

# **Функціональні матеріали для високоенергетичної електроніки**

## **Лекція 13**

- Використання наноматеріалів для створення приладів. Основні області застосування наноматеріалів і можливі обмеження. Приладові елементи на основі наноматеріалів. Магніторезистивний ефект. Спін-вентильні структури
- 1. Основні області застосування наноматеріалів і можливі обмеження
- **Конструкційні матеріали:**
- Наноструктурні об'ємні матеріали відрізняються великою міцністю при статичному і втомному навантаженні, а також твердістю в порівнянні з матеріалами зі звичайною величиною зерна. Тому основний напрямок їх використання в даний час - це використання в якості високоміцних і зносостійких матеріалів. Так межа текучості збільшується в порівнянні зі звичайним станом в 2,5-3 рази, а пластичність - або зменшується дуже незначно, або для Ni3Al зростає в 4 рази.
- Композити армовані вуглецевими нановолокнами і фулеренами розглядаються як перспективні матеріали для роботи в умовах ударних динамічних дій, зокрема для броні і бронезилетів.
- **Інструментальні матеріали:**
- Інструментальні сплави з нанозерном є, як правило, більш стійкими в порівнянні зі звичайним структурним станом. Нанопорошки металів з включеннями карбідів використовують в якості абразивного та полірувального матеріалу на кінцевих стадіях обробки напівпровідників і діелектриків.
- **Триботехника[1]:**
- Наноструктурні багатошарові плівки складного складу на основі кубічного VN, C3N4, TiC, TiN, Ti (Al, N), що володіють дуже високою або ультрависокою (до 70 ГПа) твердістю добре зарекомендували себе при терті ковзання (*трении скользяния*), в тому числі ряд плівок - в умовах ударного зносу.

- Повідомляється про розробку надтвердих нітридних плівок з наноструктурою; відзначаються хороші триботехнічні властивості плівок з аморфною наноструктурою з вуглецю і нітриду вуглецю, а також з TiC, TiN і TiCN.
- Як самозмащувальні покриття для космічної техніки пропонуються багатофазні наноструктурні покриття на основі TiB<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub> з твердістю 20ГПа і з коефіцієнтом тертя ковзання по сталі 0,05. Металеві нанопорошки додають до моторних мастил для відновлення поверхонь, що труться.

**[1]** Триботехніка - наука про контактну взаємодію твердих тіл при їх русі, що охоплює весь комплекс питань тертя, зношування й змащення машин.

- **Ядерна енергетика:**

- У США і можливо в інших країнах до теперішнього часу наноматеріали використовуються в системах поглинання ВЧ- і рентгеновського випромінювань. Таблетки ТВЕЛів **[1]** (тепловиділяючих елемент) виготовляються з ультрадисперсних порошоків UO<sub>2</sub>, а в термоядерній техніці використовуються мішені для лазерно-термоядерного синтезу з ультрадисперсного берилію.
- Рукавички, фартухи і інша захисний одяг з гуми або штучних матеріалів з добавками ультрадисперсного свинцевого наповнювача при однаковому ступені захисту в чотири рази легше звичайної захисного одягу.
- **Електро-магнітний та електронна техніка:**
- Хороший комплекс магнітних характеристик деяких наноматеріалів (залізо в поєднанні з шарами халькогенідів) робить перспективним їх використання для записуючих пристроїв. Плівкові наноматеріали з плоскою поверхнею і поверхнею складної форми з магніто-м'яких сплавів використовують для відеоголовок магнітофонів, де вони істотно перевершують по експлуатаційним властивостям традиційні матеріали.

- З'єднання вуглецевих нанотрубок з різною хіральністю (*тобто скрученістю кристалічної решітки відносно осі трубки*) утворює нанодіод, а трубка, що лежить на поверхні окисленої кремнієвої пластини - канал польового транзистора.
- [\[1\]](#) Тепловидільний елемент (ТВЕЛ) — головний конструктивний елемент активної зони ядерного реактора, в якому знаходиться ядерне паливо. У ТВЕЛлах відбувається ділення важких ядер  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  або  $^{233}\text{U}$ , що супроводжується виділенням теплової енергії, яка потім передається теплоносію.
- **Медицина і біотехнологія:**
- Важливою сферою застосування чистих наноструктурних матеріалів, зокрема  $\text{Ti}$ , є використання їх в медичних цілях - як імплантантів, протезів і в травматологічних апаратах. Причиною є поєднання високих механічних властивостей (на рівні складно легованих сплавів) з високою біологічною сумісністю чистого металу. Наноструктурні плівки вуглецю і композиційні наноплівки на основі вуглецю і  $\text{Si}$ ,  $\text{SiO}_x$ ,  $\text{SiN}_x$  мають гарну біосумісність, хімічну, термічну і механічну стійкість і тому їх перспективно використовувати для вузлів біосенсорів, протезів і імплантантів. Нанопорошки лікарських препаратів використовуються в медикаментах швидкого засвоєння і дії для екстремальних умов (поранення при катастрофах і бойових діях).
- **Обмеження у використанні наноматеріалів**
- Виявилось, що деякі матеріали з нанорозмірним зерном відрізняються крихкістю. У ряді випадків, в т.ч. при використанні методів інтенсивної пластичної деформації, вдається знизити прояв цього неприємного ефекту, наприклад для нанокристалічних міді, титану і титанових сплавів, інтерметаліду  $\text{Ni}_3\text{Al}$ .

