

Розділ 4 ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ

4.1 Методи керування запам'ятовувальними елементами та способи кодування інформації

Магніторезистивний запам'ятовувальний елемент (ЗЕ) повинен забезпечувати запис, зберігання і зчитування інформації. У всіх типах магніторезистивних ЗЕ для виконання цих функцій використовують багат шарові смужки, що містять феромагнітні плівки. Використовуються два варіанти запису інформації в МР – елементах – перпендикулярний і поздовжній (рис. 4.1). Метод перпендикулярного запису – це технологія, при якій біти інформації зберігаються у вертикальних доменах, що дозволяє використовувати більш сильні магнітні поля та зменшити площу матеріалу, що необхідна для запису 1 біта інформації. У 2009 році була досягнута щільність запису дисків у 0,62 Гбіт/мм², що майже втричі більше, ніж при використанні методу поздовжнього запису інформації (0,23 Гбіт/мм²), який повністю витіснений у 2010 році методом перпендикулярного запису.

Для запам'ятовування інформації використовуються два стійкі стани магнітних плівок, що приймаються за «0» та «1». Ці стани визначаються гістерезисом, і при записі інформації створюються прикладання до феромагнітної структури ЗЕ – магнітних полів, що генеруються струмами в спеціальних керуючих провідниках (I_c) або сенсорним (I_s) струмом через магнітні плівки. При зчитуванні використовується різниця електричних опорів для двох станів, що визначається під час або після дії зчитувальних магнітних полів. Магнітні поля створюються керуючими струмами зчитування, що проходять через магнітну структуру і

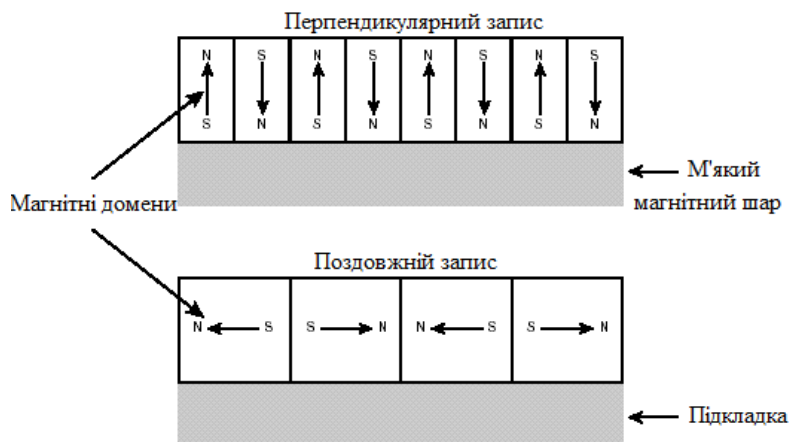


Рисунок 4.1 – Схема перпендикулярного і поздовжнього записів інформації

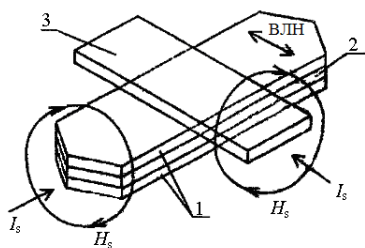


Рисунок 4.2 – Структура АМР ЗЕ: 1 – FeNiCo-плівка; 2 – Ti- або TiN-плівка; 3 – провідник; ВЛН – вісь легкого намагнічування

по керуючих провідниках. На рис. 4.2 схематично зображений ЗЕ у вигляді смужки з двох феромагнітних плівок 1, через що протікає сенсорний струм, що створює в сусідніх плівках антипаралельні магнітні поля. Між плівками розмішений немагнітний роздільний шар 2. Для СТМР (спін-тунельних магніторезистивних) елементів, у яких сенсорний струм проходить перпендикулярно площині плівок, структура інша, хоча основний елемент – сендвіч із

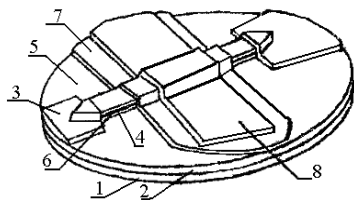


Рисунок 4.3 – Структура ЗЕ: 1 – кремнієва Si підкладка; 2 – ізолюючий шар; 3 – контакти до МР смужки; 4 і 5 – магнітні плівки, 6 – роздільний високорезистивний шар; 7 – ізолюючий шар; 8 – керуючий провідник

роздільним шаром – залишається. На рис. 4.3 показана реальна конструкція ЗЕ.

