

УНІВЕРСИТЕТ ГРИГОРІЯ СКОВОРОДИ
В ПЕРЕЯСЛАВІ

Рада молодих учених університету

Матеріали
Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції
**«ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ
НАУКИ І ОСВІТИ В УМОВАХ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ»**

28 квітня 2023 року

Вип. 93

Збірник наукових праць

Переяслав – 2023

**ТЕХНІЧНІ НАУКИ. ТРАНСПОРТ /
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТРАНСПОРТ**

УДК 621.38

*Володимир Кравченко, Юлія Кравченко
(Суми, Україна)*

МАГНІТНІ ДАТЧИКИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ

В роботі розглядаються принципи роботи та галузі застосування магнітних датчиків у якості пристроїв автоматики. Наведено порівняння властивостей датчиків на основі різних ефектів (анізотропного (AMR), гігантського (GMR) та тунельного магнітоопору (TMR)).

***Ключові слова:** магнітний датчик, анізотропний магнітоопір, гігантський магнітоопір, тунельний магнітоопір, системи автоматики.*

The paper examines the principles of operation and fields of application of magnetic sensors as automation devices. A comparison of sensor properties based on different effects (anisotropic (AMR), giant (GMR), and tunnel magnetoresistance (TMR)) is given.

***Keywords:** magnetic sensor, anisotropic magnetoresistance, giant magnetoresistance, tunnel magnetoresistance, automation systems.*

Датчики систем автоматики та автоматизації є одними з основних елементів ланцюжка “датчик – пристрій керування – виконавчий пристрій – керований об’єкт”. Основні ознаки класифікації датчиків – за вимірюваним параметром (датчики тиску, витрати, концентрації, рівня, температури, переміщення, вібрації тощо) і за принципом дії (механічні, оптичні, ємнісні, п’єзоелектричні і магнітні та ін.) Магнітні датчики знаходять широке застосування в різних сферах: в банкоматах, детекторах валют, апаратах для зчитування даних магнітної смуги на карті, магнітних сканерах, комп’ютерах, стільникових телефонах. Вони вони використовуються також для визначення швидкості, положення обертового вала електродвигуна, зміни лінійного і кутового положення. В електроенергетиці магнітні датчиків використовуються для безконтактного вимірювання струмів та параметрів магнітних полів.

Більшість магнітних датчиків використовують різні види магніторезистивного ефекту та ефект Холла. Магніторезистивний ефект (магнітоопір) – це зміна електричного опору матеріалу під дією магнітного поля. Магніторезистивний ефект буває кількох видів, кожен з них має різну природу. При створення датчиків найчастіше застосовуються анізотропний магніторезистивний ефект (AMR), ефекти гігантського (GMR) та тунельного (TMR) магнітоопору.

AMR-датчики. Складна кількісна теорія АМР-ефекту була в цілому побудована в середині ХХ століття. Він є за своєю природою квантово-механічним і полягає в зміні опору зразка феромагнітного матеріалу в залежності від кута між напрямком вектора намагніченості зразка і напрямком протікання електричного струму, а також від величини індукції магнітного поля. Суттєвим є також величина кута, під яким струм у зразку направлений по відношенню до деякого виділеного напрямку кристалічної решітки монокристалічного зразка, яке називають віссю легкого намагнічування (зазвичай уздовж нього початково орієнтовані магнітні домени).

Напрямок осі легкого намагнічування можна задавати при виготовленні датчика за рахунок створення підмагнічую чого поля. Для створення магніторезисторів використовують тонкі плівки феромагнітних металів і сплавів (найчастіше пермалою, однак перспективним є використання і інших феромагнітних матеріалів). Використання плівкових матеріалів дає змогу одержати великі значення електричного опору та одноосьову анізотропію зразка. При цьому товщина плівки в АМР-датчиках становить лише кілька десятків нанометрів. За цих

умов плівка є однодомною за товщиною, а вектор намагніченості лежить в площині плівки і може здійснювати поворот лише в цій площині. В якості підкладки використовуються кремній, скло або кераміка. Використання кремнію обумовлено тим, що це дозволяє інтегрувати на єдину підкладку, крім магніторезистора, і інші схемні напівпровідникові елементи.

