Журнал нано- та електронної фізики
Том 10 № 3, 03016(8cc) (2018)

Journal of Nano- and Electronic Physics
Vol. 10 No 3, 03016(8pp) (2018)

Ефекти гігантського і анізотропного магнітоопору: демонстрація і вивчення в курсі фізики закладів вищої освіти

В.Б. Лобода[1,*], Ю.О. Шкурдода[2], М.Я. Довжик[1], В.О. Кравченко[1], С.М. Хурсенко[1]

[1] *Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, 40021 Суми, Україна*
[2] *Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна*

(Одержано 02.03.2018, у відредагованій формі – 14.06.2018, опубліковано online 25.06.2018)

Стаття присвячена розгляду методичних аспектів формування у студентів знань про ефекти гігантського (ГМО) і анізотропного (АМО) магнітоопору як базових фізичних ефектів, на основі яких розроблені високоефективні інформаційні та сенсорні прилади наноелектроніки і спінтроніки. Запропонована методика демонстрації магніторезистивного ефекту в плівкових зразках у CIP-геометрії при кімнатній температурі. Використання двох плівкових зразків (одношарова плівка Co і тришарова плівка Co/Cu/Co) однакових геометричних розмірів дає можливість одночасно продемонструвати типовий анізотропний (одношарова плівка) і гігантський (тришарова плівка) магнітоопір при кімнатній температурі з використанням простої лабораторної установки.

Ключові слова: Нанорозмірна металева плівка, Анізотропний магнітоопір, Гігантський магнітоопір, Демонстрація.

DOI: 10.21272/jnep.10(3).03016 PACS numbers: 75.70._i, 75.47.De, 85.75.Bb

1. ВСТУП

Ефект гігантського магнітоопору (ГМО) – гальваномагнітний квантово-механічний ефект, що спостерігається в спеціально штучно створених об'єктах (структурах), у тому числі і багатошарових плівкових системах (надрешітках) на основі магнітних і немагнітних електропровідних шарів нанометрової товщини, що чергуються. За його відкриття французькому фізику А. Ферту та німецькому фізику П. Грюнбергу була присуджена Нобелівська премія з фізики за 2007 рік. Ефект проявляється в тому, що електричний опір таких об'єктів при внесенні їх у магнітне поле (магнітоопір) суттєво змінюється (відносна зміна величини електричного опору становить одиниці-десятки і навіть сотні відсотків) залежно від матеріалів шарів, їх кількості та температури. Оскільки це на декілька порядків більше за величину магнітоопору масивних природних провідників, то ефект отримав назву ефекту гігантського магнітоопору.

Відкриття ефекту ГМО стало початком розвитку нового науково-технічного напрямку – спінтроніки, який забезпечує створення високоефективних електронних елементів (спінові транзистори, твердотільні акумулятори без хімічних реакцій, мініатюрні сенсорні датчики тощо) та високоефективних елементів комп'ютерної пам'яті.

Мета роботи полягала у знайомстві широкого кола викладачів ЗВО з можливістю демонстрації і вивчення ефекту ГМО в курсах фізики, електроніки, магнітоелектроніки, спінтроніки і т.п. У роботі вперше пропонується за допомогою відносно простого обладнання і тришарових плівок Co/Cu/Co демонстрація ефекту ГМО. Треба зазначити, що відома німецька фірма PHYWE, яка спеціалізується на виготовленні сучасного обладнання для шкіл і університетів адаптувала вже біля 50 Нобелівських експериментів з фізики для університетських демонстрацій.

2. ГАЛЬВАНОМАГНІТНІ ЯВИЩА В МАСИВНИХ ПРОВІДНИКАХ

При плануванні і розробці змісту курсу фізики доцільно і ефективно включити питання щодо гігантського магніторезистивного ефекту в структуру курсу.

Під гальваномагнітними ефектами розуміють сукупність ефектів, які виникають у твердих провідниках під дією магнітного поля, під час протікання в них електричного струму. Ці явища можна вважати не тільки магнітними, а й електричними. Далі розглядатимемо лише ті гальваномагнітні явища, які виникають у відносно слабких магнітних полях (такими будемо вважати поля з індукцією $B < 1$ Тл). Дія сильних магнітних полів ($B > 10$ Тл) проявляється зовсім по-іншому. Найважливішими (з огляду їх практичного використання) гальваномагнітними ефектами у таких магнітних полях, є ефект Холла та ефект магнітоопору (МО).

Ефектом Холла називається явище виникнення різниці потенціалів на торцях провідника, розміщеного в зовнішньому магнітному полі, при пропусканні через нього електричного струму. Найчастіше цей ефект використовується для створення датчиків для вимірювання індукції магнітних полів (датчиків Холла).

Ефектом магнітоопору (магніторезистивним ефектом) називається явище зміни електричного опору провідника при внесенні його в зовнішнє магнітне поле. Залежно від взаємної орієнтації трьох векторів $\vec{B}$ (вектор індукції зовнішнього магнітного поля), $\vec{j}$ (вектор густини електричного струму, що протікає через провідник) та $\vec{n}$ (вектор нормалі до площини провідника (провідник при цьому береться в формі смужки прямокутного перерізу)) говорять про повздовжній МО, поперечний МО і перпендикулярний МО. Для масивних провідників поперечний і перпендикулярний МО часто не розрізняють. Взаємна орієнтація векторів $\vec{B}$, $\vec{j}$ та $\vec{n}$ при вимірюванні МО зображена на рис. 1.

