнітоопору в даних тришарових плівках говорити важко, бо характерною ознакою GMR є ізотропність польових залежностей.

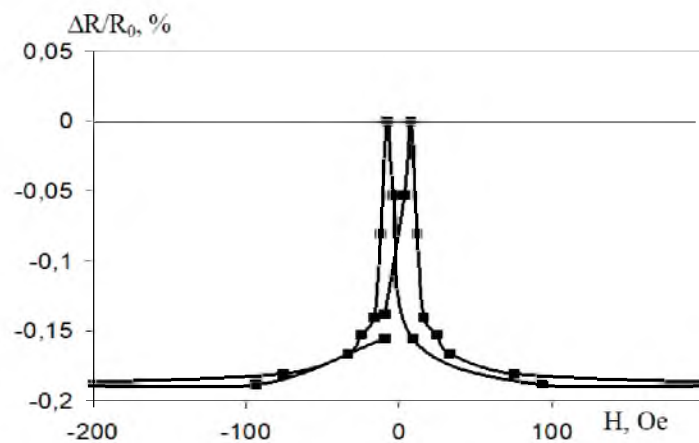


Рис. 2. Залежність поперечного магнітоопору від напруженості зовнішнього магнітного поля для невідпаленої тришарової структури CoNi/Cu/FeNi

Ефективним засобом впливу на мікроструктуру та властивості мультишарових структур є термічна обробка. У наших дослідженнях вона полягала у поетапному вакуумному відпалюванні при різних температурах

$T_{\text{відп}}$. Тривалість термообробки при кожній температурі становила 30 хв. При відпалюванні плівок при температурі 550 К спостерігається поява повздовжнього (до 0,08-0,1%) та поперечного (до 0,3-0,4%) магнітоопору. Піки польових залежностей зміщуються в область більш сильних полів.

Відпалювання при 700 К приводить до подальшого зростання анізотропного магнітоопору (рис. 3а). На нашу думку, причиною збільшення величини магнітоопору при високотемпературному відпалюванні ($T_{\text{відп}} = 550 \text{ К}$, $T_{\text{відп}} = 700 \text{ К}$) є збільшення розмірів кристалітів та взаємна дифузія атомів в сусідні шари.

Зі зниженням температури до 150 К величина анізотропного магнітоопору також зростає в 1,2 – 1,3 рази, а піки польових залежностей зміщуються в область більш сильних полів (рис. 3б).

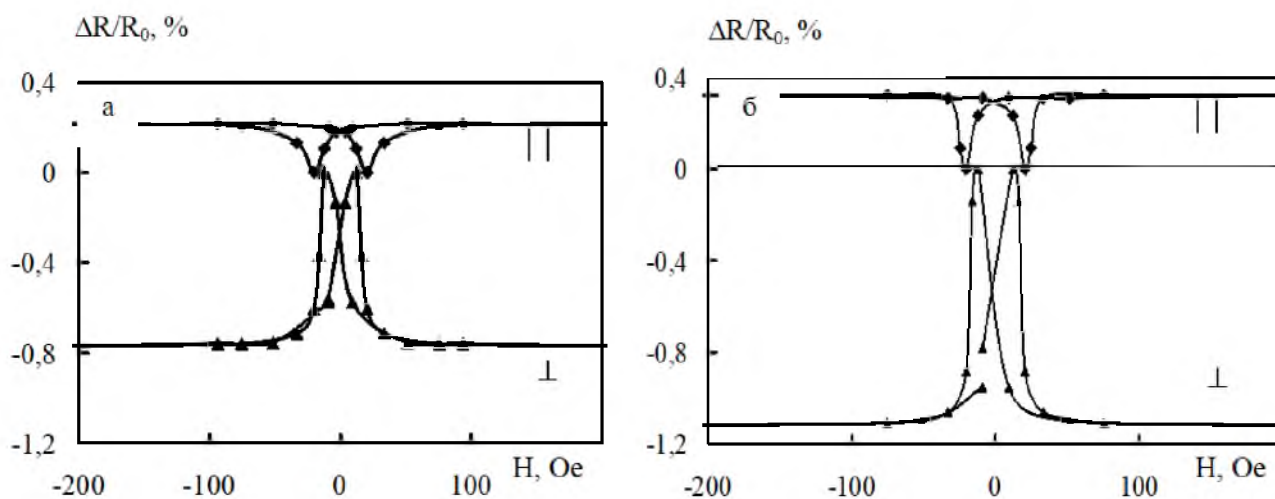


Рис. 3. Залежність повздовжнього (||) та поперечного (⊥) магнітоопору від напруженості зовнішнього магнітного поля для відпаленої при температурі 700 К тришарової структури CoNi/Cu/FeNi:

а – температура вимірювання 300 К; б – температура вимірювання 150 К

Отже, виходячи з отриманих результатів, основною перевагою несиметричних систем є досить малі поля насичення ($H_s \sim 50 \text{ Oe}$), при яких проявляється ефект ГМО, що важливо при практичному використанні магніторезистивних елементів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Layered magnetic structures: interlayer exchange coupling and giant magnetoresistance / A. Fert, P. Grunberg, A. Barthelemy et al. // J. Magn. and Magn. Mater. – 1995. – V. 140-144, № 1. – P. 1-8.
2. L. Kond, Q. Pan, B Cui et al. Magnetotransport and domain structures in nanoscale NiFe/Cu/Co spin valve // J. Appl. Phys., – 1999, – V. 85, № 8, – P. 5492-5494.
3. Interpretation of the giant magnetoresistance effect in Co/Cu(100) multilayers with the quantum model of giant magnetoresistance / S.K.J. Lenzowski, M.A.M. Gijs, J.B. Giesbers et al. // Phys. Rev. B. – 1994. – V. 50, № 14. – P. 9982-9988.
4. Giant magnetoresistance of $(001)Fe/(001)Cr$ magnetic superlattices / M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert et al. // Phys. Rev. Lett. – 1988. – V. 61, № 21. – P.2472 – 2475.
5. Dieny B. Giant magnetoresistance in spin – valve multilayers // J. Magn. Mater. – 1994. – V. 136. – P. 335 – 359.