- При формуванні виробів з нанопорошків досить гостро постає також проблема комкування (злипання наночастинок) в агломерати, що може ускладнити отримання матеріалів із заданою структурою та розподілом компонентів.
- **2 Приладові елементи на основі наноматеріалів**
- Дослідження плівкових матеріалів на основі металів спрямовані на встановлення особливостей структурно-фазового складу та їх кореляції з електричними і гальваномагнітними властивостями з точки зору практичного застосування таких систем у галузях сучасної магніто-електроніки, спінтроніки і сенсорної техніки. Для створення нових магнітонеоднорідних плівкових наноматеріалів використовують багатошарові плівкові системи з провідними або діелектричними немагнітними шарами; дво- та трикомпонентні плівкові сплави; гранульовані плівки на основі феромагнітних металів та матеріали із перпендикулярною магнітною анізотропією (**ПМА**), які є перспективними для формування елементів спінтроніки та носіїв інформації із високощільним магнітним записом.
- Під дією зовнішнього магнітного поля в плівкових матеріалах виникають гальваномагнітні ефекти, до яких відносяться магнітоопір (**МО**), гігантський магнітоопір (**ГМО**), ефект Холла, анізотропний магнітоопір, ефекти Еттінгсгаузена, Нернста та Рігі-Ледюка.
- Нові функціональні магнітні матеріали з покращеними магнітними, електрофізичними та високостабільними фізичними характеристиками використовують для підвищення щільності запису інформації та створення чутливих елементів багатофункціональних сенсорів (температури, магнітного поля, тиску тощо). Схема розвитку технологій виготовлення магнітних носіїв наведена на рис. 1. Основна увага дослідників магнітних властивостей функціональних матеріалів приділяється самовпорядкованим системам (FePd, FePt, CoPd, та ін.), в яких реалізується ПМА і можливе зменшення розмірів елементарної комірки, з точки зору їх застосування як запам'ятовувальних пристроїв.

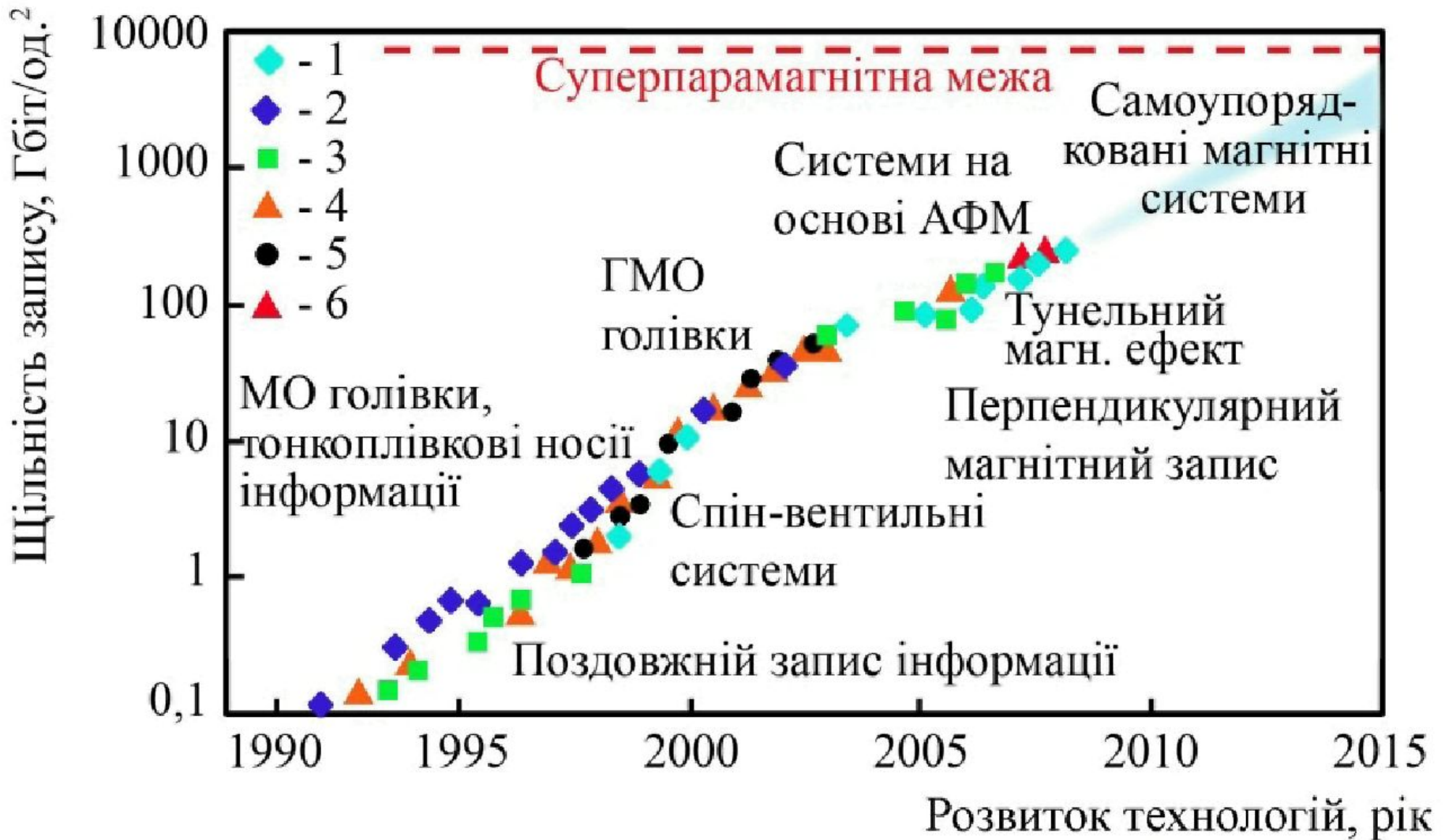


Рис. 1. Тенденція збільшення щільності магнітних носіїв інформації. Світові фірми-виробники: 1 – Hitachi; 2 – IBM; 3 – Seagate; 4 – Toshiba; 5 – Fujitsu; 6 – Samsung (підрозділ Western Digital, компанія HGST, в 2014р анонсувала випуск 10 Тб жорсткого диска)