* loboda-v@i.ua

 © 2018 Сумський державний університет

РИСО

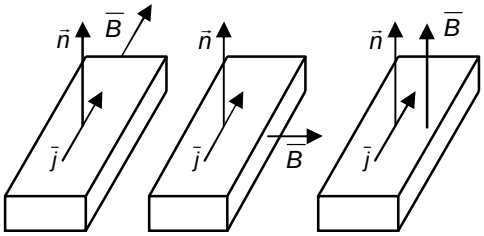

Рис. 1 – Взаємна орієнтація векторів $\vec{B}$, $\vec{j}$ та $\vec{n}$ при геометріях вимірювання: повздовжній МО (а), поперечній (б) та перпендикулярній (в)

Мірою впливу магнітного поля на електричний опір провідника (мірою ефекту МО) є відносна зміна електричного опору провідника в магнітному полі – відношення $\delta = \Delta R/R_0$, де $\Delta R = R_B - R_0$ (R_B – електричний опір провідника в магнітному полі, R_0 – електричний опір провідника за відсутності магнітного поля).

Відповідно до рис.1:

– повздовжня геометрія вимірювання МО:

$$\delta_{\parallel} = \frac{\Delta R_{\parallel}}{R_0} = \frac{R_{\parallel} - R_0}{R_0}, \qquad (1)$$

де $R_{\parallel}$ – електричний опір провідника при повздовжній геометрії вимірювань (рис. 1а);

– поперечна геометрія вимірювання МО:

$$\delta_{+} = \frac{\Delta R_{+}}{R_0} = \frac{R_{+} - R_0}{R_0}, \qquad (2)$$

де R_+ – електричний опір провідника при поперечній геометрії вимірювань (рис. 1б).

У слабких полях ($B < 1$ Тл) за кімнатних температур магніторезистивний ефект $\delta = \Delta R/R_0$ для немагнітних металів дуже малий і становить, наприклад, для міді $\delta\delta \approx 10^{-4}$. Винятком є вісмут, у якого $\delta \approx 2$. Для напівпровідників магніторезистивний ефект є значно більшим, ніж для типових металів, і становить $\delta \approx 10^{-2}$-10. Для немагнітних металів спостерігається позитивний магніторезистивний ефект (їх електричний опір збільшується зі збільшенням індукції магнітного поля), для магнітних металів спостерігається негативний магніторезистивний ефект (їх електричний опір зменшується зі збільшенням індукції магнітного поля). Для типових магнітних металів магніторезистивний ефект також має невелике значення. Наприклад, для заліза за кімнатної температури величина ефекту становить $\delta \approx 0{,}002$, для нікелю $\delta \approx 0{,}02$, а для пермалоїв (широко використовуваних в техніці магнітних сплавів нікелю і заліза) $\delta \approx 0{,}03$-$0{,}04$, залежно від їх складу.

Для зручності величину магніторезистивного ефекту часто виражають у процентах: $\delta = \Delta R/R_0 \times 100\%$.

Для більшості металів повздовжній і поперечний магнітоопір мають різні значення (не співпадають), тобто спостерігається анізотропія магнітоопору (АМО). Найбільш яскраво АМО проявляється у феромагнетиків (залізо, кобальт, нікель та їх сплави). Для провідників з феромагнітних металів величина АМО становить 0,1-1%. У кобальту повздовжній МО ($\Delta R_{\parallel}/R_0$) і поперечний МО ($\Delta R_{\perp}/R_0$) не тільки різні за величиною, а ще й мають різні знаки (рис. 8а).

Експериментально вперше АМО відкрив В. Томсон ще у 1857 році, але механізм цього ефекту вдалося пояснити лише в рамках квантової механіки в середині 20-го ст. Пояснення базується на припущенні, що коефіцієнти розсіяння електронів провідності на дефектах (у тім числі і на легуючих домішкових атомах) і коливаннях кристалічної решітки є різними і залежать від орієнтації їх електронних спінів. Теоретична модель, що описує вплив спіна електрона на його рух у феромагнітних металах, була вперше запропонована Моттом (див. список літератури в [1]). У рамках цієї моделі електропровідність феромагнетика у зовнішньому магнітному полі представляється рухом електронів по двох паралельно з'єднаних (в найпростішому випадку незалежних) „спінових" каналах: один для електронів з умовними напрямами спінів „угору" (середня довжина вільного пробігу $\lambda_{\uparrow}$), другий – для електронів з протилежною орієнтацією спінів (з умовними напрямами спінів „униз" і середньою довжиною вільного пробігу $\lambda_{\downarrow}$). Залежно від співвідношення між величинами середніх довжин вільного пробігу $\lambda_{\uparrow}$ і $\lambda_{\downarrow}$ буде спостерігатися і різна повна провідність (різний електричний опір) паралельного з'єднання „спінових" каналів.

Гальваномагнітні явища у феромагнетиках (масивні зразки Fe, Co, Ni та їх сплави) в 20-му ст. були предметом класичних експериментальних досліджень багатьох відомих учених та їх наукових шкіл, тоді ж були проведені і вимірювання величин магнітоопору масивних зразків металів, наведених вище.

Наприкінці 60-х років експериментальними дослідженнями магнітоопору масивних сплавів на основі феромагнітних металів займалась група французьких дослідників, у складі якої розпочав свою наукову діяльність і А. Ферт. Вимірюючи магнітоопір трикомпонентних сплавів на основі нікелю, легованого двома типами домішок ($Co_{1-x} + Rh_x$) та ($Au_{1-x} + Co_x$), він встановив, що для сплаву „першого типу" Ni:Co, Rh) спостерігається збільшення електричного опору при зростанні індукції зовнішнього магнітного поля, а для сплаву „другого типу" Ni(Au + Co) спостерігається зменшення електричного опору при зростанні індукції зовнішнього магнітного поля [1]. А. Ферт пояснив цей факт у рамках моделі Мотта наступним чином. У сплаві „першого типу" (з домішками A – (Co + Rh)) електрони провідності обох спінових каналів зазнають значного розсіювання як на кобальті, так і на родії, отже при зростанні індукції зовнішнього магнітного поля спостерігається значний ріст величини електричного опору обох каналів (і, відповідно, трикомпонентного сплаву). У сплаві „другого типу" (з домішками B – (Au + Co)) електрони провідності розсіюються на золоті і кобальті по різному, так що їх значне розсіяння відбувається лише в одному спіновому каналі (через другий вони проходять майже вільно), при цьому при зростанні індукції зовнішнього магнітного поля не відбувається значного росту електричного опору трикомпонентного сплаву.

