

Корисна модель, що пропонується, належить до технічної галузі сучасної сенсорної техніки та інформаційних пристроїв і призначена для виготовлення чутливих елементів датчиків магнітного поля та середовища для запису інформації.

Розвиток сучасної наноелектроніки та спінтроніки пов'язаний із успіхами технології виробництва нових функціональних матеріалів і формуванням на їх основі сенсорів різного функціонального призначення, різних типів електронної пам'яті та інших пристроїв. Для задоволення постійно зростаючих потреб сучасної техніки потрібні пристрої з покращеними експлуатаційними характеристиками [1-3]. Серед основних вимог до сучасних електронних пристроїв можна відзначити: мініатюрність, механічну міцність, часову та температурну стабільність, багатофункціональність, простоту у застосуванні, мінімальне енергоспоживання [4, 5].

У 1991 році Дієні разом із співавторами [6] було запропоновано новий тип чутливих елементів у вигляді багат шарових наноструктур ("спіновий вентиль"), які характеризуються відносно високими значеннями магніторезистивного ефекту і чутливості в малих магнітних полях. У структурі "спіновий вентиль", так само як і у багат шарових періодичних структурах, для отримання ефекту гігантського магнітоопору необхідна зміна магнітної конфігурації системи. Особливість "спінового вентиля" полягає в тому, що для отримання потрібної конфігурації намагніченостей використовується не обмінна взаємодія, а явище обмінного зсуву, що виникає на межі феромагнетик (F)/антиферомагнетик (AF). Найпростіший "спіновий вентиль" складається із двох феромагнітних шарів (F), розділених немагнітним прошарком (FN) нанесених на підкладку (П). На фіг. 1-3 схематично показана структура трьох основних типів спінових вентилів: фіг. 1 - з верхнім розташуванням антиферомагнетика; фіг. 2 - з нижнім розташуванням антиферомагнетика; фіг. 3 - подвійний або симетричний "спіновий вентиль" [7]

Намагніченість одного феромагнітного шару пінінгована сусіднім шаром антиферомагнетика, тоді як вектор намагніченості другого шару змінює свій напрям під дією прикладеного зовнішнього магнітного поля. Оскільки взаємодія між феромагнітними шарами дуже мала, то зміна конфігурації намагніченостей із феромагнітного на антиферомагнітний відбувається в малих полях, що забезпечує високу магніторезистивну чутливість системи.

Існують також різні модифікації "спін-вентильних" структур. Особливий інтерес з точки зору прикладного використання викликають так звані "псевдо спін-вентильні" структури. Розглянемо особливості таких структур на прикладі тришарової плівки $\text{Co/Cu/Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, в якій $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ магнітом'який шар, а Co - магнітожорсткий. У такій структурі замість закріпленого за допомогою антиферомагнетика магнітного шару, використовується магнітожорсткий шар Co . Намагніченість $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ можна легко змінювати за допомогою слабого зовнішнього магнітного поля, не змінюючи при цьому напрям намагніченості магнітожорсткого шару [9-12]. Отже, основні функції "псевдо спін-вентильних структур" аналогічні "спіновим вентилям".

Описані вище структури мають ряд недоліків. По-перше, намагніченість одного феромагнітного шару пінінгована сусіднім шаром антиферомагнетика, що вимагає високої якості інтерфейсу (межі поділу) і, як наслідок, складних та дорогих методик отримання. По-друге, для забезпечення максимальної амплітуди ефекту гігантського магнітоопору (ГМО) (на рівні 2-5 %) товщина немагнітного прошарку складає $0,8 \leq d_N \leq 3$ нм, а магнітних шарів $0,4 \leq d_F \leq 3$ нм. При таких товщинах шарів чутливі елементи приладових структур мають низьку часову та температурну стабільність. Навіть при незначному підвищенні температури відбувається порушення структурної суцільності шарів (виникають магнітні "містки" між феромагнітними шарами), що призводить до руйнування антипаралельного впорядкування намагніченостей у сусідніх шарах і, як наслідок, до зникнення спін-залежного розсіювання електронів (ефекту ГМО). Таким чином, оптимальні товщини магнітних і немагнітних шарів обмежені [8].

