

УДК 621.317.365

ДОСЛІДЖЕННЯ НАЯВНИХ МАГНІТОРЕЗИСТИВНИХ ЕФЕКТІВ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИСТРОЇВ НА ЇХ ОСНОВІ

Вунтесмері Вал.С., Витяганець А.І.

Розглянуто класифікацію пристроїв на основі магніторезистивних ефектів. Запропоновано використання цих ефектів у вимірjuвальних магніторезистивних перетворювачах енергії електромагнітного поля

Вступ. Постановка задачі

Тонкоплівкові магніторезистивні (МР) пристрої широко використовуються у різних областях науки і техніки: в авіаційній, космічній, автомобільній промисловостях, медицині, в системах охорони, пристроях пам'яті та зчитування, як гальванічні розв'язки, датчики магнітного поля т.ін. [1]. За останні кілька десятиліть було відкрито кілька нових МР ефектів: ефект анізотропії магнітоопору (AMR), ефект гігантського магнітоопору (GMR), спін-тунельний (STMR) та спін-вентильний (SVMR) МР ефекти, які представляють практичний інтерес бо з'являються при малих магнітних полях. На основі цих ефектів створено новий клас пристроїв, основними перевагами яких є енергонезалежність, невеликі розміри, можливість вимірювання як постійних, так і змінних магнітних полів від пікотесла до кількох тесла, температурна та радіаційна стійкість, технологічність. На характеристики таких пристроїв впливають параметри тонкоплівкових МР структур: наявність осей легкого і важкого намагнічування, поле магнітної анізотропії і коерцитивна сила магнітних плівок структури, коефіцієнт МР ефекту, енергія обмінної взаємодії між магнітними плівками, товщина та кількість магнітних і немагнітних шарів. Наведене обумовлює актуальність вивчення особливості практичної реалізації пристроїв на основі МР ефектів.

1. Пристрої на основі AMR-ефекту

На рис. 1 показана чутливість різних МР датчиків. Для великих магнітних полів (кілька тесла) найбільш широко використовуються напівпровідникові магніторезистори і GMR-магніторезистори, а для перетворення малих полів – AMR-магніторезистори. CMR-магніторезистори на окислах перовкситу з домішками марганцю з "колосальною зміною" магнітоопору широкого використання поки не знайшли. Залежність зміни величини опору анізотропної структури ΔR від кута φ між вектором намагніченості M відносно напрямку струму у феромагнетику I дорівнює:

$$\Delta R = (\Delta\rho/\rho)R \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

де $(\Delta\rho/\rho)$ - коефіцієнт магніторезистивного ефекту.

Дослідження багатошарових пермалоевих структур з розділювальним шаром (Ta) показало, що оптимальна кількість магнітних шарів дорівнює двом, а оптимальна товщина розділювального шару складає 3 – 4 нм. Збільшення числа магнітних і розділювальних шарів та їх товщини майже не

впливає на магнітні характеристики багатошарових структур [2]. У МР елементах пам'яті на основі *AMR*-ефекту використовуються дві однакові плівки, які перемагнічуються одночасно, що необхідно для динамічного зчитування записаної інформації. Таке рішення виправдано завдяки технологічній простоті отримання структур, надійності способів керування і неможливості використання статичного зчитування, через малу величину ефекту. Найчастіше *AMR*-ефект використовується

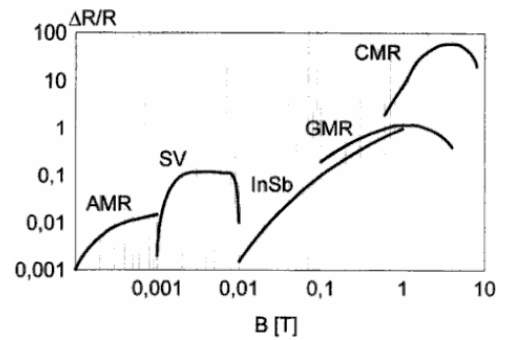


Рис.1

при створенні датчиків магнітного поля (для перетворення магнітного поля у зміну опору, а потім у зміну напруги або струму на виході).