3. ЕФЕКТ ГІГАНТСЬКОГО МАГНІТООПОРУ

Можна сказати, що експериментальні результати,

Proof Only

одержані А. Фертом, вже у його ранніх роботах (див. список літератури в [1]) певною мірою передбачали відкриття ГМО. В основі ідеї ГМО лежить ідея заміни домішок A і B трикомпонентного сплаву на шари A і B у багатошарових плівках. При цьому антипаралельній магнітній конфігурації шарів A і B відповідає ситуація зі сплавом „першого типу", а паралельній магнітній конфігурації шарів A і B відповідає ситуація зі сплавом „другого типу". Основні труднощі експериментальної реалізації таких багатошарових плівок полягали у створенні технологій отримання окремих магнітних шарів, оскільки їх товщини повинні були бути меншими середньої довжини вільного пробігу електронів провідності, тобто повинні складати лише декілька нанометрів. Фізика і техніка тонких плівок 1960-70-х років у найбільш розвинених країнах світу перебувала на етапі свого становлення, а тому виготовлення багатошарових плівок з товщинами шарів у декілька нанометрів було технічно неможливим. Лише у середині 1980-х років, коли з'явилися відповідні технології і стала можливою реалізація цих ідей, у Німеччині групою дослідників під керівництвом П. Грюнберга була одержана багатошарова плівкова система з шарами Fe і Cr, що чергувалися. Система Fe/Cr стала першою магнітною багатошаровою структурою, у якій під дією зовнішнього магнітного поля було реалізовано перемикання взаємної орієнтації намагніченості суміжних шарів Fe і Cr від антипаралельної до паралельної і при цьому спостерігалася значна зміна її електричного опору (ГМО).

Таким чином, уперше ГМО був виявлений у штучно створеній багатошаровій плівковій структурі Fe/Cr (пізніше такі структури одержали назву магнітних надрешіток), утвореній чергуванням шарів Fe і Cr у 1988 р. [1]. Величина ефекту $\delta = \Delta R/R_0$ за температури $T = 4{,}2$ К перевищувала 90%.

У надрешітках Fe/Cr (рис. 2) шари Fe товщиною біля 3 нм чергувалися із шарами хрому Cr товщиною 0,9-1,8 нм. Було встановлено, що за відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти атомів Fe у межах одного шару паралельні, а магнітні моменти сусідніх шарів Fe, розділених шаром Cr, орієнтовані антипаралельно (антиферомагнітне впорядкування) (рис. 2а). При внесенні зразків із такою мультишаровою структурою до магнітного поля, яке перевищує поле насичення H_S і прикладене у площині шарів, антиферомагнітний обмінний зв'язок між магнітними моментами шарів Fe стрибкоподібно руйнується і у всіх шарах Fe магнітні моменти атомів Fe стають паралельними один до одного (рис. 2б).

У результаті стрибкоподібної переорієнтації магнітних моментів шарів Fe електричний опір такого зразка різко зменшується, оскільки його величина за паралельної орієнтації магнітних моментів (у феромагнітній структурі рис. 2б) набагато менша, ніж в антиферомагнітній (рис. 2а). Величина зовнішнього магнітного поля, яке викликає цей перехід, становить досить велике значення $H \sim 2{\cdot}10^3$ кА/м ($B \sim 2$ Тл).

Причиною появи ГМО є неоднаковість розсіювання магнітною структурою багатошарового плівкового зразка двох груп електронів провідності зі спінами, що відрізняються своєю орієнтацією відносно напряму намагніченості шарів.

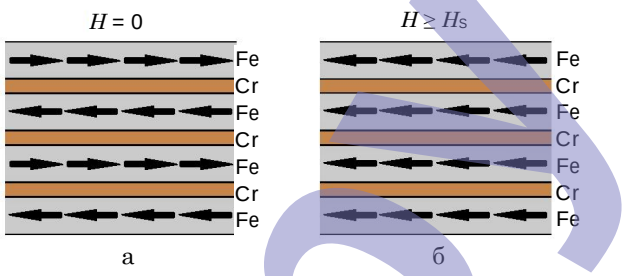

Рис. 2 – Схематичне зображення атомних шарів Fe і Cr у мультишаровій структурі Fe/Cr (стрілки показують напрями магнітних моментів атомів Fe): а – антиферомагнітне впорядкування, б – феромагнітне впорядкування

Для реалізації цього механізму необхідно, щоб середні довжини вільного пробігу електронів провідності λ розрізнялися значною мірою для електронів з протилежною орієнтацією спінів (з умовними напрямами спінів „угору" ($\lambda_\uparrow$) і „униз" ($\lambda_\downarrow$)). Така ситуація спостерігається у 3d-феромагнітних металах, де внаслідок обмінного розщеплювання (зміщення) $3d^+$- і $3d^-$-зон (рис. 3) за $E > E_F$ виникають відмінності в густинах незайнятих станів, у які розсіюються електрони із спінами „угору" і „униз", що й зумовлює залежність величини розсіювання від напряму спіну електронів. У результаті електрони зі спіном, наприклад, „угору" розсіюються слабше, і, навпаки, електрони зі спіном „униз" розсіюються сильніше.