- Анізотропія - відмінність властивостей середовища у різних напрямках. Відповідно в магнітних середовищах існують осі легкого і важкого намагнічування. Під час розроблення пристроїв на базі таких матеріалів необхідно враховувати, що зменшення товщини окремих шарів мультишару приводить до активних процесів утворення т. р. біля інтерфейсів і можливого часткового переходу  $\alpha$ -Fe у немагнітну фазу. Проблему суперпарамагнітної межі - зміни магнітних властивостей під впливом термічного дрейфу та високого значення коерцитивної сили - можна вирішити використовуючи матеріали, що складаються шарів феромагнетику, розділених тонким немагнітним із прошарком, зміна товщини якого приводить до осциляційної залежності магнітоопору. Вищезазначений ефект спостерігається у мультишарах, що складаються із по чергово нанесених феромагнітного (Co, Fe, Ni) і немагнітного шарів (Cu, Cr, Ag), де має місце антиферомагнітна взаємодія, що проявляється у гігантському магнітоопору.
- **3. Магніторезистивний ефект**
- Під дією зовнішнього магнітного поля траєкторія електронів провідності змінюється внаслідок дії сили Лоренца. У випадку тонкопліткових матеріалів відбувається зміна середньої довжини вільного пробігу електронів (**СДВП**), коефіцієнтів дзеркальності, відбиття, проходження межі зерна та інтерфейсу. Як наслідок, на величину магнітоопору та гігантського магнітоопору впливають поверхневе та зерномежове розсіювання електронів, поведінка яких відрізняється від електронів за відсутності зовнішнього магнітного поля.
- Явище ГМО-ефекту полягає у зміні електричного опору внаслідок переорієнтації магнітних моментів феромагнітних шарів під дією зовнішнього магнітного поля (рис. 2), не залежить від напрямку прикладеного магнітного поля, а відбувається при зміні напрямку намагніченості в магнітних шарах від антипаралельного (антиферомагнітна взаємодія) до паралельного (феромагнітна взаємодія) під дією зовнішнього магнітного поля. Явище ГМО спостерігається не лише в мультишарах, а й у гранульованих сплавах, у т. ч. пліткових.

- Електронна зонна структура, ймовірно, найбільш важлива і визначає спін-залежну провідність, а також відповідає за ГМО-ефект у багатошарових структурах із магнітним упорядкуванням.

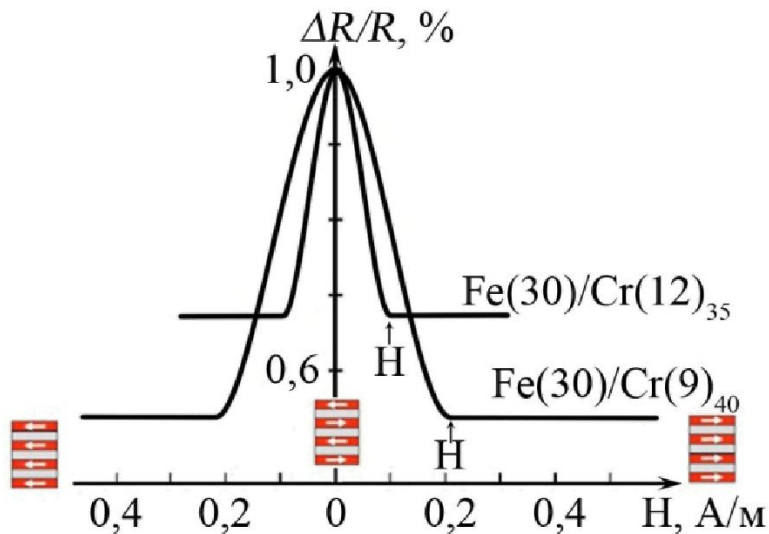


Рис. 2. Ефект ГМО, що реалізується в плівковій системі Fe(30 Å)/Cr(x)н/П: x = 9, 12 Å

Фізичний механізм ГМО пов'язаний із спін-залежним розсіюванням електронів на домішках, наприклад, Cr на межах поділу в системі Fe/Cr. Розсіювання залежить від орієнтації спіну електрона щодо магнітних моментів атомів. Звичайно передбачається, що електрони провідності мінімально взаємодіють з атомами, чий магнітний момент має паралельний напрямок відносно їх спіну, і максимально, якщо вони антипаралельні. Взаємодія також буде сильною в парамагнітному стані, в якому магнітні моменти атомів спрямовані хаотично, без виділеного напрямку намагніченості. Для хороших провідників таких як золото або мідь, рівень Фермі знаходиться всередині гібридизованої *sp*-зони, а *d*-зона повністю заповнена.



У феромагнетиках спостерігається інша ситуація, у них зонна структура являє собою  $s$ - і  $d$ -зони, що перекриваються при енергії, яка дорівнює енергії Фермі. В результаті обмінної взаємодії у феромагнітних металах  $d$ -зона для електронів із протилежно спрямованими спінами розщеплюється, внаслідок цього щільність станів для спінів спрямованих вниз, буде відрізняться від щільності станів для спінів, спрямованих вгору, як це схематично показано на рис. 3.

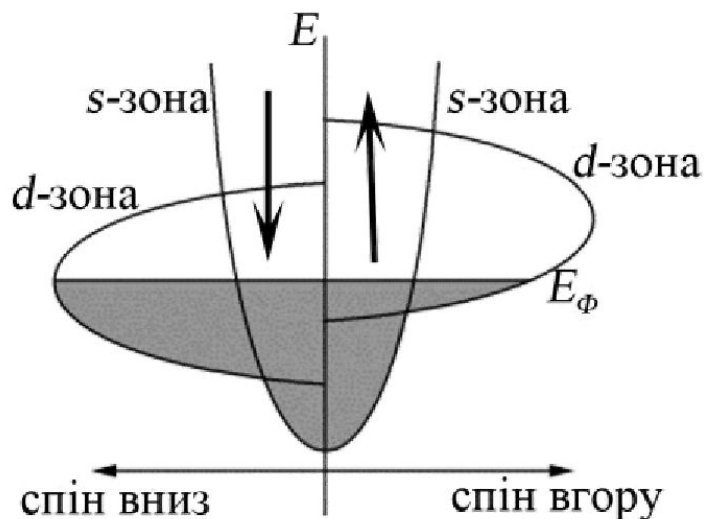


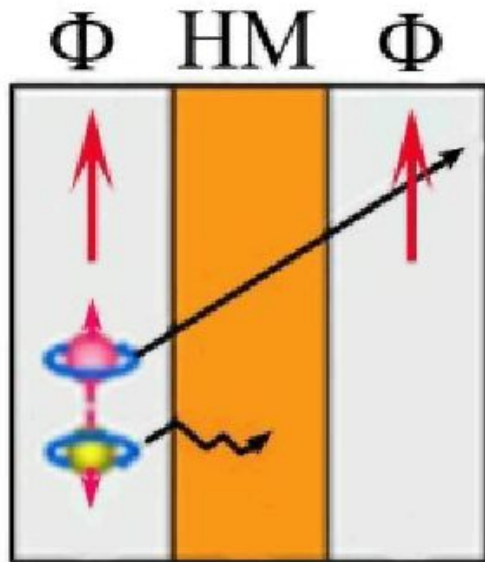
Рис. 3. Схематичне зображення щільності електронів станів Fe при різній орієнтації спінів

Рівень Фермі для основного напрямку спіну знаходиться всередині  $sp$ -зони та рух електронів у феромагнетикі подібний до руху в немагнітному металі. Спін-залежне розсіювання у феромагнетиках відбувається при переходах електронів провідності між нерозщепленою  $4s$  і розщепленою  $3d$  зонами. Для неосновного напрямку спінів електронів  $sp$ - і  $d$ -зони є гібридизованими, а рівень Фермі лежить усередині  $d$ -зони. Гібридизована  $spd$ -зона феромагнетиків характеризується високою щільністю станів, що приводить до зменшення СДВП електронів із неосновним напрямком спіну порівняно з основним.

