

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).

Сенсорний струм, що протікає по окремих МР – плівках і прошарку Cu , створює у сусідніх МР плівках антипаралельні магнітні поля, спрямовані поперек сендвіча. Потоки обох МР – плівок майже повністю замикаються один на одного, що зменшує поперечні розмагнічувальні ефекти. За допомогою струму I_C , який протікає по провіднику над МР сендвічем ортогонально до нього, створюється додаткове магнітне поле, направлене вздовж сендвіча. Одночасна дія двох перпендикулярних полів – поля сенсорного струму і поля струму в провіднику – приводить до перемагнічування МР – плівок обертанням векторів $\mathbf{M}_{h,l}$, що забезпечує високу швидкодію СВЗЕ.

Роботу елементів розглянемо на прикладі структури з застосуванням магнітних плівок, що мають різні поля анізотропії. Високоанізотропна плівка (ВП) FeNiCo не перемагнічується в малих полях, при яких перемагнічується лише низькоанізотропна плівка (НП) з пермалою. Можливі два варіанти розташування ВЛН щодо елемента: поздовжнє і поперечне. При поздовжньому розташуванні ВЛН за стани зберігання інформації приймають стани з паралельним $\uparrow\uparrow$ (рис. 4.6 *a* – логічна «1») і антипаралельним $\uparrow\downarrow$ (рис. 4.6 *г* – логічний «0») взаємним розташуванням \mathbf{M}_h і \mathbf{M}_l (перший метод кодування). Обидва стани повинні бути стійкими за відсутності струмів керування.

Напрямок \mathbf{M}_h постійний завжди. Розвертається лише \mathbf{M}_l . Записувана інформація визначається полярністю I_C , але його величина без одночасної дії I_S недостатня для перемагнічування навіть \mathbf{M}_l . За допомогою поля струму I_S (рис. 4.6 *б*) поле струму I_C встановлює \mathbf{M}_l у новий напрям (рис. 4.6 *в*) або підтверджує попередній. Після припинення дії струмів \mathbf{M}_l залишається в новому положенні (рис. 4.6 *г*).

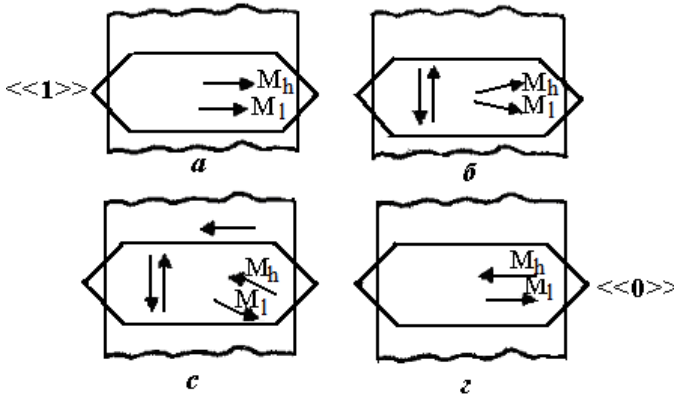


Рисунок 4.6 – Орієнтація векторів намагніченості \mathbf{M}_h і \mathbf{M}_l при поздовжньому розташуванні ВЛН: *a, г* – стани зберігання інформації; *б, в* – стани зчитування

При динамічному зчитуванні з використанням автообнулювання в підсилювачі має значення послідовність подачі керуючих струмів. Спочатку подається I_s . При цьому \mathbf{M}_h і \mathbf{M}_l дещо відхиляються від ВЛН. При подачі струму I_c формується сигнал. При зчитуванні поворот вектора \mathbf{M}_l під дією полів керуючих струмів не повинен приводити до його повного розвороту, інакше відбудеться перезапис, тобто руйнування інформації. При цьому повний перепад електричного опору, який відповідає СВ ефекту, при поздовжньому розташуванні ВЛН використовувати не вдається. Таким чином, верхня межа струмів зчитування визначається величиною струмів перезапису. Значення «0» або «1» при зчитуванні визначаються полярністю вихідного сигналу V в діагоналі моста.