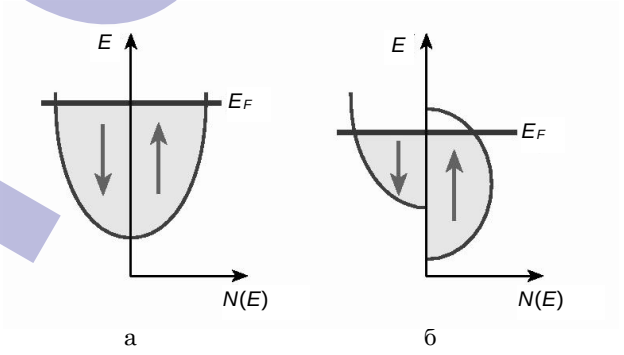

Рис. 3 – Залежність густини станів $N(E)$ для Cu (а) та Co (б) від енергії E 3d-електронів (E_F – рівень Фермі, що відокремлює заповнені стани від незаповнених)

Розсіювальними центрами для електронів провідності є магнітні неоднорідності (шари немагнітного металу), дефекти кристалічної решітки, межі зерен, теплові коливання решітки (фонони). Основними розсіювальними центрами у багатошарових структурах є магнітні неоднорідності (окремі шари з різною намагніченістю (рис. 2)). Відношення довжин вільного пробігу двох груп електронів із протилежною орієнтацією спінів ($\lambda_\uparrow$ та $\lambda_\downarrow$) у таких мультишарових структурах становить $\lambda_\uparrow/\lambda_\downarrow \sim 5$-10.

Ці результати зацікавили багатьох дослідників у різних країнах як з точки зору фундаментальної науки, так і прикладних можливостей, а створення і вивчення магнітних багатошарових плівок з ГМО стало досить популярною тематикою. За висловом А. Ферта [1] почався «золотий вік гігантського магніторезистивного ефекту», який продовжується й донині.

Проведені у наступні 20 років дослідження засвід-

Proof

чили, що ефект ГМО виникає у багатьох магнітних мультишарових структурах типу $Ф_1/П/Ф_2$, де $Ф_1$ і $Ф_2$ – шари 3d-феромагнітного металу (Ni, Co, Fe або їх сплави), а $П$ – шар неферомагнітного перехідного (V, Cr, Nb, Mo, Ru, Re, Os, Ir) або благородного (Cu, Ag, Au) металу (див., наприклад, [1-5]. Багаторазово повторюючи базисну структуру з ГМО ($n \times Ф/П/Ф$, n = 10-20) в одному зразку можна досягати великих значень (сотні процентів) величини ефекту, але це значно ускладнює процес виготовлення таких зразків.

Подальші експерименти дозволили виявити значний ефект ГМО у багатошарових плівкових структурах, утворених напиленням шарів Co та Cu (надрешітки Co/Cu), що чергуються, за набагато простішою технологією (термічне напилення шарів у технологічному (10^{-3}-10^{-4} Па) вакуумі). У цих надрешітках також були виявлені і осциляції залежності ефекту ГМО від товщини мідного прошарку, які зникають за досить великих товщин.

Оптимальна товщина немагнітного шару Cu, як правило, лежить у діапазоні 1-2 нм і, що досить важливо, – ефект ГМО у них спостерігається в значно слабших, ніж у випадку надрешіток Fe/Cr, магнітних полях $B \sim 0{,}1$ Тл (детальний перелік робіт див. у [1]).

На основі аналізу теоретичних та експериментальних робіт з дослідження ГМО в гетерогенних матеріалах і багатошарових плівках можна виділити три його основні властивості:

1) аномально велика амплітуда ефекту порівняно зі звичайним анізотропним магнітоопором;

2) ізотропність, тобто практична незалежність його величини від напрямів як струму так і перемагнічувального поля;

3) осциляційна залежність величини ефекту від товщини немагнітного прошарку.

Нині можна говорити про чотири основні типи плівкових структур, у яких реалізується ефект ГМО.

1. Мультишари, в яких сусідні феромагнітні шари пов'язані між собою антиферомагнітною обмінною взаємодією, наприклад, мультишари Fe/Cr [1].

2. Мультишари, що складаються з феромагнітних шарів з різними коерцитивними силами, наприклад, $Ni_{80}Fe_{20}$/Cu/Co/Cu [6]. Тут під дією зовнішнього магнітного поля магнітна конфігурація змінюється від антипаралельної впорядкованості магнітних моментів до паралельної.

3. Спін-вентильні сендвічі – структури, у яких обмінний зв'язок між феромагнітними шарами значно послаблюється за рахунок досить товстого (1,5-5 нм) немагнітного провідного прошарку із благородного металу [7, 8].

4. Гранульовані плівки і структури – структури, у яких феромагнітні зерна з розмірами в кілька нанометрів вкраплені до немагнітної матриці [9].

Одним із важливих, щодо технічного використання плівкових систем із ГМО, напрямом дослідження є вивчення питання про його температурну залежність. Цій проблемі присвячено багато експериментальних робіт, з яких випливає, що зі зміною температури від 4 К до кімнатної величина ефекту ГМО зменшується тим сильніше, чим більшою вона була за 4 К. Зменшення амплітуди ефекту пов'язане з додатковим розсіюванням електронів на фононах (особливо в немагнітному прошарку), що зменшує роль процесів спін-залежного розсіювання, відповідальних за ГМО [10].

Величина ГМО залежить і від якості кристалічної структури мультишарів. Наявність „містків" з магнітного матеріалу через немагнітний прошарок може спричинити виникнення феромагнітного зв'язку між шарами, що, у свою чергу, порушить у них антипаралельну конфігурацію, і приведе до зменшення величини ГМО [11, 12].

Таким чином, явище ГМО в багатошарових структурах пояснюється відмінностями у русі електронів із різними спіновими станами, а це означає, що фізичні властивості (зокрема, електропровідність у магнітному полі) таких об'єктів визначаються не тільки наявністю у електронів електричного заряду, а в першу чергу наявністю у електронів такої квантово-механічної характеристики, як спін.