Перпендикулярно осі легкого намагнічування (але також в площині плівки) розміщена вісь важкого намагнічування.

Фізичною причиною виникнення AMR-ефекту є спін-орбітальна взаємодія електронів, що приводить до їх спін-залежного розсіювання. Воно має анізотропний характер і залежить від взаємної орієнтації струму і намагніченості. Це призводить до різної середньої довжини вільного пробігу електронів з різними напрямками спінів при різних кутах між струмом і намагніченістю, а наслідком зміни довжини вільного пробігу є зміна питомого електричного опору феромагнетика.

AMR-датчики функціонують в двох режимах. В першому датчики працюють в режимі насичення і призначені для вимірювання повороту напрямку вектора напруженості зовнішнього магнітного поля (на цьому базується робота датчиків кута повороту), в другому величина напруженості зовнішнього магнітного поля менша значення, необхідного для насичення (такий режим називають ненасиченим). Цей режим використовується для створення порогових та AMR-датчиків з лінійною передавальною характеристикою.

Гістерезис намагніченості M при зміні напруженості магнітного поля H при AMR-ефекті також носить анізотропний характер: він зникає вздовж напрямку осі важкого намагнічування і сильно виражений уздовж осі легкого намагнічування при спів паданні напрямку струму з цією віссю.

В режимі насичення режимі напрями векторів H і M збігаються. При цьому, вимірюючи напрямок вектора M , можна визначити напрямок вектора зовнішнього поля H .

При довільному куті α між вектором намагніченості M та струмом зовнішнє магнітне поле з напруженістю H змінює базовий (мінімальний) опір плівки R_0 .

Форма експериментальної кривої $\Delta R(\alpha)$ для насиченого режиму добре описується формулою:

$$\Delta R(\alpha) = \Delta R_{\max} \cos^2 \alpha,$$

де ΔR_{\max} – максимальна зміна опору.

Зміна опору плівки при цьому описується формулою [1]:

$$R = R_0 + \Delta R_{\max} \cos^2 \alpha.$$

При повороті H в напрямку збільшення α опір зразка зменшується.

Якщо зовнішнє поле H за модулем не досягає значення, потрібного для насичення, то залежність $\Delta R(\alpha)$ не можна використати для вимірювання напрямку магнітного поля, однак за нею можна визначити величину зовнішнього поля.

Магніторезистивні AMR-датчики мають високу чутливість і дозволяють вимірювати малі зміни магнітного поля. Ці датчики знайшли своє застосування в магнітометрах, магнітних сканерах, вимірювачах слабких полів, навігації, компенсаторах поля Землі, електронних і цифрових компасах, датчиках повороту, переміщення та акселерометрах. Перевагами магніторезистивних датчиків є: широкий діапазон робочих температур ($\pm 100^\circ\text{C}$), відсутність магнітного дрейфу, простота, надійність, довговічність.

Датчики на GMR-ефекті. Магніточутливі елементи з GMR-ефектом формуються на основі наноструктурованих багаточарових тонких плівок. Вони представляють собою багаточарові структури, в яких феромагнітні шари чергуються з немагнітними. Вперше гігантський магнітоопір був виявлений в штучно створеній магнітній надрешітці Fe/Cr у 1988 р. [2]. Величина $\delta = \Delta R/R_0$ ($\Delta R = R(H) - R_0$, де $R(H)$ – опір зразка в зовнішньому магнітному полі напруженістю H , R_0 – опір зразка при відсутності зовнішнього магнітного поля) при $T = 4,2$ К в полі $H \sim 20$ кЕ перевищувала 90% (рис. 1). Аналогічний, хоча й значно менший ефект, одночасно був виявлений у тришаровій системі Fe/Cr/Fe.