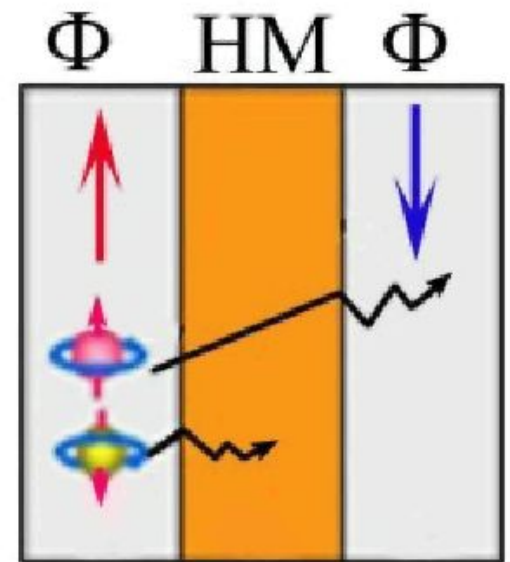
- Взаємна орієнтація магнітних моментів двох сусідніх магнітних шарів залежить від товщини проміжного немагнітного шару і коливається від паралельної (ферромагнетик) до антипаралельної (антиферромагнетик) як функція товщини немагнітного шару. Це явище називається осцилюючою обмінною взаємодією. У результаті такого зв'язку МО коливається при зміні товщини немагнітного шару. Ефект ГМО має місце лише для тих значень товщини немагнітного шару, для яких обмінна взаємодія з проміжним шаром достатня для переорієнтації магнітних моментів магнітних шарів у антипаралельний стан. Зі збільшенням величини магнітного поля МО поступово зменшується. Це пов'язано з тим, що магнітне поле, яке має тенденцію вирівнювати магнітні моменти ферромагнітних шарів, повинно подолати обмінну взаємодію, спрямовану на антипаралельне розміщення моментів (для даної товщини немагнітного шару). Повна орієнтація магнітних моментів в одному напрямку досягається лише в області поля насичення. В таблиці 1 наведені значення величини ГМО-ефекту, що відбувається в мультишарах на основі різних металів.
- На рис. 4 проілюстровано механізм збільшення опору тришарової плівкової системи при зміні орієнтації векторів намагніченості в магнітних шарах. У разі паралельної орієнтації векторів намагніченості магнітних шарів (рис. 4 а) при проходженні струму електрони із спінами, орієнтованими паралельно вектору намагніченості, не будуть зазнавати значного розсіювання при проходженні інтерфейсу та об'єму шарів, а будуть розсіюватись електрони із спінами, спрямованими антипаралельно вектору намагніченості. При антипаралельній орієнтації векторів намагніченості магнітних шарів (рис. 4 б) розсіювання будуть зазнавати всі електрони, тому опір плівки збільшиться порівняно з попереднім випадком.

Таблиця 1 Залежність гігантського магнетоопору (ГМО) від матеріалів плівкової системи

<b>Зразок</b>	<b><math>\Delta\rho/\rho_{\uparrow\uparrow}</math>, (%)</b>
<b>Fe/Cr</b>	<b>108</b>
<b>Co/Cu</b>	<b>115</b>
<b>NiFe/Cu/Co</b>	<b>50</b>
<b>FeCo/Cu</b>	<b>80</b>
<b>NiFeCo/Cu</b>	<b>35</b>
<b>Ni/Ag</b>	<b>26</b>
<b>Co/Au</b>	<b>18</b>



а



б

Рис. 4. Спін-залежне розсіювання в тришаровій плівковій системі при паралельній орієнтації векторів намагніченості магнітних шарів (а) та антипаралельній (б).  $\Phi$  – ферромагнітний матеріал; НМ – немагнітний матеріал

- Товщину шарів, як правило, вибирають виходячи з того, щоб у кожному шарі відстань, на якій електрон зберігає певну орієнтацію спіну, була набагато більшою за товщину цього шару. Така умова звичайно добре виконується при товщинах менших 10 нм і визначається експериментальним шляхом. Електрон повинен пройти через кілька плівкових шарів, перш ніж орієнтація його спіну зміниться. Кожна магнітна межа поділу може діяти як фільтр для спіну і чим буде більша кількість меж поділу, на яких електрони будуть розсіюватися, тим сильніше відбуватиметься ефект фільтрування. За рахунок цього і відбувається збільшення ефекту ГМО при збільшенні кількості розділяючих шарів у мультишарі, що проілюстровано на рис. 5.

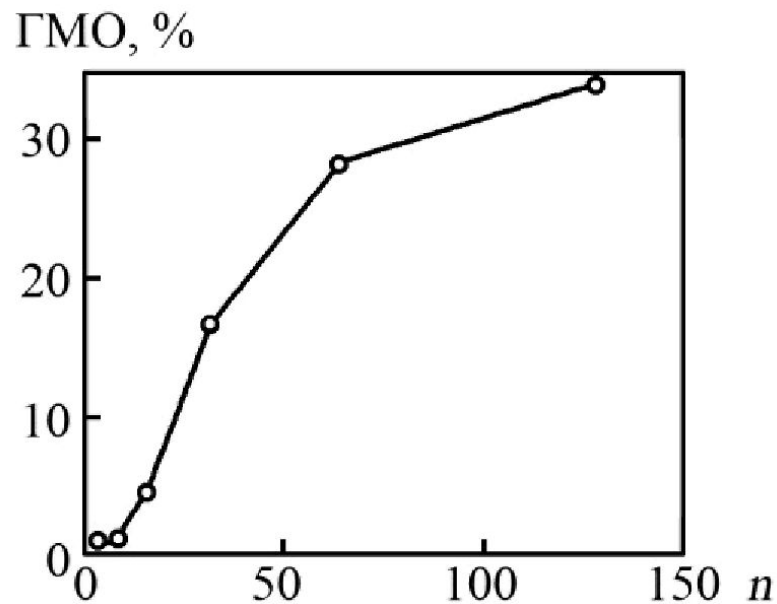


Рис. 5. Залежність ГМО ефекту від кількості фрагментів (n), що повторюються в мультишарі  $[\text{Co}(1)/\text{Cu}(1)]_n$ , отримана при  $T = 4,2 \text{ K}$