Практичне використання явища ГМО (та деяких інших, де спін електронів також відіграє суттєву роль) зумовило появу в останні 20-25 років нового науково-технічного напрямку електронної техніки, який одержав назву спінтроніка, де використовується не тільки властивість рухомого електрона мати електричний заряд (електроніка), а й квантова властивість електрона мати спін.

4. ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЕФЕКТУ ГІГАНТСЬКОГО МАГНІТООПОРУ

Початково ефект ГМО був відкритий у магнітних надрешітках при вимірюванні опору для струмів, що протікають у площині плівкових шарів зразка. У середині 1990-х років ефект ГМО був виявлений і у випадку, коли електричний струм протікає перпендикулярно площині плівкових шарів [1]. Ці дві геометрії вимірювань ефекту ГМО одержали назви CIP (current-in-plane) та CPP (current-perpendicular-to-plane), відповідно. Механізми ефектів ГМО у CIP та CPP геометріях в основних рисах подібні, але величина ефекту $\delta = \Delta R/R_0$ для CPP-геометрії приблизно вдвічі більша, ніж для CIP-геометрії. Проте абсолютна величина електричного опору R_0 для зразків товщиною декілька нанометрів при вимірюваннях в CPP-геометрії надзвичайно мала (їх електричний опір у 10^6 разів менший, ніж у CIP-геометрії) і тому його досить складно вимірювати. Крім цього, досить складно організувати і контактні площадки для такої геометрії вимірювань. В силу цих обставин для вузівської навчальної демонстрації ефекту ГМО CPP-геометрія є менш привабливою.

Починаючи з 1997 р. ефект ГМО використовується для створення ГМО-сенсорів різно призначення (див., наприклад, [13]), у т.ч. надмініатюрні сенсори для зчитування інформації з магнітних дисків. Провідні виробники комп'ютерної техніки дуже широким фронтом ведуть розробки і нових видів флеш-пам'яті, що базується на магніторезистивних елементах, на противагу існуючим напівпровідниковим аналогам. Зовсім нещодавно розпочався комерційний випуск магнітної оперативної пам'яті MRAM (magnetic random access memory), запам'ятовуючі комірки якої складаються з багатошарових магніторезистивних елементів, робота яких базується на ефекті ТМО. Така пам'ять має просту конструкцію, зберігає свій стан при вимиканні живлення і дозволяє виконувати практично

Proof Copy

нескінченно велику кількість (до 10^{16}) циклів перезапису з тривалістю циклу в декілька наносекунд.

5. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ДЕМОНСТРАЦІЇ І ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА ГМО

Як уже зазначалося, у найбільш простому випадку ефект ГМО реалізується в тришарових плівкових об'єктах (ПО) типу *ФМ*/*НМ*/*ФМ*, де *ФМ* – шар феромагнітного металу Co, *НМ* – шар немагнітного металу Cu. Залежно від товщини шарів та термообробки величина ефекту становить δ = 1-4%. Саме такі ПО – тришарові плівки Co/Cu/Co з ГМО і пропонуються нами для демонстрації і вивчення явища ГМО у вищих навчальних закладах у курсі фізики чи електроніки. Нами було одержано свідоцтво МОН України про визнання відповідності педагогічним вимогам №06/029 від 24.06.2014р. на виріб "Плівкові об'єкти для демонстрації і вивчення явища гігантського магнітоопору".

ПО одержують методами пошарового вакуумного напилення металів (Cr, Cu, Co) на скляних підкладках. ПО складаються (рис.4) з плівкового резистора (3) (активна частина ПО) і контактних площадок (2) для закріплення вимірювальних провідників. Плівкові резистори в площині підкладки мають розміри 2×10 мм і одержані методом вакуумного напилення металів (Co, Cu). Підкладками є полірані пластини (1) з віконного скла розміром 25×25 мм. На кожній пластині напилено два однакових плівкових резистори (робочий і резервний). Контактні площадки виготовлені методом вакуумного пошарового напилення хрому та міді. Шар хрому товщиною до 50 нм наноситься на скло першим і забезпечує адгезію до поверхні скла наступного мідного контактного шару товщиною до 150 нм.

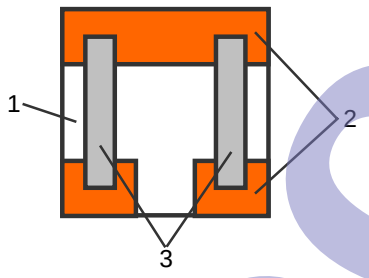

Рис. 4 – Схематичне зображення ПО для демонстрації і вивчення явища гігантського магнітоопору: 1 – скляна підкладка; 2 – контактні площадки; 3 – плівковий резистор

Контактні площадки після конденсації металу відпалюються у вакуумі до температури 400 °С для забезпечення їх механічної міцності. Провідники для підключення приладу для вимірювання електричного опору плівкового резистора можуть приєднуватися до таких контактних площадок або пайкою або чисто механічно за допомогою пружинних затискачів.

При проведенні демонстрації і вивченні явища ГМО експериментально досліджується зміна електричного опору R плівкового зразка (плівкового резистора) в зовнішньому магнітному полі індукцією B при її зміні, тобто експериментально встановлюється залежність $R = R(B)$.

Для проведення демонстрації і вивчення явища ГМО необхідні два ПО – один з плівковим одношаровим резистором з кобальту (товщиною 40-60 нм), другий з плівковим тришаровим Co/Cu/Co резистором. Плівковий тришаровий резистор виготовляється за спеціальною технологією методом пошарового напилення кобальту (товщиною до 30 нм), проміжного шару міді (товщиною до 1 нм) і знову кобальту (товщиною до 30 нм) у магнітному полі спеціальної просторової конфігурації. Плівковий одношаровий резистор виготовляється напиленням лише кобальту товщиною 30-50 нм. Одержані таким чином ПО з резисторами також відпалюються у вакуумі за температури 400 °С для забезпечення стабільності їх параметрів і механічної міцності.