У таких мультишарових плівках феромагнітні шари (Fe з товщиною $\sim 30 \text{ \AA}$) чергувалися з неферомагнітними шарами (Cr з товщиною 9-18 \AA). Магнітні моменти феромагнітних атомів в межах одного шару паралельні, а магнітні моменти сусідніх шарів орієнтовані антипаралельно (антиферомагнітно). У магнітному полі, що перевищує деяке поле насичення H_s і яке прикладене в площині плівки, антиферомагнітний обмінний зв'язок між магнітними моментами шарів Fe руйнується і магнітні моменти різних феромагнітних шарів виявляються паралельними. Магнітне поле, яке викликає цей перехід, складає досить велику величину $H \sim 20 \text{ кЕ}$. В результаті стрибкоподібної переорієнтації магнітних моментів електричний опір різко зменшується (рис. 1), оскільки його величина при паралельній орієнтації моментів (у феромагнітній структурі) набагато менша, ніж при антипаралельній (в антиферомагнітній структурі).

Механізм гігантського магнітоопору пояснюється неоднаковим розсіюванням двох груп електронів зі спінами, що відрізняються орієнтацією по відношенню до напрямку намагніченості магнітної структури. Для реалізації цього механізму необхідно, щоб середні довжини вільного пробігу істотно розрізнялися для електронів з протилежними напрямками спінів. Така ситуація спостерігається в 3d-феромагнітних металах, де внаслідок обмінного розщеплення 3d⁺- і 3d⁻-зон виникають відмінності в густині незайнятих станів, в які розсіюються електрони із спінами "вгору" і "вниз". Це призводить до появи залежності ймовірності розсіювання від напрямку спіну електронів. В результаті електрони із спіном "вгору" слабо розсіюються, а електрони із спіном "вниз" - сильніше. Розсіюючими центрами для цих електронів є магнітні неоднорідності, дефекти кристалічної решітки, межі зерен, теплові коливання решітки (фонони). Відношення довжин вільного пробігу цих двох груп електронів в мультишарових структурах становить $\sim 5-10$ разів.

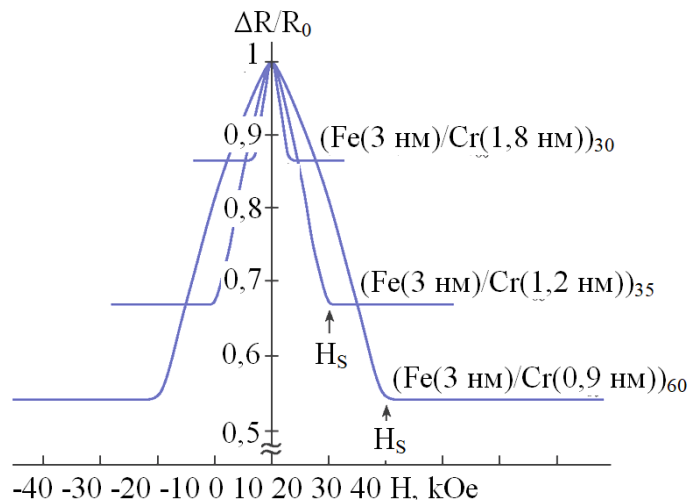


Рис. 1. Відносна зміна опору в магнітному полі для мультишарів Fe/Cr при 4,2 К [2]

GMR-датчики знаходять застосування для зчитування інформації, детектування лінійного, обертального переміщення або зміщення об'єктів, регулювання моменту впорскування палива, визначення положення важеля керування двигуном тощо. У промисловому обладнанні вони використовуються для виявлення намагнічених об'єктів, отворів в пластинах феромагнетиків, реєстрації присутності або відсутності провідних елементів, наявності в них дефектів, для вимірювання електричного струму. В медицині вони використовуються для контролю магнітних полів, контролю положення тіла, для отримання біопроб та вивчення ДНК або концентрації антитіл в крові пацієнта.