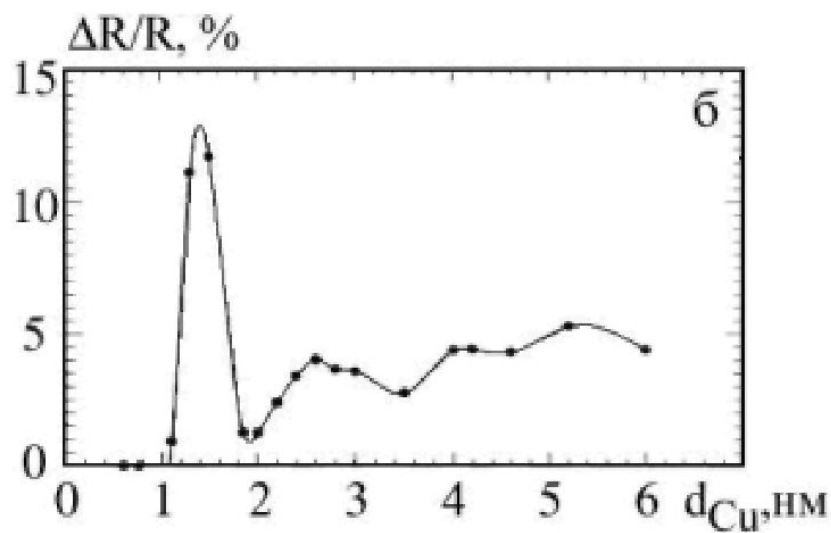
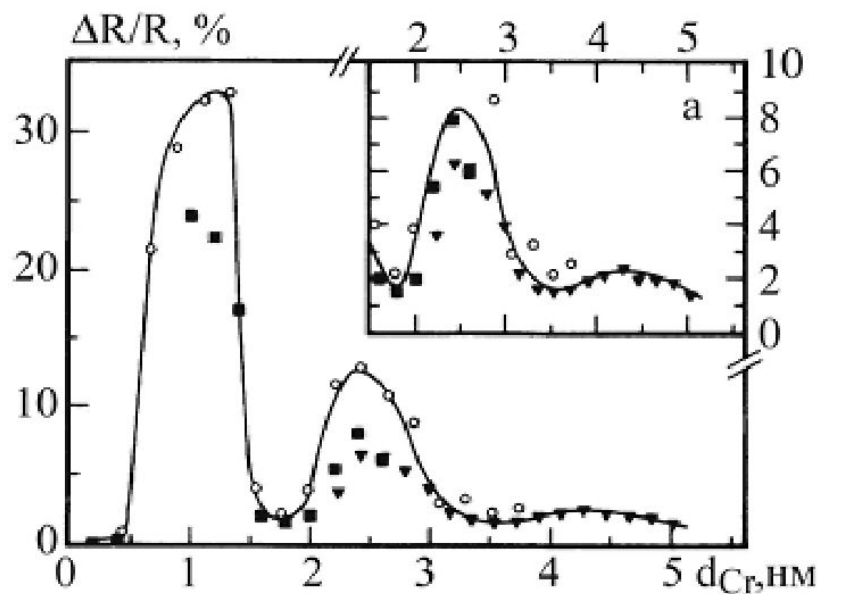


Рис. 6. Осцилююча залежність величини МО від товщини Cr (а) та Cu (б) для зразків: Cr(5)/[Cr( $d_{Cr}$ )/Fe(2)] $n$ /Cr(10)/Si(111) отриманих при  $\blacktriangledown$ ,  $\blacksquare$  - 40°C ( $n = 30$ ),  $\circ$  - 125 °C ( $n = 20$ ), та [Fe(1,5)/Cu( $d_{Cu}$ )]60/П при  $T=4,2$  К [16], відповідно (в дужках товщина в нм)

- Спін-залежне розсіювання електронів на межі поділу обумовлене також неузгодженістю ґраток контактуючих матеріалів, а крім цього залежить від ступеня узгодженості рівнів Фермі та зон провідності на цих межах. На рис. 6 приведена залежність величини МО від товщини немагнітного прошарку Cr та Cu для мультишарів Cr(5)/[Cr(dCr)/Fe(2)]<sub>n</sub>/Cr(10)/Si(111) та [Fe(1,5)/Cu(dCu)]<sub>60</sub>/П, з якого бачимо, що при збільшенні немагнітного прошарку обмінна взаємодія між шарами заліза поступово зменшується, а сама залежність має загасальний осциляційний характер.
- Отримані результати авторами, які досліджували плівкову систему [Fe(x)/Pd(0,3 нм)]<sub>100</sub>, свідчать також про осциляційну залежність намагніченості від товщини шару Fe: при значеннях  $x = 0,124$  і  $0,193$  нм спостерігалися максимуми намагніченості; при  $x = 0,9$ ;  $1,4 - 1,7$  та  $2, 3$  нм - мінімуми, які пояснюються квантовими розмірними ефектами в електронній структурі мультишару. Великих значень ГМО-ефекту не було отримано, але на відміну від попередніх систем, в усіх зразках двокомпонентної плівкової системи під дією температури та зміни концентрації відповідно до стехіометричного складу спостерігалася ПМА вздовж осі легкого намагнічування  $c$  у фазі  $L10$  [19, 20].
- Величину ГМО прийнято вимірювати у відсотках і розраховувати за формулою:

$$\Gamma_{MO} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} \quad \text{або} \quad \Gamma_{MO} = \frac{R_{\uparrow\uparrow} - R_{\uparrow\downarrow}}{R_{\uparrow\downarrow}},$$

де  $R(H)$  та  $R(0)$  - опір зразка у зовнішньому магнітному полі та при його відсутності;  $R_{\uparrow\downarrow}$  та  $R_{\uparrow\uparrow}$  - електричний опір плівкової системи, коли магнітні моменти феромагнітних шарів є антипаралельно намагніченими та орієнтованими вздовж магнітного поля відповідно.