Найбільш близьким за технічною суттю, який прийнятий за прототип, є функціональний металевий елемент гнучкої електроніки сплін-клапанного типу [13], який, по своїй суті, є чутливим елементом псевдо спін-вентильного типу сенсорного пристрою, який реалізований у вигляді паралелепіпеда із багат шарової металевої плівки, що складається з магнітних і немагнітних шарів металів, на діелектричній підкладці. Багат шарова металева плівка сформована з шару нижньої магнітожорсткої плівки, прошарку немагнітної плівки виконаної з Cu , шару магнітом'якої плівки, виконаної у вигляді мультишару $[\text{Co/Cu}]_n$ та шару верхньої магнітожорсткої плівки.

Недоліком зазначених структур спін-вентильного типу є технологічна складність їх отримання та низька температурна стабільність.

Так у загаданих структурах необхідно забезпечити наявність обмінної взаємодії між магнітними шарами. Для цього потрібно використовувати складні та дорогі технології для отримання шарів з мінімальними шорсткостями та товщинами немагнітних прошарків 0,8-1,2 нм. Структури з такими товщинами мають вузький інтервал робочих температур. Навіть незначне підвищення температури (до 400 K) призводить до порушення цілісності немагнітного шару, тобто існування магнітних "містків" між феромагнітними шарами може зруйнувати антипаралельне впорядкування намагніченостей у сусідніх шарах і приведе до зникнення спін-залежного розсіювання електронів (ефекту ГМО).

В основу корисної моделі поставлена задача з підвищення температурної стабільності та розширення інтервалу робочих температур до 100-600 К.

Поставлена задача вирішується тим, що чутливий елемент псевдо спін-вентильного типу сенсорного пристрою, який має вигляд паралелепіпеда, що складається з підкладки та послідовно розташованих шарів: шар нижньої магнітожорсткої плівки, прошарок немагнітної плівки, шар магнітом'якої плівки та шар верхньої магнітожорсткої плівки, згідно корисної моделі, між шаром магнітом'якої плівки та шаром верхньої магнітожорсткої плівки розташований додатковий другий немагнітний прошарок, при цьому підкладка виконана з полірованого скла товщиною 2 мм, нижній і верхній шар магнітожорсткої плівки з Co 25 нм, перший та другий немагнітні прошарки з плівки Cu 5 нм, шар магнітом'якої з плівки $\text{Fe}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}$ 25 нм.

Завдяки тому, що в чутливому елементі псевдоспін-вентильного типу сенсорного пристрою два немагнітні шари забезпечують незалежне перемагнічування магнітом'якого шару можлива зміна магнітної конфігурації структури. Після узагальнення результатів досліджень магніторезистивного ефекту в тришарових плівках в умовах впливу температури (інтервал термооброби, температура підкладки, температура вимірювання) та магнітного поля були вибрані як магнітожорсткі шари - Co ($d_{F1}=25$ нм), магнітом'який шар - сплав $\text{Fe}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}$ та як немагнітний прошарок - Cu ($d_N=5$ нм). Такий вибір металів забезпечує запропонованій структурі дві основні переваги: висока чутливість навіть до незначних змін зовнішнього магнітного поля та висока термостабільність. Так, відсутність обмінної взаємодії між магнітними шарами дозволяє перемагнічувати магнітом'який шар (змінювати магнітну конфігурацію чутливого елемента) в полях до 3 мТл. Збільшення товщини прошарків міді до 5 нм та феромагнітних шарів $\text{Fe}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}$ до 20 нм дозволяє також підвищити температуру термомагнітної обробки до 550 К зі збереженням індивідуальності всіх шарів.