На рис. 2 наведений МР вимірювальний перетворювач активної потужності, оснований на гальваноманітних явищах в тонких магнітних плівках. Перетворювач має два незалежні входи. Електричний вхід пов'язаний з електричним полем в лінії передачі або з напругою, прикладеною до перетворювача і магнітний вхід, який пов'язаний з магнітним полем лінії передачі або зі струмом, який протікає в ланцюзі. Сигнал параметричного множення U_0 знімається з кінців магнітрезистору. При створенні ватметра, плівку підключають до електричної мережі і розміщують у магнітному полі провідника зі струмом [3,4].

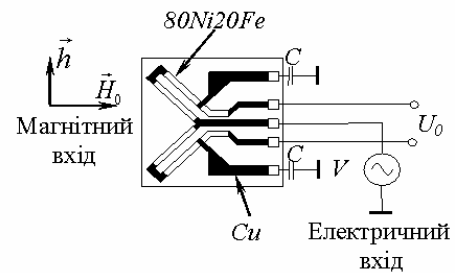


Рис. 2

2. Пристрої на основі *GMR*-ефекту

Ефект зміни опору майже на 115 % при 4,2 К під дією магнітного поля, який виникає в блоках, складених, наприклад, з тонких шарів заліза товщиною 3 нм і кобальту товщиною 4 нм (рис. 3) називають гігантським магнітоопором. Відносна зміна опору при цьому розраховується так:

$$(\Delta R / R)_{H=H_s} = (R_{H=0} - R_{H>H_s}) / R_{H>H_s}, \quad (2)$$

де $R_{H=0}$ - опір магнітрезистора при відсутності зовнішнього магнітного поля, $R_{H>H_s}$ - опір магнітрезистора при намагніченні його до насичення.

Багатошарова структура *GMR*-магнітрезистора має вигляд:

$$\text{ФП} / \text{НМ} / \text{ФП}, \quad (3)$$

де ФП – феромагнітна плівка (*FeNi*, *CoFe*, *FeNiCo*), НМ – розділювальна немагнітна плівка (*Cu*, *Fe*).

Розділювальна немагнітна плівка повинна знівелювати обмінну взаємодію, щоб магнітні плівки поводити себе незалежно. Недоліком матеріалів в яких виявлено подібний ефект є необхідність прикладення досить сильних магнітних полів насичення (понад 10 кЕ), потрібність у забезпеченні висо-

кої точності технологічних параметрів і товщин плівок, зокрема розділювальних. Товщина окремих шарів лежить в межах кількох нанометрів. Немагнітна мідь розділяє між собою окремі шари заліза або кобальту (рис. 3). Це розділення є настільки тонким, що шари кобальту зчіплюються і в результаті утворюється штучний антиферромагнетик. Зовнішні шари виготовленні з магнітом'яких матеріалів, які намагнічуються в напрямку дії зовнішнього магнітного поля, при цьому шари кобальту не змінюють напрям намагніченості під дією зовнішнього поля [5]. Спіни електронів у зовнішніх шарах також впорядковуються в напрямку дії зовнішнього поля. Середнє значення довжини вільного пробігу електронів зі спінами, які паралельні напрямку намагнічування штучних антиферромагнетиків, значно перевищує товщину шару в блоці. Ці електрони практично не розсіюються.