Запам'ятовувальний елемент – це пороговий елемент із гістерезисною характеристикою, що входить до запам'ятовувальної матриці пристрою, і до нього пред'являються жорсткі вимоги щодо точності відтворення основних параметрів у процесі виробництва. ЗЕ поєднують у собі специфічні переваги магнітних запам'ятовувальних елементів з можливістю мікромініатюризації та інтегрального виконання на одному кристалі разом із напівпровідниковими керуючими схемами. На їх основі проектуються енергозалежні репрограмувальні мікросхеми пам'яті зі щільністю зберігання інформації до 10^7 біт/мм², з неруйнівним зчитуванням, з довільною вибіркою та з необмеженим числом циклів перезапису інформації. Вони придатні для роботи в широкому температурному діапазоні і при підвищеній радіації.

ЗЕ залежно від співвідношення параметрів магнітних плівок, що входять до їх складу, можна розділити на дві групи: із двома однаковими МР плівками та із двома МР плівками, що мають різні H_s .

Раніше для АМР ЗЕ застосовувалися дві однакові МР плівки. Це означало, що вони перемагнічуються обидві, і в результаті можливе лише динамічне зчитування. Таке рі-

шення було виправдане завдяки технологічній простоті формування структур, надійності способів керування і принципової неможливості використання в АМР ЗЕ статичного зчитування внаслідок малої величини АМР – ефекту. В перших варіантах спін-вентильних ЗЕ також використовувались однакові МР – плівки. Якщо плівки ЗЕ мають різні значення напруженості магнітного поля перемагнічування H_r , достатньо, щоб зовнішнім полем, яке створюється струмом у спеціальному провіднику, і полем сенсорного струму, що протікає по цих плівках, перемагнічувалася лише плівка з мінімальним H_r (так звана "вільна" плівка).

Основні переваги приладів на основі ГМО: висока чутливість навіть до незначних змін зовнішнього магнітного поля, малі габарити, мала споживана потужність, простота об'єднання з електронними пристроями. До того ж завдяки інтенсивному електричному сигналу, який формує ГМО – структура, знижується і чутливість до завад. Ці властивості і призвели до того, що елементи на основі ефекту ГМО в першу чергу знайшли застосування у зчитувальних головках жорстких дисків. Це дозволило приблизно за десятиріччя збільшити щільність запису жорстких дисків з 4,1 до більш ніж 1 Тбіт/дюйм². При цьому досі виробники зчитувальних головок жорстких дисків віддають перевагу СВ – структурі, хоча інтенсивно проводяться розроблення по використанню STD – структури (Spin Tunneling Dependent) для зчитувальних голівок жорстких дисків і базових елементів магніторезистивної оперативної пам'яті з довільною вибіркою MRAM (Magnetoresistance Random Access Memory).

Пам'ять MRAM є досить перспективною і багатообіцяючою порівняно з іншими типами енергонезалежної пам'яті. Так, час вибірки даних у MRAM може становити менше за 10 нс, що у 5 разів менше, ніж у флеш – пам'яті, а

час запису – порядку 2 нс (на три порядки менший ніж у флеш – пам'яті). При цьому енергоспоживання магніторезистивної пам'яті вдвічі менше, ніж у флеш та динамічної пам'яті DRAM (Dynamic Random Access Memory). Сьогодні розроблення MRAM виконуються декількома фірмами: Motorola, IBM, Infineon, Cypress semiconductor, TSMC, NEC і Toshiba. Схема комірки MRAM – пам'яті, сформованої на перетині розрядної та числової шин, наведена на рис. 4.4. Кожна комірка складається із структури, що відповідає за збереження інформації, і транзистора, за допомогою якого зорганізовується адресація. Відомі схеми, у яких транзистор може бути замінений діодом або зовсім відсутній.