Суть запропонованої корисної моделі пояснюється схемами, де наведено на:

- фіг. 1 схематичне зображення "спінових вентилів" з верхнім розташуванням антиферомагнетика;
- фіг. 2 - схематичне зображення "спінових вентилів" з нижнім розташуванням антиферомагнетика;
- фіг. 3 - схематичне зображення симетричного "спінового вентиля";
- фіг. 4 - схематичне зображення функціонального елемента "псевдо спін-вентильного" типу;
- фіг. 5 - залежність величини магнітоопору (МО) від індукції зовнішнього магнітного поля для плівкових структур $\text{Co}(25)/\text{Cu}(5)/\text{Fe}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}(25)/\text{Cu}(5)/\text{Co}(25)/\text{П}$ в поздовжній геометрії вимірювання;
- фіг. 6 - частинна залежність величини МО від індукції зовнішнього магнітного поля для плівкових структур $\text{Co}(25)/\text{Cu}(5)/\text{Fe}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}(25)/\text{Cu}(5)/\text{Co}(25)/\text{П}$ в поздовжній геометрії вимірювання.

Конструктивно функціональний елемент спін-вентильного типу (фіг. 4) складається з тонкої металевої багатшарової плівки у вигляді паралелепіпеда наступної будови: 1 - підкладка поліроване скло товщиною 2 мм; 2 - плівка Co (25 нм) - магнітожорсткий шар намагніченістю M_1 ; 3 - плівка Cu (5 нм) - перший немагнітний прошарок; 4 - плівка $\text{Fe}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}$ (25 нм) - магнітом'який шар намагніченістю M_2 ; 5 - плівка Cu (5 нм) - другий немагнітний прошарок, 6 - плівка Co (25 нм) - другий магнітожорсткий шар намагніченістю M_1 .

Функціональність такої структури забезпечується підібраними характерними магнітними характеристиками, товщинами окремих шарів та режимами їх термооброби. Це обумовлює чутливість електричного опору функціонального елемента до орієнтації та величини індукції зовнішнього магнітного поля та його високу термічну стабільність.

Для формування функціонального елемента "псевдо спін-вентильного" типу використовують електронно-променевий (для шарів Co та $\text{Fe}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}$) та терморезистивний (для шарів Cu) методи випарування. Конденсація шарів здійснюється на діелектричну підкладку у вакуумній установці типу ВУП-5М (тиск залишкової атмосфери $p=10^{-3}\text{-}10^{-4}$ Па). Швидкість осадження становила $\omega=0,5\text{-}1$ нм/с. Контроль фазового складу та структури зразків проводять із використанням електронного мікроскопа ПЕМ-125К. Товщину окремих шарів контролюють за допомогою кварцового резонатора в процесі конденсації. Для забезпечення термічної стабільності фізичних властивостей зразки відпалюють в умовах надвисокого безмасляного вакууму при температурі $T_b = 550$ К.

Дослідження гігантського магнітоопору запропонованих елементів проводять в умовах надвисокого безмасляного вакууму при кімнатній температурі у постійному магнітному полі до 200 мТл. У процесі вимірювання вектор густини струму направляють паралельно площині зразка, а вимірювання магнітоопору здійснювалося у двох геометріях - поздовжній (лінії магнітної індукції направлені вздовж напрямку вектора густини струму) та поперечній (лінії магнітної індукції направлені перпендикулярно напрямку вектора густини струму).

Величина гігантського магнітоопору визначається за співвідношенням: $\delta = \Delta R/R_{AP} = (R_P - R_{AP})/R_{AP}$,

де R_P і R_{AP} - опір зразка при паралельній та антипаралельній конфігурації намагніченостей магнітом'якого та магнітожорстких шарів. За отриманим максимальним значенням ГМО розраховувалася чутливість зразків до магнітного поля за формулою:

$$S_B = |GMO_{\max}/\Delta B|,$$

де $GMO_{\max}$ - амплітудне значення магнітоопору;

ΔB - зміна магнітної індукції від поля насичення B_s до поля розмагнічування.

На фіг. 5, 6 наведено залежність величини МО від індукції зовнішнього магнітного поля для плівкових структур Co/Cu/Fe_{0.5}Ni_{0.5}/Cu/Co/П в поздовжній геометрії вимірювання. Польові залежності магнітоопору (фіг. 5) в магнітних полях із максимальною індукцією до 200 мТл мають ізотропний характер (реалізується спін-залежне розсіювання електронів).