Вимірювання МО проводиться за дво- або чотириточковою схемою, остання дозволяє уникнути додаткового опору провідників (рис. 7).

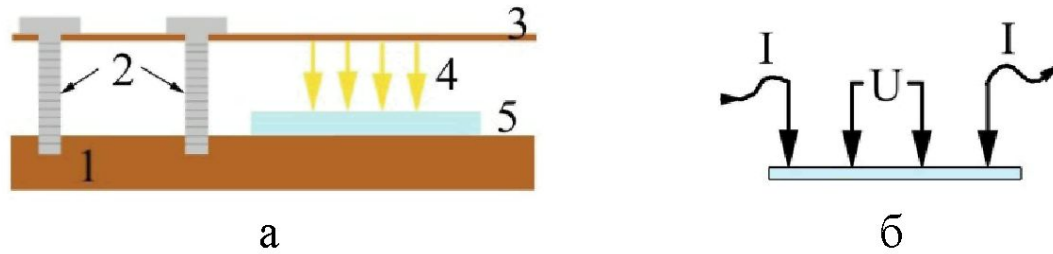


Рис. 7. Схематичне зображення столику для вимірювання МО (а) та схема ввімкнення (б) відповідно: 1 – мідна пластина, що забезпечує тепловідведення; 2 – притискні гвинти; 3 – гнучка текстолітова пластина; 4 – позолочені контакти; 5 – зразок

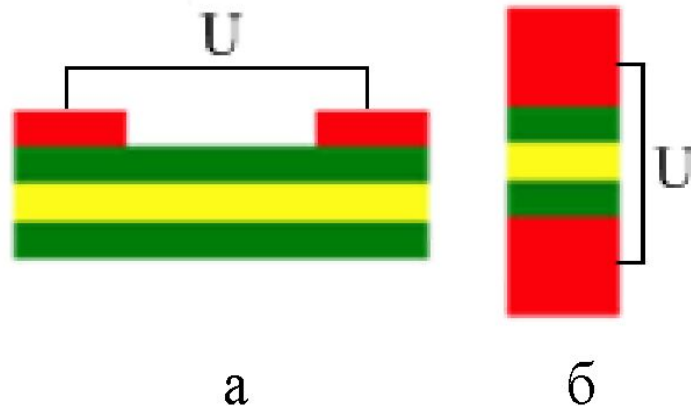


Рис. 8. Схема вимірювання МО: а - СПВП; б - СПП



- МО можна вимірювати в двох геометріях, коли електричний струм проходить у площині зразка паралельно шарам (**СПВП** або **СІР** (англ.)) та перпендикулярно до плівкової системи (**СПП** або **СРР** (англ.)) (рис. 8). У плівкових системах із перпендикулярною геометрією спостерігається більший ефект МО (ГМО) завдяки усуненню струму шунтування, що проходить через немагнітні шари, які розділяють ферромагнітні. У цьому випадку всі носії відчують спін-залежне розсіювання при перетинанні кожної межі поділу багат шарової структури. На рис. 9 наведена залежність величини ГМО для різних геометрій вимірювання та зміни температури навколишнього середовища.

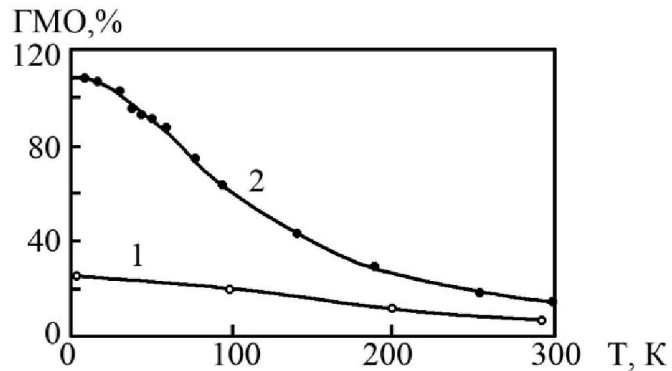


Рис.9. Температурна залежність ГМО мультишару  $[\text{Fe}(3)/\text{Cr}(1)]_{100}$  для різних геометрій вимірювання: СПВП (1) та СПП (2) (У дужках товщина в нм)

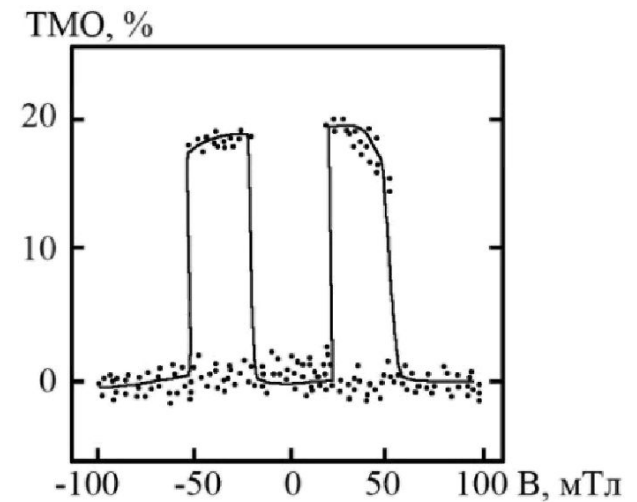


Рис. 10. Залежність ТМО від системи  $\text{Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$  при  $T = 4,2 \text{ K}$