Під час запису струм, що протікає по розрядній і числовій шинам, наводить перехресне магнітне поле, яке змінює магнітний стан вільного шару. При зчитування через комірку пропускають струм, величина якого залежить від орієнтації векторів намагнічування магнітних шарів структури: при паралельній конфігурації опір переходу мінімальний (логічний «0»), при антипаралельній орієнтації намагніченостей опір великий (логічна «1»). У 2004 році компанією Motorola були створені чипи MRAM – пам'яті ємністю 4 Мбіт, з часом доступу 25 нс; компанії

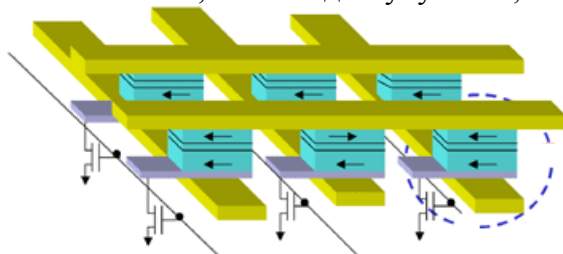


Рисунок 4.4 – Елементарна комірка MRAM пам'яті

Infinion та IBM представили експериментальний чип MRAM – пам'яті ємністю 16 Мбіт.

Пристрій для зчитування і запису інформації для жорстких дисків із використанням датчика на основі ГМО – структури поданий на рис. 4.5.

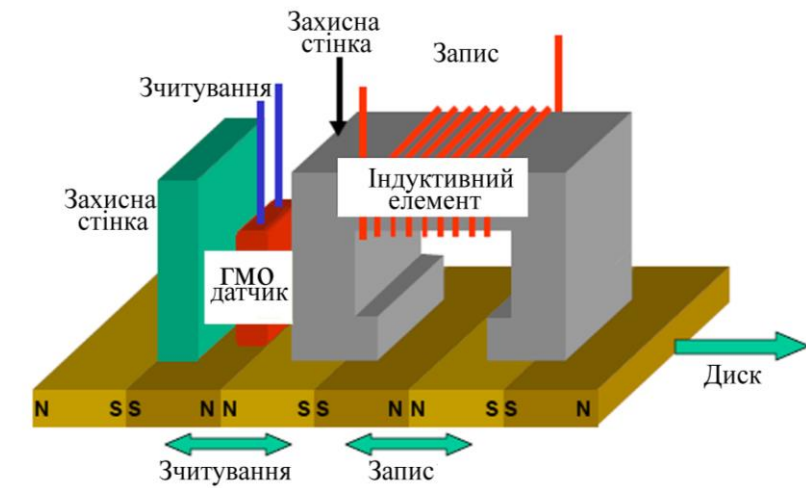


Рисунок 4.5 – Схема ГМО-пристрою для зчитування та запису інформації

На сьогодні можна констатувати перехід усіх виробників жорстких дисків на технологію ГМО-головок. Також відмічається технологічний прорив у виготовленні модулів пам'яті. У 2005 році компанія Motorola почала масове виготовлення спінтронних модулів пам'яті MRAM. Комірки такої пам'яті являють собою спін-вентильні плівкові структури, що потребують мінімальної енергозатрати для запису та зберігання інформації.

У всіх ЗЕ використовуються два варіанти структури з АМР-, СВ- і СТ- ефектами, і за способом кодування при

записі станів «0» і «1» їх можна класифікувати таким чином.

Перший спосіб кодування – «0» і «1» у результаті запису розрізняються паралельним ($\uparrow\uparrow$) і антипаралельним ($\uparrow\downarrow$) розташуванням векторів намагніченості сусідніх магнітних плівок і величиною МР – ефекту. При цьому обидва стани повинні бути стійкі за відсутності керуючих полів, а зчитування може здійснюватися одним сенсорним струмом у МР – плівках, тобто статично. У цьому випадку використовуються максимальний перепад опору і мінімальний струм керування.