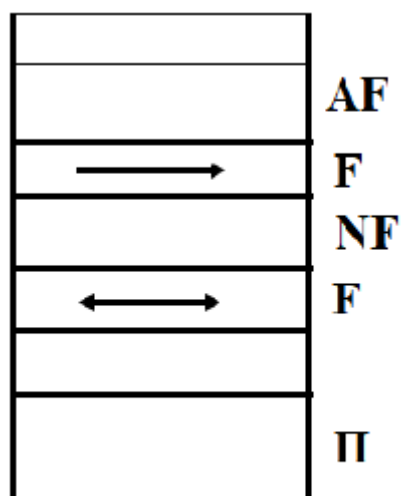
У випадку, коли частина магніторезистивної петлі, виміряна в полях, менших за поле перемагнічування магніторезистивного шару (виміряна в діапазоні полів 0 до 3 мТл (фіг. 6) залежність МО від індукції магнітного поля має практично безгістерезисний характер, що є наслідком взаємодії магніторезистивного та магнітом'якого шарів через немагнітні прошарки. Величина ізотропного магнітоопору при цьому суттєво не відрізняється від МО у випадку повної петлі магніторезистивного гістерезису і складає величину 1-1,5 %. Це забезпечує чутливість до магнітного поля на рівні 80-90 %/Тл.

Другою перевагою запропонованого чутливого елемента є збільшення температурної стабільності. Збільшення кількості інтерфейсів призводить і до незначного збільшення величини ізотропного МО. Це дає можливість збільшувати товщину немагнітних прошарків до 10 нм зберігаючи амплітуду магніторезистивного ефекту близько 1 %. Збільшення товщини прошарків дозволяє також підвищити температуру термомагнітної обробки до 550 К зі збереженням індивідуальності всіх шарів, що дозволяє розширити і діапазон робочих температур відповідних елементів.

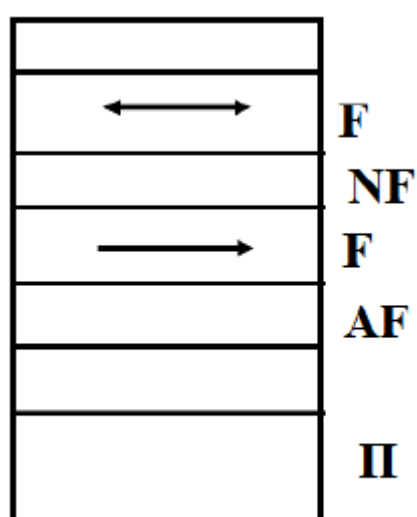
Таким чином, все вищесказане говорить про те, що запропоновані подвійні "псевдоспін-вентильні структури", можуть бути використані для виготовлення чутливих елементів датчиків магнітного поля та середовища для запису інформації.

Джерела інформації:

