

GLOBAL SCIENCE: PROSPECTS AND INNOVATIONS

Proceedings of IX International Scientific and Practical Conference

Liverpool, United Kingdom

25-27 April 2024

Liverpool, United Kingdom

2024

22.	<i>Король О. С., Єрукаєв А. В., Цюцюра С. В.</i>	122
	АНАЛІЗ ПОМИЛОК ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ТЕХНОЛОГІЇ UX/UI	
23.	<i>Лаврищев О. О., Новосилецький Ю. Л., Дідківський М. М.</i>	128
	ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ «ПОВІТРЯ – ВОДА» В УМОВАХ ПОМІРНОГО КЛІМАТУ	
24.	<i>Ошовський В. Я.</i>	134
	ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТА ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РУХОМИХ СПРЯЖЕНЬ ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ	
25.	<i>Романюк О. Д., Романюк Я. О., Невстакай О. С.</i>	140
	ОПТИМАЛЬНИЙ ВИБІР МАС ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС НА ЕТАПІ ПОПЕРЕДНЬОГО ПРОЕКТУВАННЯ	
26.	<i>Сіренко С. О.</i>	146
	КЛАСИФІКАЦІЯ ШВЕЙНИХ ВИРОБІВ ЯК ОСНОВА ФОРМУВАННЯ АСОРТИМЕНТНОЇ ПОЛІТИКИ ПІДПРИЄМСТВА РОЗДРІБНОЇ ТОРГІВЛІ	
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES		
27.	<i>Ахиев Алаббас Сейди оглы, Ширинов Талех Ворашил оглы, Нифталиева Мехрибан Муслим кызы</i>	156
	МНОГОСЛОЙНЫЕ СРЕДЫ С ТРЕЩИНАМИ	
28.	<i>Гурін А. Л., Донець А. Г., Лисенко Є. О.</i>	161
	СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ МЕТОДОЛОГІЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ПРО МАТЕМАТИЧНИЙ СЕЙФ	
29.	<i>Кравченко В. О., Кравченко Ю. А.</i>	168
	AMR-ДАТЧИКИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	
30.	<i>Мазурок О. О., Бабчук І. В., Кублій К. О.</i>	177
	ЦІЛОЧИСЕЛЬНІ ТРИКУТНИКИ З ДЕЯКИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ	
GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES		
31.	<i>Виуневич І. В., Рупієніс Донатас, Жармалавічюс Даріус</i>	184
	ATYPICAL SEASIDE OCCURRENCES OF BEAVERS: ICHTHOLOGICAL AND PALEOECOLOGICAL IMPLICATIONS	
ARCHITECTURE		
32.	<i>Черніков К. Г.</i>	190
	БУДІВЕЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ (BIM): КЛЮЧОВИЙ ІНСТРУМЕНТ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТОМ	
33.	<i>Ярошук І. В., Лобанчикова К. С.</i>	200
	ПЕВНІ АСПЕКТИ УРБАНІСТИЧНИХ ПРОБЛЕМ МІСТ УКРАЇНИ	

AMR-ДАТЧИКИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

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 розглянуто результати дослідження ефекту анізотропного магнітоопору (AMR) в плівках пермалою 50Н, який є одним з матеріалів для виготовлення магнітних датчиків. Показано зв'язок зміни опору з процесами перебудови магнітної доменної структури плівки. Вказано на можливість застосування залежності опору зразка в магнітному полі для оцінки параметрів магнітних датчиків.

Ключові слова: магнітний датчик, анізотропний магнітоопір, доменна структура, коерцитивна сила, поле насичення.

В сучасних системах автоматизації датчики є одними з основних елементів ланцюжка "датчик – пристрій керування - виконавчий пристрій - керований об'єкт. Основні види класифікації датчиків – за вимірюваним параметром (датчики тиску, витрати, концентрації, рівня, температури, переміщення, вібрації тощо) чи за принципом дії (механічні, оптичні, ємнісні, п'єзоелектричні і магнітні та ін.) Магнітні датчики широко застосовуються в різноманітних сферах: в банкоматах, детекторах валют, апаратах для зчитування даних магнітної смуги на карті, магнітних сканерах, комп'ютерах, стільникових телефонах. У машинобудуванні та автомобілебудуванні вони використовуються як датчики положення, кута, для визначення швидкості, положення обертового вала електродвигуна.