Другий спосіб – «0» і «1» розрізняються напрямками паралельних векторів $\mathbf{M}_{h,l}$ плівок, тобто $\uparrow\uparrow$ і $\downarrow\downarrow$. У цьому випадку може бути використаний лише спосіб з динамічним зчитуванням, перевагою якого є можливість виключення впливу на сигнал розкиду параметрів.

Третій спосіб – «0» і «1» розрізняються напрямками антипаралельних векторів $\mathbf{M}_{h,l}$ сусідніх плівок, тобто $\uparrow\downarrow$ і $\downarrow\uparrow$. Перевага цього способу в тому, що стани з антипаралельними $\mathbf{M}_{h,l}$ більш стійкі, ніж з паралельними. У цьому випадку може бути використаний лише спосіб з динамічним зчитуванням.

4.2 Анізотропні елементи

Анізотропний магніторезистивний запам'ятовувальний елемент (АМР ЗЕ) – це багат шарова структура, що формується двома шарами FeNiCo плівки, які розділяються тонким немагнітним високорезистивним шаром (рис. 4.1). Розділяючий шар перешкоджає обмінній взаємодії між магнітними шарами.

За «0» і «1» беруться два стійких протилежних стани із антипаралельними ($\uparrow\downarrow$ і $\downarrow\uparrow$) напрямками векторів $\mathbf{M}_{h,l}$ ма-

гнітних плівок за відсутності керуючих полів (це третій спосіб кодування). Набув поширення варіант АМР ЗЕ з поперечним розташуванням вісі легкого намагнічення (ВЛН).

Одночасне використання двох перпендикулярних магнітних полів струмів I_S і I_C дає змогу при записі перемагнічувати МР – плівки обертанням вектора $\mathbf{M}$ і організувати довільну вибірку. Поле струму I_S здійснює вибірку розряду і визначає записуване число, тобто сенсорний струм виконує функцію числового, тоді як поле струму в провіднику визначає вибірку ряду чисел, що становлять слово, тобто струм через провідник за виконуваною функцією є словарним.

Отже, запис здійснюється одночасною дією керуючих струмів I_S і I_C . Імпульс струму I_S , розділяючись на дві складові у магнітних плівках, створює в них антипаралельні магнітні поля, спрямовані вздовж ВЛН. У результаті їх дії при збігу напрямів початкової намагніченості магнітних плівок і магнітних полів, створюваних I_S , тобто коли підтверджується інформація, що була записана в МРЕ раніше, магнітні поля від I_S утримують вектори $\mathbf{M}$ у колишніх напрямках. Якщо вектори $\mathbf{M}$ плівок і поля від I_S антипаралельні, тобто записується інформація, протилежна інформації, що зберігалася, поля струму розвертають кожний з векторів $\mathbf{M}_{h,l}$ у протилежний бік. Діючий одночасно із I_S імпульс струму I_C створює магнітне поле, перпендикулярне до ВЛН (тобто спрямоване вздовж структури). При одночасній дії двох струмів у разі підтвердження інформації мають місце лише невеликі відхилення векторів намагніченості $\mathbf{M}_{h,l}$ від ВЛН, а у разі зміни інформації відбудеться перемагнічування обох плівок.

При зчитуванні (в АМР ЗЕ унаслідок малої величини ефекту можливе лише динамічне зчитування) напрям сен-

сорного струму I_s завжди однаковий і відповідає, наприклад, запису «0». Окрім сенсорного струму, подається імпульс струму в провідник. Кути φ повороту векторів $\mathbf{M}_{h,l}$ у магнітних плівках сендвіча під дією полів керуючих струмів при зчитуванні залежать від початкового стану, тобто від записаної інформації. Щоб при зчитуванні не відбувалося руйнування інформації, ці кути не повинні перевищувати 90° , а практично $(10 - 20)^\circ$, що обмежує величину зчитувальних струмів, а отже, і сигналу зчитування.