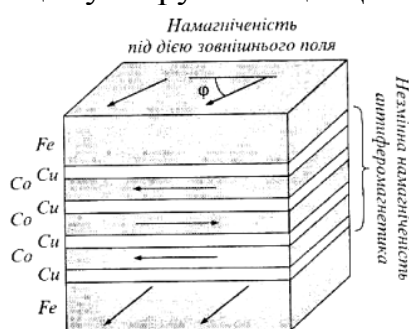


Рис. 3

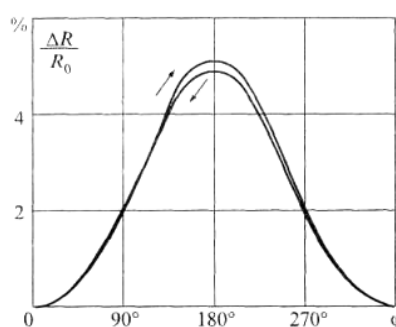


Рис. 4

З іншого боку, електрони з антипаралельним спіном практично повністю розсіюються всередині блока, і суттєво збільшують електричний опір блока. Найменшого розсіювання електрони зазнають у випадку, якщо зовнішні і внутрішні шари намагнічені в одному напрямку, у цьому випадку опір зразка мінімальний. Максимальний опір спостерігається у випадку, коли намагніченості зовнішніх і внутрішніх шарів антипаралельні. Тобто зміна опору зразка залежить не від величини магнітного поля, а від зміни напрямку дії поля, оскільки тільки кут між напрямками намагніченості визначає сумарний опір системи (рис. 4). Найбільш часто подібні структури використовуються в магнітометрах і компасах, перетворювачах струму, МР пристроях пам'яті з довільною вибіркою, головок зчитування тощо.

2.1. Пристрої на основі STMR-ефекту

STMR-ефект полягає у тому, що опір структури залежить від кута між векторами намагніченості сусідніх магнітних плівок і визначається великим опором тунельного переходу, який знижує величину тунельного струму, що протікає ортогонально площині плівки і розсіювану потужність.

На основі експериментальних даних було отримано, що спінова поляризація електронів пропорційна магнітному моменту ферромагнітних плівок.

Багатошарова структура STMR-магніторезистора має вигляд:

$$\text{ФП1} / \text{ШД} / \text{ФП2}, \quad (4)$$

де ФП1, ФП2 – зафіксована і рухома феромагнітні плівки, ШД – шар діелектрику (Al_2O_3 , Si).

Зміна величини анізотропії магнітоопору *STMR*-структури $\Delta\rho/\rho$ для фіксованої і рухомої сусідніх магнітних плівок має вигляд:

$$\Delta\rho/\rho = 2P_1P_2(1 - P_1P_2), \quad (5)$$

де P_1 , P_2 - поляризації зафіксованої і рухомої феромагнітних плівок.

Коефіцієнт ефекту для структури $CoFe/Al_2O_3/CoFe$ – 22 % [6].

На основі *STMR*-ефекту створені елементи пам'яті і датчики магнітного поля. Зараз проводяться дослідження по розробці *STMR*-транзисторів, які порівняно з їх напівпровідниковими аналогами, менш енергозалежні, радіаційностійкі і дозволяють об'єднання в одній технологічній операції їх виготовлення.

2.2. Пристрої на основі *SVMR*-ефекту

Багатошарова структура *SVMR*-магніторезистора має вигляд:

$$\text{Підкладка / Підшар / ФП / НМ / ФП / ФШ / ЗШ}, \quad (6)$$

де ФП – феромагнітна плівка ($FeNi$, $FeNiCo$), НМ – розділювальна немагнітна плівка (Cu , Ag , Au), ФШ – фіксує антиферомагнітний шар (γ - $FeMn$, $TbCo$, NiO), ЗШ – захисний шар (Ta).

ФШ створює обмінну анізотропію в шарі ФП2, внаслідок чого вектор намагніченості шару ФП2 може бути переорієнтований лише у великих магнітних полях (порядку 200 ерстед), тоді як шар ФП1 перемагнічується у слабких магнітних полях (менше 20 ерстед). Для пермалоевих або кобальтових *SVMR*-магніторезисторів у слабких магнітних полях $\Delta R/R$ дорівнює 5 – 10 %. У структурах, де ФШ відсутній, використовуються плівки ФП1 і ФП2 з різними коерцитивними силами.