За допомогою одношарового резистора демонструється і вивчається типовий анізотропний (звичайний) магнітоопір, за допомогою тришарового резистора демонструється і вивчається гігантський (незвичайний) магнітоопір. Демонстрація та вивчення ефекту ГМО можлива як за кімнатної температури (простий варіант досліджень), так і при низьких (кріогенних) температурах (більш складний варіант досліджень).

Для демонстрації і вивченні ефекту ГМО за кімнатної температури може бути використане стандартне обладнання лабораторії електрики та магнетизму: магнітна система, що створює однорідне магнітне поле з індукцією, яка змінюється в межах B = 0-100 мТл (кільця Гельмгольца, соленоїд або електромагніт з повітряним зазором) та відповідне джерело живлення магнітної системи і цифровий омметр. Найбільш зручною є магнітна система з кілець Гельмгольца. Схема розташування ПО в магнітному полі системи з кілець Гельмгольца зображена на рис. 5.

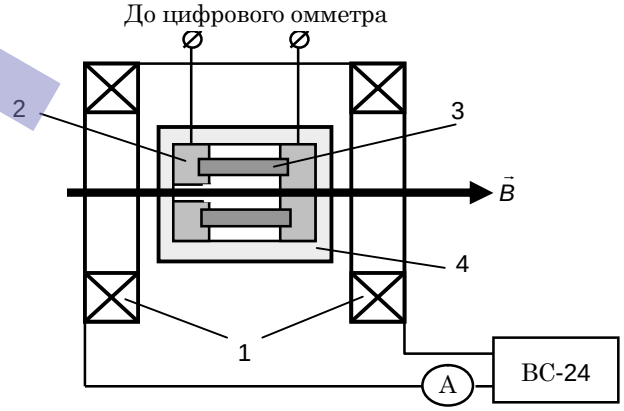

Рис. 5 – Схема розташування плівкового об'єкта в магнітній системі кілець Гельмгольца: 1 – кільця Гельмгольца; 2 – контактна площадка; 3 – плівковий резистор; 4 – тримач

Плівковий об'єкт розташовується у магнітній системі, утвореній двома кільцями Гельмгольца (1), в області однорідного магнітного поля. Величина і напрям індукції магнітного поля, створюваного кільцями, змінюється завдяки зміні сили струму і напряму його протікання (зміна полярності вихідної напруги джерела живлення) через кільця. У найпростішому випадку джерелом живлення магнітної системи може бути випрямляч ВС-24.

Найпростіша установка для дослідження і демонстрації явища ГМО зображена на рис. 6.

PROOF

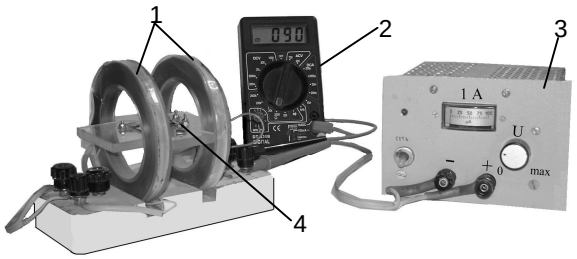

Рис. 6 – Зовнішній вигляд найпростішої установки для демонстрації і вивчення явища ГМО: 1 – кільця Гельмгольца; 2 – цифровий омметр; 3 – блок живлення кілець Гельмгольца; 4 – плівковий об'єкт

Магнітна система повинна мати градуювальну криву (графік залежності величини індукції магнітного поля створюваного нею, від величини сили електричного струму, що протікає через її котушки).

ПО з напиленими контактними площадками і досліджуваним плівковим резистором закріплюється в тримачі. Тримач повинен забезпечувати можливість розташування ПО в області однорідного магнітного поля магнітної системи послідовно в одній і тій же площині у двох взаємно перпендикулярних напрямках по відношенню до напрямку вектора індукції магнітного поля системи $\vec{B}$ (для вимірювання повздовжнього магнітоопору ($R_{||}$) та для вимірювання поперечного магнітоопору ($R_{\perp}$)), як показано на рис. 7.

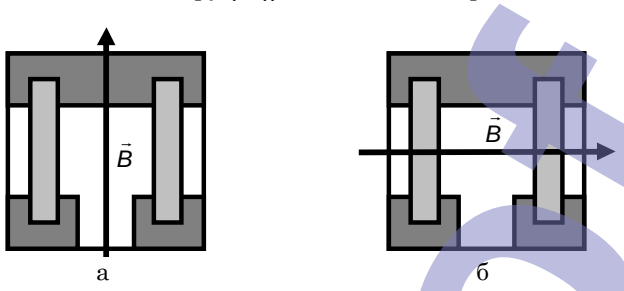

Рис. 7 – Розташування плівкового об'єкта в області магнітного поля: а – вимірювання повздовжнього магнітоопору ($R_{||}$); б – вимірювання поперечного магнітоопору (R_{+})

При демонстрації і вивченні явища ГМО експериментально досліджується зміна електричного опору R плівкового резистора зі зміною індукції $\vec{B}$ зовнішнього магнітного поля, тобто експериментально встановлюється залежність $R = R(\vec{B})$, причому для одного й того ж плівкового резистора вимірюються (а потім порівнюються) дві залежності: $R_{||} = R_{||}(\vec{B})$ (повздовжня геометрія вимірювань, повздовжній магнітоопір) і $R_{+} = R_{+}(\vec{B})$ (поперечна геометрія вимірювань, поперечний магнітоопір).

5.1 Повздовжній магнітоопір (дослідження залежності $R_{||} = R_{||}(B)$)

Перед початком вимірювань потрібно закріпити ПО на тримачі так, щоб напрям вектора індукції магнітного поля і напрям протікання струму через плівковий резистор співпадали (рис. 7а), та приєднати вимірювальні провідники омметра до контактних площадок ПО. Для отримання повної петлі магніторезистивного ефекту (повної залежності $R_{||} = R_{||}(\vec{B})$) потрібно виконати наступне.