Використання магнітних датчиків в електроенергетиці пов'язане з задачами безконтактного визначення струмів та вимірюванням магнітних полів.

Сучасна промисловість має досить широкий спектр інформаційно-вимірювальних пристроїв і систем, побудованих на основі різних магніторезистивних ефектів. Серед них можна виділити наступні:

- фізичний і геометричний ефекти магнітоопору;
- гігантський магніторезистивний (GMR) ефект;
- магніторезистивний ефект спін-залежного тунелювання (SDT-ефект);
- анізотропний магніторезистивний ефект (AMR-ефект).

Серед цих ефектів на сьогодні найбільше поширення в області побудови прецизійних магнітних датчиків має отримав AMR-ефект. Така ситуація, в першу чергу, пов'язана з властивими цим датчикам якостями: високою роздільною здатністю, високою чутливістю, можливістю лінеаризації вихідної характеристики датчика в робочому діапазоні, чутливістю до знаку вимірюваного магнітного поля, відносно широким частотним діапазон (до 1000 Гц), широким діапазоном робочих температур (-60 ... + 150 ° C), низьким опором.

Крім цього, до переваг AMR-датчиків можна віднести малі масогабаритні показники, високу технологічність виробництва, відносно низьку вартість, високі показники надійності і терміну експлуатації. Все це вигідно виділяє цей тип магнітних датчиків серед аналогічних пристроїв і значно розширює області і перспективи їх застосування.

AMR-ефект був відкритий у 1856 р В. Томсоном (лордом Кельвіном), а складна кількісна теорія ефекту була в цілому побудована в середині ХХ століття. AMR-ефект 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. Крім цього, суттєвим є і

те, під яким кутом тече струм по відношенню до деякого виділеного напрямку кристалічної решітки монокристалічного зразка, яке називають віссю легкого намагнічування (уздовж нього початково орієнтовані магнітні домени). Напрямок осі легкого намагнічування задається при виготовленні датчика методом осадження з підмагнічуванням.

Для створення магніторезисторів як магніточутливі елементи датчиків використовують тонкі плівки феромагнітних металів і сплавів (найчастіше пермалою) з метою збільшення швидкодії, завадостійкості, чутливості магнітних сенсорів, одержання великого опору та одноосьової анізотропії. При цьому товщина плівки в AMR-датчиках становить лише кілька десятків нанометрів. За цих умов плівка є однодоменною за товщиною, а вектор намагніченості лежить в площині плівки і може здійснювати поворот лише в цій площині. При цьому однодоменність за товщиною не означає однодоменність на всій площі плівки, хоча в деяких випадках ця ситуація реалізується.

В якості підкладки при виготовленні магніторезистивних елементів використовуються кремній, скло або кераміка. Останнім часом найчастіше використовується кремній, оскільки це дозволяє інтегрувати на єдину підкладку, крім магніторезистора, інші схемні напівпровідникові елементи.

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

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

Магніторезистивні датчики мають високу чутливість і дозволяють вимірювати незначні зміни магнітного поля. Ці датчики знайшли своє застосування в магнітометрах, магнітних сканерах, вимірах слабких полів, навігації, компенсації поля Землі, електронних і цифрових компасах, датчиках повороту, переміщення та акселерометрах.

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, достатнього для насичення. Такий режим називають ненасиченим.

Він використовується для побудови порогових та лінійних AMR-датчиків (датчиків з лінійною передавальною характеристикою).

Гістерезис (залежність $M(H)$) при AMR-ефекті також носить анізотропний характер: він зникає вздовж напрямку осі важкого намагнічування і яскраво виражений уздовж осі легкого намагнічування при напрямку струму, що збігається з цією віссю.