Для СВЗЕ з поперечним розташуванням ВЛН застосовують метод функціонування, що використовує лише стійкі стани з антипаралельними векторами $\mathbf{M}_{h,l}$ в МР – плівках ($\uparrow\downarrow$ та $\downarrow\uparrow$) і з перемагнічуванням високо анізотропної

(ВАП) при записі (третій метод кодування). Стани «0» і «1» визначаються напрямом вектора \mathbf{M}_h , а вектор \mathbf{M}_l у стані зберігання завжди антипаралельний \mathbf{M}_h (наприклад, на рис. 4.7 *а* – «0», а на рис. 4.7 *в* – «1»). При запису інформація визначається напрямом I_S (рис. 4.7 *в*). Магнітне поле, створюване струмом у провіднику, може лише відхиляти вектор \mathbf{M}_l від ВЛН (рис. 4.7 *б*). Кінцевим після зняття струмів виявляється стан з антипаралельним розташуванням $\mathbf{M}_{h,l}$, але при новому напрямі \mathbf{M}_h (рис. 4.7 *з*).

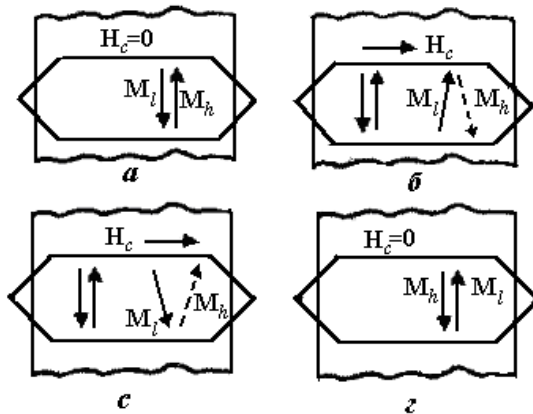


Рисунок 4.7 – Орієнтація векторів намагніченості \mathbf{M}_h і \mathbf{M}_l при поперечному розташуванні ВЛН: *а, з* – стани зберігання інформації; *б, в* – стани зчитування

При цьому струми запису зростають порівняно з попереднім варіантом через необхідність перемагнічування ВАП. При зчитуванні I_S подається першим. При подачі I_C вектор \mathbf{M}_l повертається у протилежний бік або не повертається залежно від свого колишнього положення, а ВП при цьому не перемагнічується.

Особливістю цього способу є можливість повного перемагнічування НАП при зчитуванні, оскільки через нестійкість стану із паралельним розташуванням $\mathbf{M}_{h,l}$ плівок руйнування інформації не відбувається, і така можливість дає змогу до 10 разів збільшити сигнал зчитування, наближаючи його до фізичної межі.

4.4.2 Статичне зчитування

У СВЗЕ зі статичним зчитуванням, де стани зберігання «0» і «1» визначаються взаємним розташуванням векторів $\mathbf{M}_{h,l}$ сусідніх МР – плівок, близьких до паралельного і антипаралельного (перший спосіб кодування), реалізується практично максимальний перепад електричних опорів. Але використання статичного зчитування можливе лише в тих випадках, коли величина СВМР – ефекту перевищує розкид значень усіх опорів плечей моста від номіналу під впливом зовнішніх чинників.

СВЗЕ з об'єднаними в одній смужці функціями зберігання і зчитування інформації має вигляд багат шарової смужки, що складається з двох МР – плівок сплаву FeNiCo (розділених прошарком міді) і розташованої під нижньою магнітною плівкою фіксувального шару зі сплаву Fe₅Co₉₅. Структура елемента якісно не відрізняється від структури СВЗЕ з динамічним зчитуванням і з подовжнім розташуванням ВЛН, описаного вище. Станам «0» і «1» відповідають стабільні антипаралельні і паралельні взаємні розташування вектора \mathbf{M}_l вільної і фіксованої \mathbf{M}_h магнітних плівок.

Оскільки при поперечному розташуванні ВЛН в сендвічах стан із паралельними векторами $\mathbf{M}_{h,l}$ обох плівок нестійкий, як ЗЕ зі статичним зчитуванням можна використовувати лише елементи з подовжнім розташуванням

ВЛН. Візьмемо за «0» стан з антипаралельним розташуванням векторів $\mathbf{M}_{h,l}$ обох плівок, а стан з паралельним розташуванням векторів – за «1». При цьому обидва стани повинні бути стійкими за відсутності всіх струмів. При записі перемагнічується лише вільна плівка (ВП). Зчитування проводиться у мостовій схемі при проходженні одного струму I_S , який виконує лише функцію вимірювального струму і недостатній для перемагнічування ні НАП, ні тим більше ВАП або фіксованої плівки. Вибірка здійснюється напівпровідниковими ключами, що підключають джерела струмів керування і підсилювач зчитування. Пари однаково намагнічених ЗЕ розташовані на протилежних плечах мостової схеми. При подачі імпульсу струму I_S з'являється сигнал зчитування, полярність якого визначається інформацією, що зберігається.