Величина сигналу зчитування АМР ЗЕ, тобто зміна падіння напруги на ЗЕ при переході від стану із записаним «0» до стану «1»:

$$\Delta V = V(1) - V(0) = I_s R (\Delta \rho / \rho) [\cos^2 \varphi(1) - \cos^2 \varphi(0)], \quad (4.1)$$

де $V(1)$ і $V(0)$ – напруги на ЗЕ при зчитуванні «1» і «0» відповідно; I_s – сумарний сенсорний струм; $R = \rho b / a \delta$ – електричний опір АМР ЗЕ (ρ – питомий електричний опір АМР ЗЕ; b , a і δ – довжина, ширина і товщина МР структури); $(\Delta \rho / \rho)$ – коефіцієнт АМР ефекту; $\varphi(1)$ і $\varphi(0)$ – кути між $\mathbf{M}$ сендвіча і сенсорним струмом при зчитуванні «1» і «0», відповідно.

Таке значення сигналу зчитування отримують при диференціальному або мостовому включенні двох ЗЕ, в одному з яких записаний «0», а в іншому – «1».

У відомих ЗЕ використовуються дві однакові FeNiCo плівки з $H_k = 1,6$ кА/м, що неможливо у випадку двох плівок FeNi, оскільки це призводить до відмов функціонування приладів унаслідок руйнування інформації при зчитуванні. Розширення робочих областей ЗЕ можна забезпечити шляхом збільшення струму керування. У той самий час ЗЕ на основі плівок з різними величинами анізотропії забезпечують значно більший сигнал (при тих самих величинах

робочих струмів) або дозволяють функціонувати ЗЕ при зменшених величинах струмів керування. Недоліки цих ЗЕ – дещо складніша технологія формування плівок різних металів замість плівок, виготовлених з одних і тих самих магнітних шарів.

4.3 Структура спін-вентильних елементів

СВ – структури найбільш придатні за своїми характеристиками для застосування у датчиках та головках зчитування (табл. 4.1). При відпалюванні таких структур виникає додаткова область розділу між FeNiCo і Cu шарами. При температурі понад 473 К величина МР – ефекту зменшується, але введення шарів Со збільшує температурну стабільність до 500 К. Структури NiFe/Ag принципово інакше реагують на термообробку через слабку розчинність атомів цих матеріалів. У цих структур МР властивості поліпшуються після відпалювання до 573 К.

Вимоги до СВ – структур для запам'ятовувальних елементів відрізняються від вимог до структур для датчиків і головок зчитування. Основні відмінності зводяться до того, що для ЗЕ потрібна стійкість записаної інформації і не так важлива чутливість до магнітного поля. Це означає, що СВ структури для ЗЕ повинні мати підвищені поля перемагнічування, причому поля перемагнічування вільної і фіксованої плівок повинні максимально відрізнитись.

Розглянемо матеріали для кожного шару СВ – структури.

1. *Феромагнітний шар.* Як феромагнітний шар застосовують виключно пермалой NiFe і сплави FeNiCo, що мають підвищене поле магнітної анізотропії. Завдяки явищу СЗРЕ саме у структурах із застосуванням цих матеріалів виявляється помітний СВ – ефект.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики СВ –структур

Структури	СВ-ефект, %	$H_{\max}$, кА/м
NiFe/Cu/Co/Cu	14	6,4
NiFeCo/Cu/Co/Cu	16	4
[NiFeCo(1,5 нм)/Cu(2,2 нм)] ₃₀	15	8
[Cu (2,1 нм)/ Co ₉₀ Fe ₁₀ (2,5 нм)] ₁₀	24	6,4
[Co ₉₀ Fe ₁₀ (1 нм)/Cu (2 нм)/ Co ₉₀ Fe ₁₀ (3 нм)/Cu (2 нм)] ₁₀	16	4
[Ni ₈₀ Fe ₂₀ (2 нм)/Ag (1 нм)] _n	12	8
NiFe/Cu/NiFe/FeMn	5	—
NiFe/Co/Cu/Co/NiFe/FeMn	8	—

2. *Немагнітний роздільний шар.* Для зменшення спін-незалежного розсіювання як область розділу шарів найбільш підходять немагнітні метали з високою електричною провідністю (Cu, Ag та Au).

3. *Фіксувальний (антиферромагнітний) шар.* Для виготовлення фіксуєючих шарів використовують сплави γ -FeMn, аморфні сплави перехідних та рідкоземельних металів (TbCo) і оксиди NiO, NiCoO і NiO/CoO.