В режимі насичення напрямки 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 півки. На рис. 1 показано залежність зміни опору відносно мінімального як функції кута α для насиченого режиму.

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, яка досягається при $\alpha=90^\circ$.

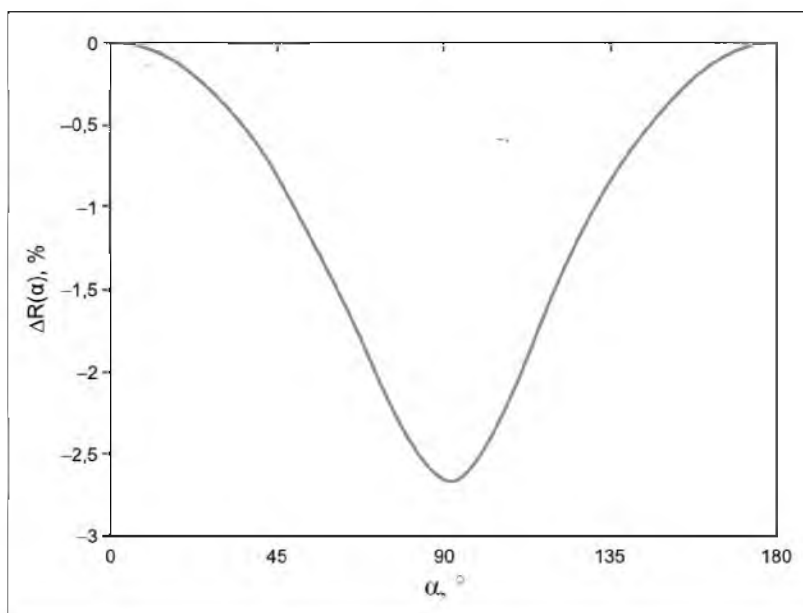


Рис. 1. Залежність зміни опору AMR-датчика в режимі насичення від кута між вектором напруженості магнітного поля і струмом

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 виміряна форма кривої $\Delta R(\alpha)$ відрізняється від наведеної. Цю залежність не можна використати для вимірювання напрямку магнітного поля, однак за нею можна визначати величину зовнішнього поля.

У випадку відносно слабких полів для повністю розмагніченого зразка спостерігається збільшення опору при паралельній орієнтації векторів струму та індукції (або напруженості) зовнішнього магнітного поля і зменшення – для взаємно перпендикулярного їх розташування. Після досягнення насичення в області парапроцесу опір феромагнетика повинен зменшуватися для обох конфігурацій [2]. Наявність спонтанної намагніченості зразка та гістерезису перемагнічення ускладнює характер залежності опору від величини зовнішнього магнітного поля (рис.2).

Характерною особливістю для повздовжнього і поперечного ефекту магнітоопору плівок пермалою 50Н (сплав FeNi з вмістом Fe 50%) є

немонотонний характер зміни опору в залежності від напруженості зовнішнього поля. На польових залежностях величини магнітоопору $\Delta R/R(0)$ (рис. 2) спостерігаються екстремуми (мінімум - для повздовжнього магнітоопору, максимум – для поперечного), які пов’язані з процесами перемагнічування плівки. Про це свідчить той факт, що при повторному намагнічуванні плівки в тому ж напрямку екстремум не спостерігається, а опір монотонно збільшується або зменшується, виходячи на насичення. Прийнято вважати [3], що величина напруженості зовнішнього поля, при якій спостерігається екстремум, рівна коерцитивній силі H_c зразка. При зменшенні величини поля до нуля плівка має деяку залишкову намагніченість i , як наслідок, для одержання мінімального опору потрібно прикласти поле зворотної полярності, щоб розмагнітити зразок.

