

Козлов О.А., Калита В.М., Решетняк С.О.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, Київ,
email: o.kozlov@kpi.ua*

МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ОПОРОМ СТРУКТУР З ГІГАНТСЬКИМ ТА ТУНЕЛЬНИМ МАГНЕТООПОРОМ ЗА ДОПОМОГОЮ СТРУМУ

Анотація. Розглянуті основні віхи розвитку сенсорів та комірок пам'яті на основі структур з гігантським та тунельним магнетоопором, а також концепти передачі спінового моменту та перемикача Кюрі.

Abstract. The key milestones in the development of sensors and memory cells based on giant and tunnel magnetoresistance structures are reviewed, along with the concepts of spin-transfer torque and the Curie switch.

Ключові слова: Спінтроніка, гігантський магнетоопір, тунельний магнетоопір, MRAM, STT-MRAM, перемикач Curie.

Keywords: Spintronics, giant magnetoresistance, tunnel magnetoresistance, MRAM, STT-MRAM, Curie switch.

У 1986–1988 роках П. Грюнбергом і А. Фертом були опубліковані праці, у яких описано результати дослідження багатошарових плівок Fe/Cr, зокрема відкриття обмінної взаємодії антиферомагнітного типу між шарами заліза та ефекту гігантського магнетоопору (ГМО) у таких структурах [1, 2]. Зазначені відкриття започаткували нову науково-технічну галузь — спінтроніку, яка стрімко розвивалася й відіграла важливу роль у мініатюризації систем запису та зчитування інформації [3].

У 1990-х роках було досягнуто низки значущих результатів як у фундаментальних, так і прикладних дослідженнях. До них належать спостереження аналогічних ефектів у великій кількості інших багатошарових структур, узагальнення наявних теоретичних уявлень, а також розробка простіших, швидших і ефективніших методів виготовлення таких плівок [4]. Крім того, було експериментально встановлено знакозмінну осцилюючу залежність обмінної взаємодії від товщини немагнітного прошарку [5].

У 1991 році опубліковано результати досліджень структур на основі Co/Cu, в яких спостерігалися значні значення ефекту ГМО. Саме ці зразки стали

основою для створення прототипів перших практичних систем на основі гігантського магнетоопору. Подальший розвиток цих ідей привів до формування концепції спінового вентиля — тришарової структури, в якій один із магнітних шарів є «фіксованим» (наприклад, за рахунок обмінного зв'язку з антиферромагнітною підкладкою), тоді як інший шар залишається «вільним» і здатен змінювати свою намагніченість під впливом зовнішніх чинників.

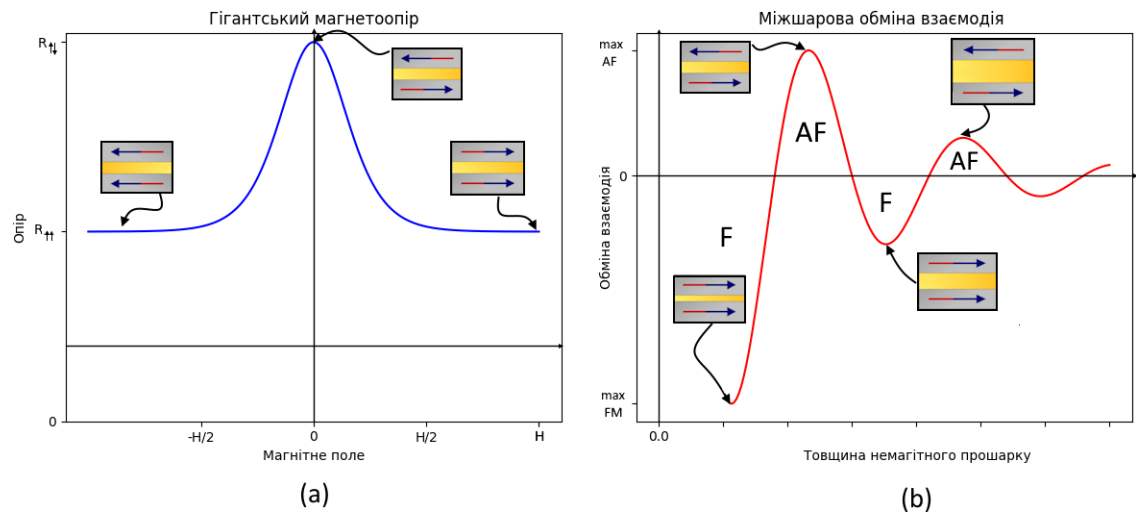


Рис.1 Схематичні зображення важливих залежності ГМО-сенсорів а–магнетоопір від прикладеного поля; б – залежність знаку та величини обмінної взаємодії від товщини немагнітного прошарку.

Спінові вентиля почали широко використовувати в зчитуючих головках магнітних дисків, що призвело до можливості збільшення щільності запису інформації на два порядки, і до 1997 року були повністю витіснені зчитуючі головки на основі анізотропного магнетоопору [3].

При низьких температурах (4-5 K) величина ефекту ГМО може досягти сотень відсотків [6], але за нормальних умов зазвичай складає 10-15%, що ускладнює використання ГМО-структур як комірок пам'яті, оскільки стани досить складно розрізнити електрично в умовах сильних шумів або неоднорідності зовнішніх умов. Тому при створенні магніторезистивної пам'яті (MRAM) використали структури на основі тунельного магнетоопору (ТМО), які являють собою два шари ферромагнетика, розділені тонким діелектриком. Розмір ефекту ТМО вже досягає декількох сотень відсотків, тому стани легко розрізнити електрично як «0» та «1».