1. Максимально намагнітити досліджувану плівку (плівковий резистор), пропустивши через котушки магнітної системи максимальний електричний струм від джерела живлення. Сила струму повинна забезпечувати створення в місці знаходження плівкового об'єкту однорідного магнітного поля індукцією не менше 100 мТл.
2. Плавно зменшити струм через котушки магнітної системи до нуля і вимкнути живлення магнітної системи. Після вимкнення живлення магнітної системи зафіксувати покази цифрового омметра (виміряти електричний опір плівкового резистора) R_0 за відсутності магнітного поля.
3. Змінити полярність джерела живлення магнітної системи (змінити на протилежний напрям вектора індукції магнітного поля).
4. Отримати залежність величини електричного опору плівкового резистора від величини індукції магнітного поля $R_{||} = R_{||}(\vec{B})$. Для цього увімкнути джерело живлення магнітної системи і, ступінчато з невеликим кроком збільшуючи струм (збільшуючи індукцію магнітного поля), фіксувати на кожному кроці покази омметра.
5. Зафіксувати покази омметра після досягнення значення індукції магнітного поля $B = 100$ мТл і почати ступінчато з таким же невеликим кроком зменшувати струм (зменшувати індукцію магнітного поля) через котушки магнітної системи до нуля, знову фіксуючи на кожному кроці покази омметра.
6. Вимкнути джерело живлення магнітної системи. Змінити напрям індукції магнітного поля в магнітній системі на протилежний (змінити полярність джерела живлення) і знову повторити вимірювання електричного опору зразка відповідно до п.4 та п.5. (Отримати залежність $R_{||} = R_{||}(-\vec{B})$.
7. За результатами вимірювань побудувати повну петлю магніторезистивного ефекту для повздовжнього магнітоопору $R_{||}$, тобто побудувати на одному графіку обидві вітки залежності $R_{+} = R_{+}(\vec{B})$ (як для струму, що протікає через плівковий резистор в напрямку вектора $\vec{B}$ ($R_{||} = R_{||}(\vec{B})$), так і для струму, що протікає через плівковий резистор в напрямку проти вектора $\vec{B}$ ($R_{||} = R_{||}(-\vec{B})$).

5.2 Поперечний магнітоопір

Для вимірювання поперечного магнітоопору R_{+} розташувати ПО так, щоб напрям індукції магнітного поля магнітної системи був перпендикулярним до напряму протікання електричного струму через плівковий резистор (рис. 7б). Повторити вимірювання для цього положення плівкового об'єкта згідно п.1-6 і за результатами вимірювань побудувати повну петлю магніторезистивного ефекту для поперечного магнітоопору R (побудувати повний графік залежності $R_{||} = R_{||}(\vec{B})$ аналогічно п.7).

Вимірювання магнітоопору згідно п.1-8 провести для двох ПО:

Proof copy

1. ПО з одношаровим плівковим резистором з Co (залежність $R = R(\vec{B})$ демонструє типовий анізотропний магнітоопір (АМО));
2. ПО з тришаровим плівковим резистором з Co/Cu/Co (залежність $R = R(\vec{B})$ демонструє типовий ГМО).

5.3 Обробка результатів вимірювань та висновки

Отримані результати вимірювань МО необхідно виразити у процентах за формулами (1) і (2) та побудувати повну петлю магніторезистивного ефекту (графіки залежностей $\Delta R_{II}/R_0 = \Delta R_{II}/R_0(\vec{B})$ та $\Delta R_+/R_0 = \Delta R_+/R_0(\vec{B})$) для випадку АМО (одношарова плівка Co) та ГМО (тришарова плівка Co/Cu/Co).

На рис. 8 представлені для ілюстрації типові залежності магнітоопору від індукції зовнішнього магнітного поля (повні петлі магніторезистивного ефекту) для одношарової плівки Co (типовий АМО) і тришарової плівки Co/Cu/Co (типовий ГМО).

Для плівкових одношарових резисторів з Co (рис. 8а) спостерігається ***позитивний*** (електричний опір збільшується) і ***негативний*** поперечний (електричний опір зменшується) магнітоопір, що є демонстрацією АМО властивого однорідним феромагнітним металам, як у масивному, так і в плівковому станах.

Для тришарових плівкових резисторів Co/Cu/Co (рис. 8б) спостерігається лише суттєве зменшення електричного опору (відношення $\delta = \Delta R/R_0$ менше нуля) незалежно від напрямку прикладеного магнітного поля, струму та орієнтації зразка (відсутність анізотропії магнітоопору). Це є ***характерною ознакою ГМО*** і говорить про одночасну зміну орієнтації магнітних моментів елементів плівкового резистора (шарів Co розділених тонким немагнітним прошарком Cu).

Порівняти отримані залежності у випадку АМО та ГМО. Встановити відмінності і визначити максимальну величину ГМО в процентах.

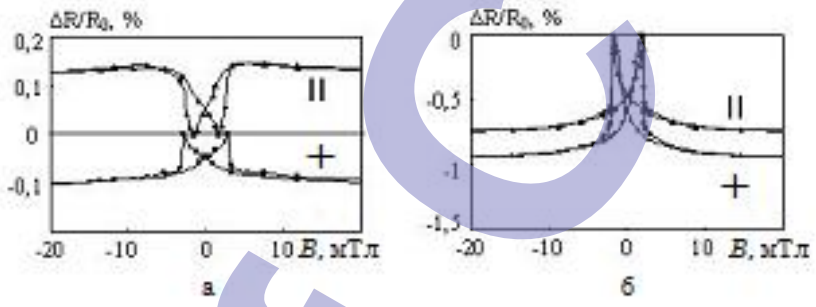

Рис. 8 – Залежності магнітоопору плівкових резисторів від індукції зовнішнього магнітного поля: а – резистор одношарова плівка Co (типовий АМО), б – резистор тришарова плівка Co/Cu/Co (типовий ГМО)

ВИСНОВКИ

1. Розроблений нами комплект плівкових об'єктів CIP-геометрії дає можливість, користуючись доступним нескладним обладнанням, демонструвати і вивчати в курсах фізики та електроніки як анізотропний (одношаровий плівковий зразок Co), так і гігантський (тришаровий плівковий зразок Co/Cu/Co) магнітоопір.
2. Кожний зразок (плівковий об'єкт) має свій паспорт, де вказані його характеристики (склад. електричний опір, амплітуда ГМО, поле насичення, коерцитивна сила тощо) та детальну інструкцію для проведення як демонстрації ефекту ГМО, так і його вивчення.