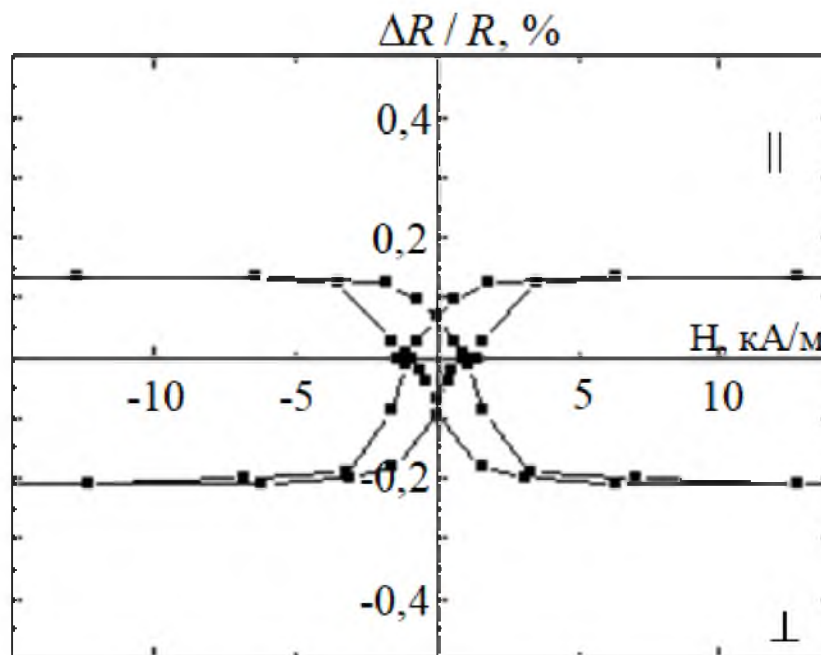


Рис. 2. Залежність опору плівок пермалою FeNi (вміст Fe \approx 50%) від напруженості зовнішнього магнітного поля.

Зважаючи на взаємозв’язок польової залежності опору плівок з процесами їх перемагнічування авторами було проведено дослідження доменної структури плівок FeNi та її зміни в процесі намагнічування зразка з одночасним вимірюванням магнітоопору плівок (рис. 3). Для спостереження

доменної структури плівок застосовувався магнітооптичний ефект Керра, який полягає в повороті на деякий кут φ площини поляризації світла при відбиванні від поверхні намагніченого феромагнетика. За рахунок різного кута повороту площини поляризації світла сусідніми доменами (в залежності від орієнтації їх магнітного поля) спостерігається світловий контраст між областями з різною намагніченістю [4]. На жаль, цей світловий контраст невеликий, бо в цілому світло, відбите від поверхні металу, не плоско-, а еліптично поляризоване.

При збільшенні напруженості магнітного поля до величини H_c (рис. 3, ділянка $A-B$) доменна структура плівки не зазнає видимих змін. При подальшому збільшенні величини зовнішнього магнітного поля на краях плівки спостерігається поява клиновидних з доменів протилежною (порівняно з наявними в плівці) полярністю намагніченості. Саме в цей момент опір зразка при повздовжньому МО має найменше значення.

Збільшення поля призводить до росту "нових" доменів, які поступово заповнюють площу плівки, проростаючи від її країв до центру (точка C). В подальшому "нові" домени зникаються (точка D), а в плівці залишаються лише невеликі доменні острівці "старої" магнітної структури.

Наступне збільшення поля приводить до повного їх зникнення (точка E) і переходу плівки в однодомений стан з протилежною початковою намагніченістю. Починаючи з цього моменту опір плівки практично перестає змінюватися (ділянка $E-F$) і виходить на насичення або навіть починає зменшуватися (аналогічно залежності масивного матеріалу в області парапроцесу).

При зворотному зменшенні напруженості магнітного поля до нуля перебудови доменної структури не спостерігається, а опір плівки зменшується, не повторюючи при цьому "прямий" (при зростанні напруженості магнітного поля) хід залежності $R(H)$ (рис.3 – пунктирна лінія). Таким чином, гістерезис магнітоопору пов'язаний зі зміною доменної структури плівки.