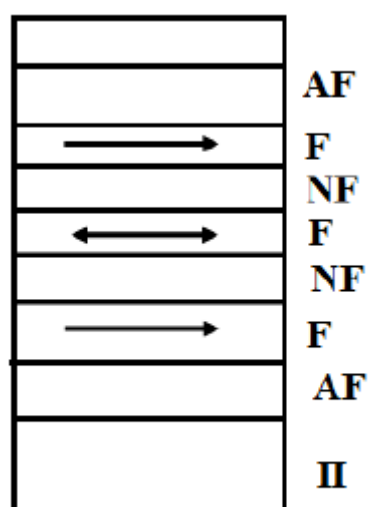
1. W.-B. Wu, J. Kasiuk, J. Przewoźnik et al. Observation of higher-order contribution to anisotropic magnetoresistance of thin Pt/[Co/Pt] multilayered films // *Applied Surface Science*. (2024. - Vol. 648. - P. 158957. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158957>
2. K. Rawat, A. Sharma, R.K. Brajpuriya et al. Enhanced perpendicular magnetic anisotropy through thermal phase transformation in Co/Pd/Ta multilayers // *Applied Surface Science*. - 2025. - Vol. 697. - P. 162952. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.162952>
3. A. Kaul, Gopika C.T., U.P. Borole et al. Influence of synthetic antiferromagnetic coupling on magnetic and tunnelling magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB tunnel junctions // *Physica B: Condensed Matter*. - 2025. - Vol. 710. - P. 417189. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2025.417189>
4. M. Kac, A. Dobrowolska, A. Polit et al. The influence of the atomic scale interface roughness on the GMR effect in Fe/Cr multilayers // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2020. - Vol. 824. - P. 153877. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153877>
5. P.D. Kulkarni, T. Nakatani, Z. Li et al. The effect of NiFeCr seed layer composition on the giant magnetoresistance properties of [FeCoNi/Cu] multilayers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. - 2022. - Vol. 560. - P. 169562. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169562>
6. B. Dieny, V.S. Speriosu, S.S.P. Parkin et al. Giant magnetoresistance in soft ferromagnetic multilayers // *Physical Review B*. - 1991. - Vol. 43, № 1. - P. 1297-1300. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.43.1297>
7. Coehoorn R. Giant magnetoresistance and magnetic interactions in exchange-biased spin-valves, *Handbook of magnetic materials*, edited by K.H.J. Buschow - Amsterdam: Elsevier B.V., 2003. - P. 1-199.
8. I. Bakonyi, P. Simon, B.G. Toth et al. Giant magnetoresistance in electrodeposited Co-Cu/Cu multilayers: origin of the absence of oscillatory behavior // *Physical Review*. - 2009. - Vol. B79. - P. 174421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.174421>
9. B. Anwarzai, V. Ac, S. Luby et al. Pseudo spin-valve on plastic substrate as sensing elements of mechanical strain // *Vacuum*. - 2010. - Vol. 84. - P. 108-110. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.04.070>
10. T.T.B. Lan, H.-J. Jane, W.-Y. Ding et al. Huge giant-magnetoresistance of Co/Ru/L11-CoPt multilayer pseudo-spin valve // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2023. - Vol. 938. - P. 168441. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168441>
11. B. Xiaofang, G. Liging, M. Xiaogan et al. Change of coercivity of magnetic thin films with non-magnetic layers and applications to spin valve // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. - 2004. - Vol. 268, No 3. - P. 321-325. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(03\)00542-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(03)00542-0)
12. K.B. Fathoni, Z. Li, T. Nakatani et al. Epitaxial all-bcc-Co50Fe50/Cu/Co50Fe50 current-in-plane giant magnetoresistive spin-valves on Si(0 0 1) substrate // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. - 2022. - Vol. 551. - P. 169154. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169154>
13. Пат. 136613 У Україна, МПК G01R 33/09 (2006.01). Функціональний металевий елемент гнучкої електроніки спін-клапанного типу / Ю.М. Шабельник, І.В.Чешко, А.М. Логвинов, О.П. Ткач, С.І. Проценко (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. - № u201902456; заявл. 13.03.2019; опубл. 27.08.2019, бюл. № 16. Режим доступу: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/78837/1/136613_Shabelnyk.pdf



Φir. 1



Φir. 2



Φir. 3

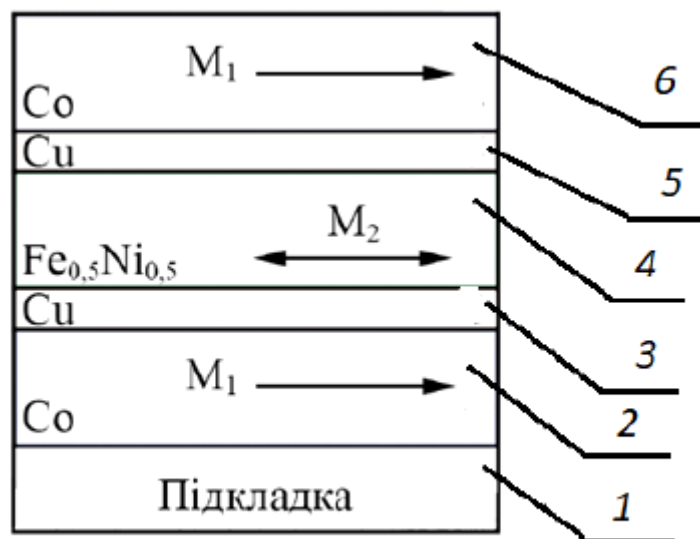


Fig. 4