Залежність зміни величини опору *SVMR*-структури ΔR від кута ϕ між вектором намагніченості фіксованої і вільної сусідніх магнітних плівок відносно напрямку струму у феромагнетику I має вигляд:

$$\Delta R = 0,5(\Delta\rho/\rho)R(1 - \cos\phi) \quad (7)$$

Струм у феромагнетику може протікати у площині плівки і перпендикулярно площині плівки. У першому випадку, опір плівки незначний і має місце планарний *SVMR*-ефект, у другому – опір структури визначається товщиною плівок, і тому дуже великий. Незважаючи на дещо більший коефіцієнт ефекту, у другому випадку, у техніці широкого використання він не знайшов через низькі температури при вимірюванні. Параметри *SVMR*-структури визначаються її конфігурацією, технологією виготовлення і магнітним відпалом, який використовується для підвищення температурної стабільності і збільшення величини коефіцієнта ефекту. *SVMR*-структури використовують у головках зчитування, датчиках магнітного поля, запам'ятовуючих елементах. Вимоги до *SVMR*-структур для запам'ятовуючих елементів відрізняються від вимог до структур для датчи-

ків і головок зчитування. Основні відмінності полягають у тому, що для запам'ятовуючих елементів потрібна стійкість записаної інформації і не важлива чутливість до магнітного поля. Це означає, що *SVMR*-структури для елементів пам'яті повинні мати підвищенні поля перемагнічування, які максимально повинні розрізнятися для вільної і зафіксованої плівок.

У МР елементах пам'яті на основі *SVMR*-ефекту використовуються плівки з різним значенням H_r . Зовнішнім магнітним полем, створюваним струмом в спеціальному провіднику і полем струму датчика, який протікає по плівці, перемагнічують тільки плівку з мінімальним H_r , що необхідно для статичного зчитування записаної інформації.

Висновки

Технологічний прорив щодо збільшення у 20 разів ємності носіїв інформації (до 400 Гбайт) за рахунок ущільнення запису інформації забезпечили *GMR*-структури, які мають високу чутливістю до магнітного поля при малому геометричному розмірі, що і дозволило скоротити розмір біта. На *SVMR*- і *STMR*-ефектах створені спінові транзистори, ведуться розробки по створенню спінових процесорів. За рахунок збільшення коефіцієнта ефекту в *SVMR*- і *STMR*-структурах порівняно з *AMR*-структурами можна суттєво підвищити точність перетворення вимірювальних МР перетворювачів активної потужності, підвищити їх швидкодію, збільшити динамічний діапазон сигналів, особливо в область підвищення рівнів потужності, провести ускладнення функціональних можливостей перетворювачів.

Література

1. Tumański S. Thin Film Magnetoresistive Sensors. – CRC Press, 2001. – 576 p.
2. Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьев А.М. Многослойные тонкопленочные магниторезистивные элементы. – Тула: РАН; Институт проблем управления 2001. – 186с.
3. Vountesmeri V. Magnetoresistive multipliers as a new base for watt-converters // IEEE. Transactions on instrumentation and measurement. – 1998. - № 5. – P. 1395 – 1398.
4. Вунтесмери Вал.С., Вытяганец А.И. Исследование частотной характеристики магниторезистивного измерительного преобразователя активной мощности низких частот // Известия вузов. Серия "Радиоэлектроника". – 2007. - № 12. – С. 45 – 48.
5. Фізичні основи електронної техніки / З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський, Б.А. Лукіянець та ін. – Львів: Бескид Біт, 2004. – 880 с.
6. Moodera J., Kinder L., Wong T., Meservey R. Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junction//Phys.Rev.Lett. 1995. V. 74. № 16.

Ключові слова: магніторезистивні перетворювачі, перетворювачі активної потужності, ферромагнітні плівки	
Вунтесмери Вал.С., Вытяганец А.И. Исследование имеющихся магниторезистивных эффектов и особенностей реализации устройств на их основе Рассмотрена классификация устройств на основе магниторезистивных эффектов. Предложено их использование в измерительных магниторезистивных преобразователях энергии электромагнитного поля.	Vountesmeri Val.S., Vytiaganets A.I. Research of present magnetoresistive effects and features of realization of devices on their bases Classification of devices on the basis of magnetoresistive effects is considered. Their use in the measurements magnetoresistive transformers of energy of the electromagnetic field on magnetic thin films is offered.