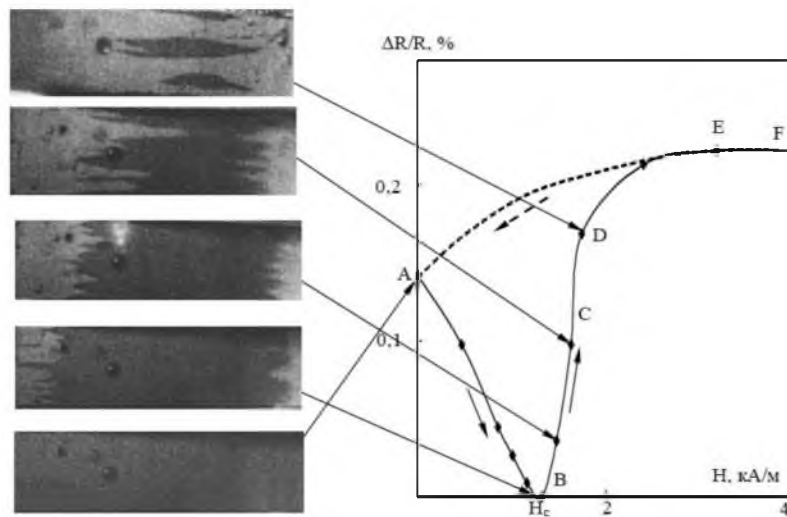


Рис. 3. Зв'язок повздовжнього магнітоопору та доменної структури для плівки пермалою 50н

Разом з тим такий взаємозв'язок зміни опору і доменної структури показує, що визначене за екстремумом на залежності $\Delta R/R(0)$ значення H_c є дещо заниженим, оскільки повністю розмагнічений стан плівки відповідає тій точці на середній частині ділянки В-Е, де площа протилежно намагнічених доменів однакова. Враховуючи різкий характер збільшення опору на цій ділянці та малий діапазон зміни напруженості магнітного поля, у якому відбувається перемагнічення, можна прийняти це значення напруженості магнітного поля за H_c . Однак, як відзначалося в роботі [5], точне співпадання величини H_c , одержаної з магніторезистивних вимірювань, та значення величини H_c , одержане прямими магнітними вимірюваннями можливе лише для плівок з прямокутною петлею гістерезису.

Якщо зменшити напруженість магнітного поля, не доводячи плівку до магнітного насичення, то її доменна структура зберігається в тому стані, який відповідав максимальному значенню напруженості магнітного поля, (тобто в плівці існують домени обох орієнтацій), і цей стан може зберігатись тривалий час. Для переведення такої плівки в однодомений стан її потрібно намагнітити до насичення в одному чи іншому напрямку.

Таким чином, експериментальне вивчення AMR-ефекту в тонких плівках

в сукупності з дослідженням доменної структури плівки вказує на тісний взаємозв'язок цих факторів. Для пояснення характеру зміни опору феромагнітної плівки в магнітному полі, що є важливим при створенні датчиків на AMR-ефекті (особливо при їх роботі в ненасиченому режимі), необхідно враховувати цей взаємозв'язок. Разом з цим вивчення зміни електричного опору в магнітному полі дає можливість оцінки ряду магнітних параметрів матеріалу, зокрема, його коерцитивної сили та поля, необхідного для насичення феромагнетика.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Борисов А. Современные АМР-датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей // Компоненты и технологии.- 2006.- №7.- С.65-70.
2. Вонсовский С.В. Магнетизм. / Вонсовский С.В. – М: Наука, 1971. – 1032 с.
3. Буравихин В.А. Практикум по магнетизму: уч. пособие / Буравихин В.А., Шелковников В.Н., Карабанова В.П. – М.: Высшая школа, 1979. - 197 с.
4. Сучасні методи дослідження речовини. Спеціальний фізичний практикум: навч. посіб. / [Лобода В.Б, Іваній В.С., Хурсенко С.М. та ін.]; за заг. ред. доц. В.Б. Лободи. – Суми: Університетська книга, 2010. – 259 с.
5. Буравихин В.А. Физика магнитных пленок / В.А. Буравихин, В.С. Христосенко. - [вып. 1]. - Иркутск: типография №1 Иркутского областного управления по печати, 1967. - 304 с.