The effect of the giant magnetoresistance, its demonstration and learning in the physics course of high schools

V.B. Loboda[1], Yu.O. Shkurdoda[2], M.Ya. Dovzhyk[1], V.O. Kravchenko[1], S.M. Khursenko[1]

[1] *Sumy National Agrarian University, 160, Herasym Kondratiev Str., 40021 Sumy, Ukraine*
[2] *Sumy State University, 2, Rimskyi Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine*

The paper considers methodological aspects of formation of students' knowledge about the effects of a giant (GMR) and anisotropic (AMR) magnetoresistance as basic physical effects on which highly developed sensory information and nanoelectronics and spintronics devices. The technique demonstrations magnetoresistive effect film samples in CIP-geometry at room temperature. The use of two film samples (single-layer Co film and three-layer film Co/Cu/Co) of identical geometric sizes allows simultaneous demonstration of a typical anisotropic (single layer film) and a giant (three layer film) magnetic resistive at room temperature using a simple laboratory installation.

Keywords: Nanosize metal film, Anisotropic magnetoresistance, Giant magnetoresistance, Demonstration.

Proof Only

Эффекты гигантского и анизотропного магнетосопротивления: демонстрация и изучение в курсе физики учреждений высшего образования

В.Б. Лобода[1], Ю.А. Шкурдода[2], М.Я. Довжик[1], В.А. Кравченко[1], С.Н. Хурсенко[1]

[1] *Сумский национальный аграрный университет, ул. Герасима Кондратьева, 160, 40021 Сумы, Украина*
[2] *Сумский государственный университет, ул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина*

Статья посвящена рассмотрению методических аспектов формирования у студентов знаний об эффектах гигантского (ГМС) и анизотропного (АМС) магнетосопротивления как базовых физических эффектов, на основе которых разработаны высокоэффективные информационные и сенсорные приборы наноэлектроники и спинтроники. Предложенная методика демонстрации магниторезистивного эффекта в пленочных образцах в CIP-геометрии при комнатной температуре. Использование двух пленочных образцов (однослойная пленка Co и трехслойная пленка Co/Cu/Co) одинаковых геометрических размеров дает возможность одновременно продемонстрировать типичное анизотропное (однослойная пленка) и гигантское (трехслойная пленка) магнитосопротивление при комнатной температуре с использованием простой лабораторной установки.

Ключові слова: Наноразмерная металлическая пленка, Анизотропное магнетосопротивление, Гигантское магнетосопротивление, Демонстрация.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A.Fert. *Usp. Phys. Nauk* 178 No12, 1336 (2008).
2. V.B. Loboda, Yu.O. Shkurdoda. V.O.Kravchenko, S.M. Khursenko, V.M Kolomiets, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 33 (2), 161 (2011).
3. I.Yu.Protsenko, P.K.Mehta, L.V.Odnodvorets, C.J.Panchal, K.V.Tyschenko, Yu.M.Shabelnyk, N.I.Shumakova, *J. Nano-Electron. Phys.* 6 No1, 01031 (2014).
4. O.V. Synashenko, O.P.Tkach, I.P.Buryk, L.V. Odnodvorets, S.I.Protsenko, N.I. Shumakova, *Prob. At. Sci. Technol.* 6, 169 (2009).
5. I.M. Lytvynenko, I.M. Pazukha, O.V. Pylypenko, V.V. Bibyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 37 No10, 1377 (2015).
6. J. Yu, C. Yan, Y. Wang, *phys. stat. sol. (a)* 187 No2, 517 (2001).
7. S. Jo, M. Seigler, *J. Appl. Phys.* 91 No10, 7110 (2002).
8. E.B. Svedberg, K.J.Howard, M.C. Bonsager, *J. Appl. Phys.* 94 No2, 1001 (2003).
9. F. Casoli, F. Albertini, F. Bolzoni, *J. Magn. Magn. Mater.* 262 No1, 69 (2003).
10. О.І. Товстолиткін, М.О. Боровий, В.В. Курилюк, Ю.А. Куницький, *Фізичні основи спінтроніки: навчальний посібник* (Вінниця: 2014). (A.I.Tovstolytkin, M.O.Borovy, V.V.Kurilyuk, Yu.A. Kunytskyy, *Physichni osnovy spintroniki: navchalny posibnyk* (Vinnitsa: 2014)) [In Ukrainian].
11. А.М.Погорілий, С.М. Рябченко, О.І. Товстолиткін, *УФЖ.* 6 №1, 37 (2010). (A.M.Pogorily, S.M.Ryabchenko, A.I.Tovstolytkin. *Ukr. Phys. J.* 6, 1, 37 (2010)) [In Ukrainian].
12. Yu.O. Shkurdoda, I.M. Pazukha, A.M. Chornous, *Intermetallics* 93, 1 (2018)
13. L. Jogschies, D. Klaas, R. Kruppe, J. Rittinger, P. Taptimthong, A. Wienecke, L. Rissing, M. Christopher Wurz, *Sensors* 15, 28665 (2015).

Proof copy