У СВЗЕ із розділеними елементами зберігання і зчитування функції зберігання і зчитування інформації структурно і топологічно розділені (рис. 4.8). Сенсорна лінія (лінія зчитування) виготовляється з матеріалу з СВ – ефектом і є безперервною доріжкою – сендвіч із закороченими накладками, що шунтують проміжки між бітами. Вона складається з двох обмінно-незв'язаних магнітом'яких плівок і прилеглого до однієї з магнітом'яких плівок магнітожорсткого шару, який фіксує вектор намагніченості \mathbf{M}_l найближчої до нього магнітом'якої плівки. Елементи зберігання, що складаються з однієї магнітної плівки, розташовані над словарною лінією і знаходяться в електричному контакті з нею. На рис. 4.9 наведена матриця з 2×2 ЗЕ.

Розглянемо роботу такого варіанта СВЗЕ. Елемент зчитування містить СВ – структуру з фіксуючим шаром. Струми I_S та I_C паралельні, і плівка в області зберігання перемагнічується при їх одночасній дії. Вибірка за другою координатою проводиться комутуючими ключами. Керую-

чі провідники можна прокласти перпендикулярно до сенсорних ліній, хоча в цьому випадку дещо зростуть

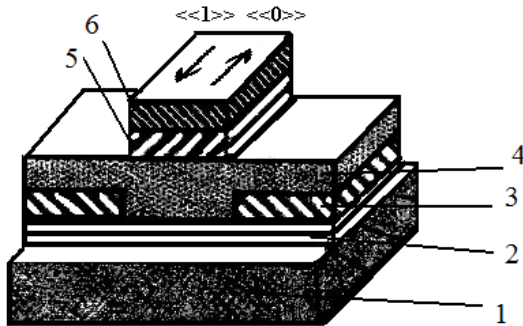


Рисунок 4.8 – Структура комірки СВЗЕ зі статичним зчитуванням, з розділеними областями зберігання і зчитування: 1 – підкладка з ізолюючим шаром; 2 – СВ; 3 – перемички; 4 – ізолюючий шар; 5 – провідник запису; 6 – магнітна плівка для зберігання інформації

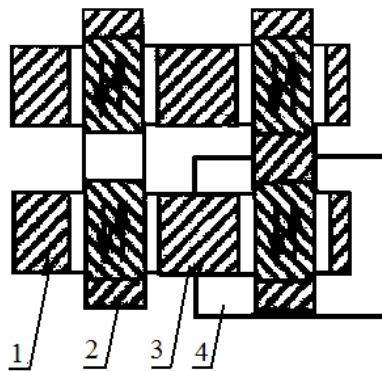


Рисунок 4.9 – Магнітна матриця з 2×2 СВЗЕ зі статичним зчитуванням, що розділені областями зберігання і зчитування: 1 і 3 – перемички; 2 – провідник запису; 4 – область, зайнята 1 бітом

струми. Напрямок вектора \mathbf{M}_f постійний для фіксованої магнітної плівки області зчитування. При записі інформації змінюється напрям вектора \mathbf{M}_h магнітної плівки області зберігання. Напрямок вектора \mathbf{M}_l вільної плівки області зчитування визначається напрямом вектора \mathbf{M}_h області зберігання і завжди антипаралельний йому, що є наслідком умови мінімуму енергії системи.

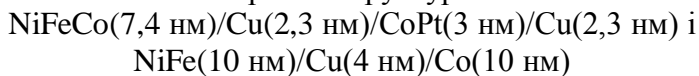
Для визначеності вважатимемо, що стану «0» відповідає розташування намагніченості області зберігання, антипаралельне вектору \mathbf{M}_f фіксованої плівки області зчитування. Вектори намагніченості \mathbf{M}_h і \mathbf{M}_l в області зчитування при цьому вистають паралельними. Тоді стану «1» відповідає паралельне розташування вектора \mathbf{M}_h , області зберігання по відношенню до вектора \mathbf{M}_f фіксованої плівки – області зчитування (вектори \mathbf{M}_l плівок області зчитування при цьому антипаралельні). При записі у провідник запису і в сендвіч зчитування подаються імпульси струму, полярність яких залежить від записуваної інформації. Обмежень зверху на величину струмів запису практично немає через високу H_C у ФШ. При зчитуванні полярність імпульсу струму повинна бути незмінною.