- Ефект ГМО є різновидом МО, поряд із ним існують також анізотропний (**АМО**), тунельний (**ТМО**), колосальний (**КМО**) магнітоопір.
- Подібним до ГМО є ТМО, що спостерігається в магнітних тунельних переходах, в яких феромагнітні металеві шари розділені тонким ізолюючим шаром, наприклад  $Al_2O_3$ . Електропровідність існує внаслідок квантового тунелювання через ізолятор. Величина тунельного струму між двома магнітними шарами модулюється кутом між векторами намагнічування у двох шарів. Магніторезистивна залежність для системи  $Fe/Al_2O_3/Fe$  наведена на рис. 10. На величину всіх МО-ефектів істотно впливає значення температури, в табл. 2 наведені експериментальні дані величини ТМО при низьких (4,2 К) кімнатних (300 К) температурах.
- Ефект КМО може становити дуже великі величини, внаслідок чого відбувається зміна опору на кілька порядків. Це явище спостерігається у сполуках із структурою перовски-ту  $Re_{1-x}Me_xMnO_3$ , де Re – тривалентні іони La, Pr, Y, Nd та ін., а Me – двовалентні іони Pb, Sr, Ca, Ba та ін. В основі КМО лежить перехід метал-діелектрик в межах температури Кюрі, при цьому магнітні поля становлять до декількох тесла. Остання властивість робить застосування матеріалів КМО досить обмеженим.
- **4. Спін-вентильні структури**
- Спінтроніка – сучасна галузь електроніки, яка вивчає теорію і практику створення приладів, принцип дії яких побудований на ефекті ГМО і магнітному тунелюванні. Основний функціональний елемент спінтроніки – плівкова спін-клапанна структура, зміна станів електронних елементів якої відбувається за рахунок зміни провідності під дією зовнішнього магнітного поля.
- Структури, в яких спостерігається ГМО-ефект, являють собою магнітні багатошарові системи та мультишари, псевдо спін-вентильні структури, спінові вентилі та гранульовані тонкі плівки (рис. 11).

Таблиця 2 Вплив температури на тунельний магнетоопір (ТМО) плівкових систем

Система	ТМО, %	
	T = 4,2 К	T = 300 К
CoFeB/MgO/CoFeB	1010	500
Co <sub>2</sub> Cr <sub>0,6</sub> Fe <sub>0,4</sub> /MgO/Co <sub>50</sub> Fe <sub>50</sub>	317	109
Co <sub>2</sub> FeAl <sub>0,5</sub> Si <sub>0,5</sub> /MgO/ Co <sub>2</sub> FeAl <sub>0,5</sub> Si <sub>0,5</sub>	390	220
Co <sub>2</sub> MnGe/MgO/ Co <sub>50</sub> Fe <sub>50</sub>	376	160

- Мультишар складається з почергово нанесених тонких шарів феромагнітного матеріалу, розділених немагнітним шаром. За відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти феромагнітних шарів орієнтуються антипаралельно, як показано пунктирними і суцільними стрілками (рис. 11 а). При певній величині магнітного поля вони орієнтуються паралельно вздовж поля (суцільні стрілки).
- Псевдоспін-вентиль (його ще називають спін-вентиль із незакріпленим шаром) – це сандвіч із магнітожорстких і магнітом'яких магнітних шарів (рис. 11 б). За рахунок того, що їх значення коерцитивної сили мають різну величину, то й перемикання (перемагнічення феромагнітних шарів) відбувається при різних магнітних полях.

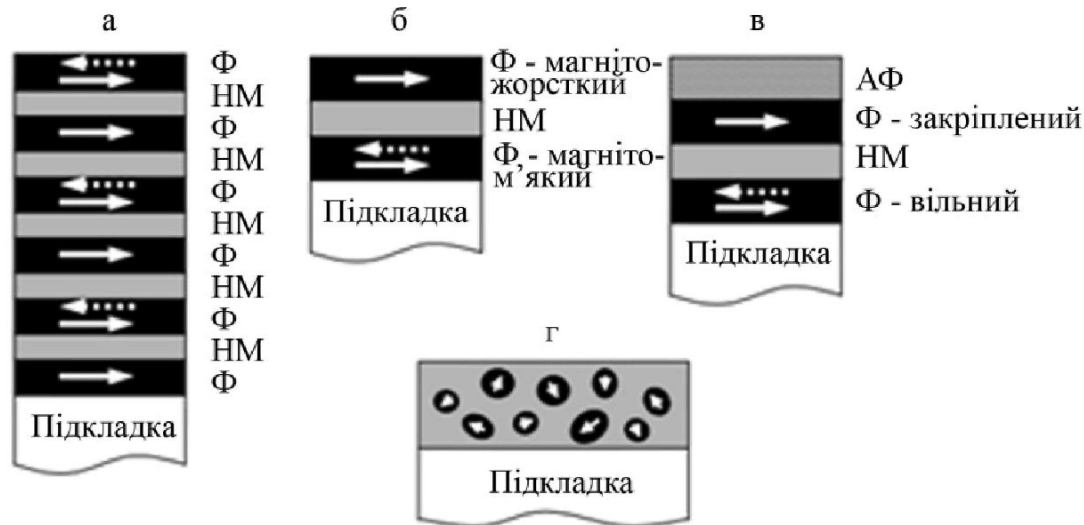


Рис.11. Плівкові системи в яких спостерігається ГМО ефект: мультишар (а), псевдоспін-вентиль (б), спін-вентиль (в) і гранульовані сплави (г)

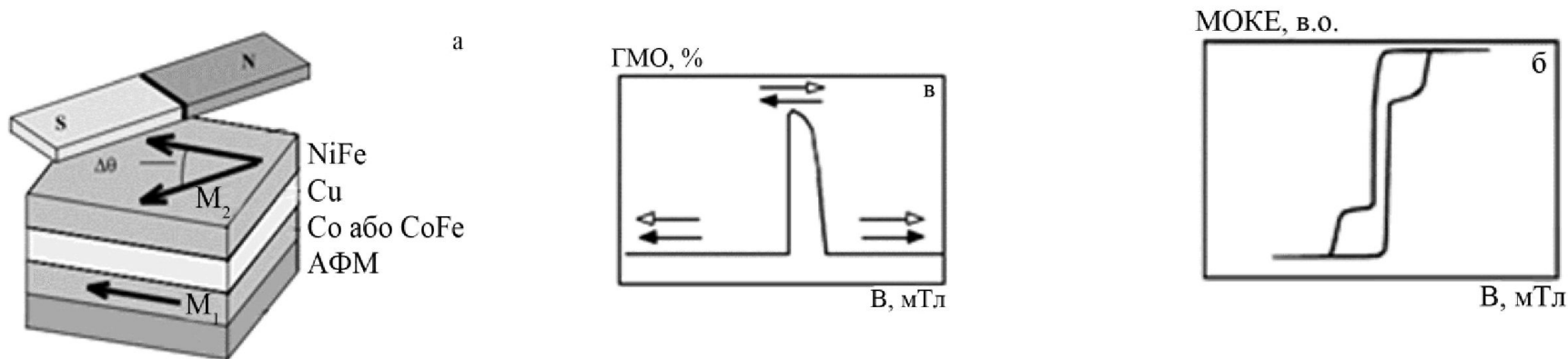


Рис. 12 Схематична структура (а) та типові залежності магнітооптичного ефекту Керра (МОКЕ) [1] (б) і ГМО-ефекту (в) простого спін-вентилля

[1] Ефект Керра, або магнітооптичний ефект Керра - лінійний магнітооптичний ефект, що полягає в тому, що при відображенні лінійно поляризованого світла від поверхні намагніченого матеріалу спостерігається обертання площини поляризації світла, а світло стає еліптично поляризованим.