Кожний із цих матеріалів має переваги і недоліки, їх вибір визначається методом виготовлення і передбачуваним застосуванням. При цьому використовують наступні основні конфігурації розміщення шарів у СВ – структурах.

Основна конфігурація: ФМ/НМ/ФМ/ФШ. Ця конфігурація має найкращі характеристики. Фіксувальний шар може розташовуватися зверху або знизу СВ – структури. У другому випадку використовується фіксувальний шар із NiO. Часто для поліпшення характеристик між підкладкою і структурою шару ФМ1 вводять проміжний шар, підси-

люючи тим самим формування потрібної кристалічної фази.

Структура із різними магнітними шарами: ФМ1/НМ/ФМ2. Перевагою цього варіанта є можливість посилення СВ – ефекту шляхом добору матеріалу. Недолік цього варіанту структури – необхідність використання при конденсації двох мішеней із матеріалів ФМ1 і ФМ2.

Структура із додатковими шарами кобальту: NiFe/Co/Cu/Co/NiFe/ФШ. Уведення між магнітними плівками пермалою і Со шару Cu товщиною у декілька моносарів збільшує величину СВ – ефекту в 2 рази. Поряд з цим шар Со збільшує коерцитивну силу вільного шару, що погіршує характеристики СВ. Як компромісне рішення можна вводити шар Со лише поряд із зафіксованим пермалоевим шаром.

Симетрична структура: ФС/ФМ/НМ/ФМ/НМ/ФМ/ФШ. Перевагою симетричної структури є збільшення СВ – ефекту за рахунок наявності чотирьох областей розподілу замість двох. Основний недолік структури – складність її виготовлення.

Певний інтерес становить дослідження СВ – ефекту, коли струм проходить перпендикулярно до площини плівок, опір структури вкрай малий і визначається їх товщиною. Для збільшення опору використовують зразки нанометрових розмірів, а для зменшення впливу опору контактів вимірювання проводять при низьких температурах. Для експериментальних досліджень використовуються спін-інжекторна техніка, технологія надпровідних контактів, нанотехнологія, осадження мультишарів на підкладку з каналами, електролітичне вирощування на мембранах.

Для розвитку робіт зі створення ЗПДВ нових поколінь на ЗЕ із спін-вентильним ефектом важлива можливість зменшення розмірів цих елементів до субмікронних

розмірів, що дає можливість розраховувати на густину інформації до 10^7 біт/мм². Окрім можливості значного зменшення розмірів, СВ – ефект дає можливість значно збільшити сигнали зчитування і швидкодію ЗПДВ. СВЗЕ, як і АМР ЗЕ, може бути виготовлений у вигляді багатошарової структури з загостреними кінцями, що складається із МР – плівки сплаву FeNiCo і FeNi (кожна товщиною близько 5 нм), захищених із зовнішніх сторін плівками TiN. Між магнітними плівками розміщується низькорезистивний шар Cu завтовшки 1 - 3 нм.

Для використання СВ ефекту можна перемагнічувати як одну з двох сусідніх плівок, так і обидві. При перемагнічуванні однієї плівки намагніченість іншої плівки фіксується в якому-небудь напрямі. Під дією зовнішнього поля і полів, що породжуються сенсорними струмами, перемагнічується лише плівка з меншим H_c . Петля гістерезису однієї з плівок може зміщуватися полем обмінної взаємодії, що створюється додатковим магнітошорстким шаром, наприклад, FeMn або CoFe.

Розроблені СВЗЕ, у яких функції зберігання і зчитування інформації об'єднані (одні і ті ж самі феромагнітні плівки зберігають подвійну інформацію і дають змогу її зчитувати шляхом вимірювання електричного опору) та розділені (одні магнітні плівки зберігають інформацію, а інші – магнітозв'язані з першими – використовуються для зчитування інформації).

4.4 Елементи для зчитування інформації

4.4.1 Динамічне зчитування

Робота СВЗЕ з динамічним зчитуванням багато в чому нагадує роботу АМР ЗЕ (третій спосіб кодування).