Для запису використовують архітектуру cross point, де кожна комірка пам'яті знаходиться в вузлі двох взаємно перпендикулярних шин. Магнітного поля, яке створюється струмом однієї із шин, недостатньо для перемагнічування «вільного» шару структури ТМО,

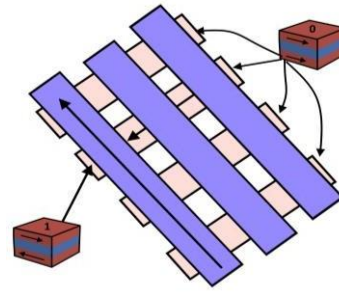


Рис. 2 Cross point архітектура

проте коли на структуру діє поле від двох шин (Рис.2), його достатньо для зміни значення, і таким чином забезпечується можливість запису інформації у потрібну комірку [7].

У 1996 році Дж. Слончевський продемонстрував можливість керування намагніченістю в магнітних багатошарових плівках за допомогою електричного струму через ефект переносу спінового моменту (spin transfer torque, далі — STT). Цей метод забезпечує вищу енергоефективність і швидкодію порівняно з перемиканням за допомогою зовнішнього магнітного поля. Його застосування є особливо ефективним у асиметричних структурах, де можна чітко виділити два шари: «закріплений» (референтний) шар зі стабільною намагніченістю та «вільний» шар, магнітний стан якого підлягає зміні.

Принцип дії STT полягає в тому, що під час проходження струму через магнітний шар формується спін-поляризований електронний потік у немагнітному прошарку. Цей потік переносить надлишковий спіновий момент, який передається вільному шару. За певних умов, зокрема при досягненні критичної щільності струму, спіновий момент, переданий від поляризованого струму, може змінити орієнтацію намагніченості вільного шару [7, 8].

Група В. Коренівського проводила дослідження багатошарових структур типу Fe/FeCr та Fe/Cr/FeCr, які функціонують як спінові вентиля, де немагнітний прошарок містить шар розбавленого феромагнетика або сам по собі є розбавленим феромагнетиком [9]. У таких структурах використовуються сплави FeCr, магнітний порядок яких, а отже й магнітні властивості, суттєво залежать від температури. Важливою перевагою є можливість задання температури фазового переходу ще на етапі виготовлення зразка шляхом варіювання концентрації заліза у сплаві. Зокрема, підібравши параметри так, щоб температура переходу була трохи вищою за кімнатну, можна реалізувати кероване перемикання структури зі стану низького опору в стан високого опору за рахунок локального нагрівання, викликаного джоулевым теплом [10].

Отже, нині відомо щонайменше три підходи до керування станами структур із гігантським або тунельним магнетоопором: за допомогою зовнішнього магнітного поля, переносу спінового моменту (STT) та джоулевого нагрівання, так званого «перемикача Кюрі».

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Grünberg, P., Schreiber, R., Pang, Y., Brodsky, M., & Sowers, H. (1986). Layered magnetic structures: Evidence for antiferromagnetic coupling of Fe layers across Cr interlayers. *Physical Review Letters*, 57(19), 2442–2445. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.57.2442>
- [2] Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Van Dau, F. N., Petroff, F., Etienne, P., Creuzet, G., Friederich, A., & Chazelas, J. (1988). Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Physical Review Letters*, 61(21), 2472–2475. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.61.2472>
- [3] Fert, A. (2008). Nobel lecture: Origin, development, and future of spintronics. *Reviews of Modern Physics*, 80(4), 1517–1530. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.80.1517>
- [4] Parkin, S. S., More, N., & Roche, K. P. (1990). Oscillations in exchange coupling and magnetoresistance in metallic superlattice structures: Co/Ru, Co/Cr, and Fe/Cr. *Physical Review Letters*, 64(19), 2304–2307. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.64.2304>
- [5] Parkin, S. S., & Mauri, D. (1991). Spin engineering: Direct determination of the Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida far-field range function in ruthenium. *Physical Review B*, 44(13), 7131–7134. <https://doi.org/10.1103/physrevb.44.7131>
- [6] Товстоли́ткін, О. І. (2014). *Фізичні основи спінтроніки: навчальний посібник*. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Вінниця: Нілан.
- [7] Bhatti, S., Sbiaa, R., Hirohata, A., Ohno, H., Fukami, S., & Piramanayagam, S. N. (2017). Spintronics based random access memory: A review. *Materials Today*, 20(9), 530–548. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.007>
- [8] Slonczewski, J. C. (1996). Current-driven excitation of magnetic multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 159(1–2), 1–7. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(96\)00062-5](https://doi.org/10.1016/0304-8853(96)00062-5)
- [9] Polishchuk, D. M., Tykhonenko-Polishchuk, Yu. O., Holmgren, E., Kravets, A. F., & Korenivski, V. (2017). Thermally induced antiferromagnetic exchange in magnetic multilayers. *Physical Review B*, 96(10), Article 104427. <https://doi.org/10.1103/physrevb.96.104427>

[10] Iurchuk, V., Kozlov, O., Sorokin, S., Zhou, S., Lindner, J., Reshetniak, S., Kravets, A., Polishchuk, D., & Korenivski, V. (2023). All-electrical operation of a Curie switch at room temperature. *Physical Review Applied*, 20(2), Article 024009. <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.20.024009>