Датчики на основі TMR-ефекту. Таку датчики також виготовляються з використанням тонкоплівкової технології. Вони являють собою тонку плівку, в якій між двома феромагнітними шарами (вільним і з ріп-переходом) знаходиться бар'єрний шар діелектрика. Магнітна орієнтація шару з ріп-переходом задана жорстко, а орієнтація вільного шару може

змінюватися у відповідності з напрямком зовнішнього магнітного поля. Електричний опір TMR-елемента змінний і залежить від магнітної орієнтації вільного шару. Коли магнітні орієнтації вільного шару і шару з рін-переходом паралельні, опір мінімальний, і через бар'єрний шар тече найбільший струм. В іншому випадку, коли магнітні орієнтації вільного шару і шару з рін-переходом антипаралельні, опір стає великим, і струм через бар'єрний шар практично не йде (рис. 2). Елементи TMR мають ідеальні резистивні характеристики, які практично повністю запобігають руху електронів через бар'єрний шар. На відміну від GMR-датчиків, в яких струм проходить вздовж шарів, в TMR-пристроях проходження струму відбувається в поперечному до площини плівки напрямку.

Пристрої такого типу використовуються в якості зчитуючих головок жорстких дисків. Датчики TMR знаходять застосування також як датчики положення: кут повороту рульового колеса, відкриття педалі, відкриття дросельної заслінки, положення двигунів склоочисників тощо. Датчики TMR застосовуються, зокрема, в колонках рульового управління автомобілів для підвищення точності парковки в автоматичному режимі і реалізації повністю автономного водіння.

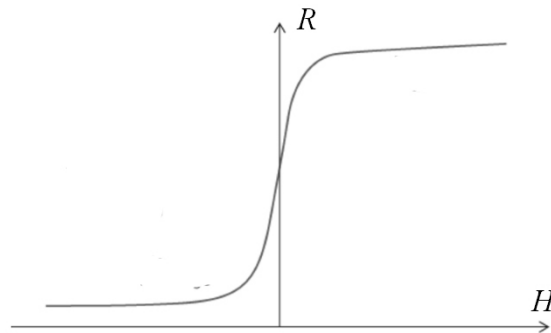


Рис. 2. Зміна опору TMR-датчика

До переваг таких датчиків відноситься висока точність вимірювань при низькому ступені зносу, менший температурний дрейф, більш повільне старіння, компактність конструкції, низький рівень споживання енергії, більший діапазон чутливості (від 0° до 360°).

Порівняння характеристик AMR, GMR та TMR-датчиків показує, що для останніх зміна опору має найбільше значення (порядку 3% для AMR, 12% для GMR і до 100% для TMR-ефекту). Разом з цим датчики на AMR мають більш просту будову і меншу вартість, а їх передавальна характеристика може бути зведена до лінійної за рахунок спеціального з'єднання кількох датчиків, що розширює можливості їх застосування.

ДЖЕРЕЛА ТА ЛІТЕРАТУРА

1. Борисов А. Современные АМР-датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей. *Компоненты и технологии*. 2006. №7. С.65-70.
2. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices / Baibich M.N., Broto J.M., Fert A. et all. *Phys. Rev. Lett.* 1988. 61, № 21. P. 2472-2476.

<i>Аліна Волонтир, Сергій Ротте</i> ІНВЕСТИЦІЙНА ПРИВАБЛИВІСТЬ ЗЕМЕЛЬ В РИНКОВИХ УМОВАХ ТЕХНІЧНІ НАУКИ. ТРАНСПОРТ / ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТРАНСПОРТ	149
<i>Володимир Кравченко, Юлія Кравченко</i> МАГНІТНІ ДАТЧИКИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ АРХІТЕКТУРА І БУДІВНИЦТВО / АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО	152
<i>Мугамилла Жумагулова</i> РЕШЕНИЕ В ДИЗАЙНЕ МАЛОГАБАРИТНОЙ КВАРТИРЫ	156
<i>Oleg Cazac, Olga Narea, Otilia Rudic</i> APLICAREA MATEMATICII ÎN ARHITECTURĂ	159
<i>Юлія Ковальчук</i> ОСОБЛИВОСТІ ДИЗАЙНУ ІНТЕР'ЄРІВ СУЧАСНИХ МОТЕЛІВ	166
<i>Лариса Старинська, Данііл Третьяк, Євген Ворона</i> БУДІВЕЛЬНА ГАЛУЗЬ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО СТАНУ	168
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	172