Спін-вентиль (рис. 11 в, 12 а) являє собою плівкову систему, у якої магнітний момент верхнього (або нижнього) феромагнітного шару закріплений антиферомагнетиком (FeMn, IrMn, NiO, PtMn). Його дія не поширюється на нижній (верхній) шар, внаслідок чого його називають вільним. Типові спін-вентильні залежності МОКЕ та магнітоопору наведені на рис. 12 (б, в). Спін-вентильні структури із незакріпленим верхнім шаром використовуються як кутові датчики.

- При формуванні магнітних металевих гранул в немагнітній матриці відбувається утворення гранульованих плівок. За відсутності зовнішнього поля магнітні моменти гранул орієнтовані випадковим чином (рис. 11 г), при його появі вони орієнтуються в певному напрямку. Найбільш дослідженими є системи Fe-Ag, Co-Cu та Co-Ag (рис. 13). У гранульованих магнітних наноплівках механізм ГМО пов'язаний зі спін-залежним розсіюванням електронів на магнітних нанокластерах, розміщених у немагнітній матриці. Їх структура являє собою діамагнітну (Cu, Bi, Ag, Au, Pb) або парамагнітну (Pt, Pd, Re, Al) матрицю, що містить включення феромагнітного матеріалу (Co, Fe, Ni). Наноплівки на основі гранульованих сплавів являють собою цікаві об'єкти через наявність у них ГМО-ефекту, а також через малий рівень шумів, відсутність доменних стінок, порівняно з феромагнітними сплавами.

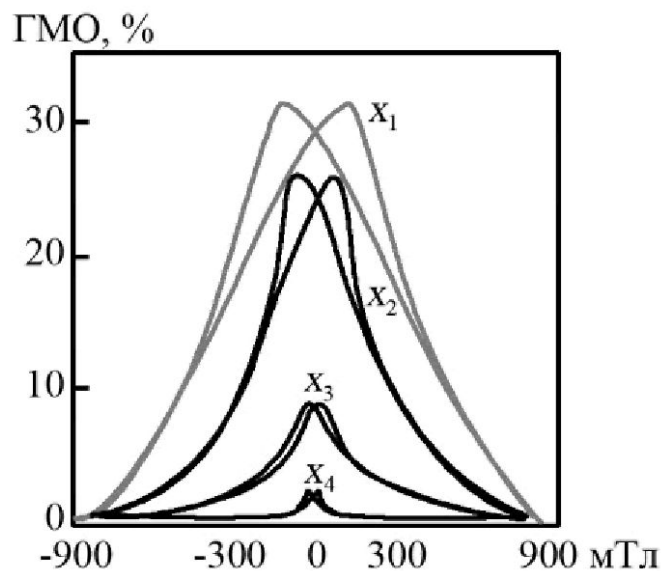


Рис. 13. Залежність ГМО ефекту від концентрації Со у плівковому сплаві  $\text{Co}_x\text{Ag}_{100-x}$ , де  $x_{1,2,3,4} = 26, 41, 52$  та  $82$  ат.%, відповідно, ( $T = 10 \text{ K}$ )

- Узагальнювальні дані стосовно величини магніторезистивного ефекту та прикладеного зовнішнього магнітного поля, при якому спін-вентильна структура повністю перемагнічується, наведені в табл. 3.
- Успішно застосовуються плівкові спін-вентильні структури для створення сенсорів кута повороту, швидкості обертання і амплітуди коливань об'єктів. До таких об'єктів достатньо закріпити досить мініатюрний постійний магніт, що буде змінювати намагніченість верхнього магнітного шару спін-вентильної структури датчика, розміщеного під ним. Сигнал, зчитуваний з датчика, буде змінюватися залежно від напрямку магнітного моменту верхнього магнітного шару. Плівкові структури, в яких реалізується ГМО ефект, використовуються також як датчики магнітного поля, що ефективно можна застосовувати в низько- та високочастотному діапазонах при кімнатній температурі.
- У комп'ютерній техніці на основі спін-вентильної структури були розроблені головки для запису/зчитування магнітної інформації. Надзвичайна їх чутливість при зменшених розмірах дозволила зменшити фізичний розмір біта інформації при вже існуючих технологіях створення функціонального покриття жорстких дисків.
- Компанією Motorola були розроблені комірки оперативної пам'яті, вони являють собою спін-вентильні плівкові структури, що потребують мінімальних енергозатрат для запису та зберігання інформації.
- На сьогоднішній день крім простого спін-клапана, що може бути аналогом будь-якого діодного елемента, розроблені, наприклад, ізолюючі структури або такі більш складні активні елементи, як спіновий транзистор (розроблені в 1990 році С. Даттою і Б. Дасом) чи спінові ємнісні накопичувачі. Крім того, досягнення спінтроники набувають багато інших застосувань, наприклад при виробництві персональних відеорекодерів (тюнерів для захоплення відеосигналу з аналогових приладів), апаратури телебачення високої чіткості (HDTV), DVD-приводів з інтерференцією в ближньому полі (NFR).

Таблиця 3 Порівняння магніторезистивних залежностей різних

<b>ГМО структура</b>	<b>Величина ГМО, %</b>	<b>Поле насичення <math>B_s</math>, мТл</b>
<b>Мультишар</b>	<b>10-70</b>	<b>10-500</b>
<b>Псевдо спін-вентиль</b>	<b>8-20</b>	<b>2-8</b>
<b>Спін-вентиль</b>	<b>4-14</b>	<b>1-4</b>
<b>Гранульований сплав</b>	<b>8-40</b>	<b>20-1000</b>