4.5 Спін-вентильні елементи для зчитування інформації

СВЗЕ зі спільними областями зберігання і зчитування спроектував дослідницький центр фірми ІВМ (США). ЗЕ розміром $1 \times 6 \text{ мкм}^2$ становиться із двох феромагнітних шарів товщиною 9 нм, розділених прошарком міді 2,2 - 2,5 нм. Один з шарів має високе поле перемагнічування H_T унаслідок антиферомагнітної взаємодії з додатковим ФШ, другий шар – вільний. МО має величину 3 – 5 %. Різниця напруг сигналу зчитування «0» і «1» – 30 мВ. Коли ширина

сендвіча порівнянна або менша ширини доменної межі, перемагнічування відбувається так само, як в однодоменній структурі, тобто за відсутності проміжних станів, і поріг перемагнічування добре відтворюється. Для цього ширина сендвіча не повинна перевищувати 1 мкм.

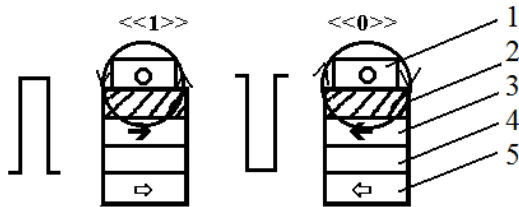
Тип СВЗЕ, запропонований вченими Laboratory Matsushita Electric Industrial (Японія) є прикладом застосування способу кодування із двома паралельними напрямками векторів $\mathbf{M}_{h,l}$ ($\uparrow\uparrow$ і $\downarrow\downarrow$) як «0» і «1». Принцип дії ЗЕ на основі багатошарових структур



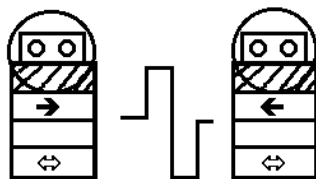
показано на рис. 4.10.

Запис «0» і «1» здійснюється різнополярними імпульсами словарного струму, достатніми для перемагнічування магнітошорсткого і тим більше магнітом'якого шарів. Зчитування проводиться під дією двох послідовних імпульсів I_C різної полярності, що перемагнічують лише магнітом'який шар. Досліджувані зразки ЗЕ мали розміри від (5×40) до (20×40) мкм² зі словарним провідником (багато-розрядний, який допускає зчитування інформації у вигляді слів).

Величина МО становила 4%. Дослідники Institute Electronic Communication (Японія) запропонували структуру ЗЕ $\text{Co}(5 \text{ нм})/\text{NiFe}(0,5 \text{ нм})/\text{Cu}(4 \text{ нм})/\text{Co}(0,5 \text{ нм})/\text{NiFe}(5 \text{ нм})$ із слабкозв'язаними шарами Co (рис. 4.11). Наявність надтонких шарів $\text{Co}(0,5 \text{ нм})$ призводить до збільшення МР коефіцієнта вдвічі порівняно із сендвічем $\text{Co}/\text{Cu}/\text{NiFe}$. У СВЗЕ з роздільними областями зберігання і зчитування ці функції структурно і топологічно розділені. Сенсорна лінія виготовляється із матеріалу з СВ – ефектом і є безперервною доріжкою-сендвічем із накладками, що замикаються і шунтують проміжки між комітками.



a



б

Рисунок 4.10 – Структура ЗЕ: запис (а) та зчитування (б) інформації; 1 – провідник словарного струму; 2 – ізолюючий шар; 3 і 5 – верхня і нижня магнітні плівки; 4 – роздільний шар

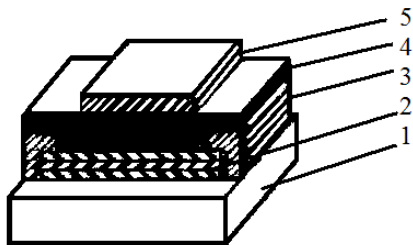


Рисунок 4.11 – Топологія ЗЕ: 1 – підкладка; 2 – СВ структура; 3 – підвідні провідники; 4 – ізолюючий шар; 5 – провідник для словарного струму

Вона становиться із двох обмінно незв'язаних магнітом'яких плівок і прилеглого до однієї із магнітом'яких плівок магнітошорсткого шару, який фіксує **M** найближчої до нього магнітної плівки. Сформовані протравленням

магнітні елементи зберігання, що складаються з однієї магнітної плівки, розміщені над вольфрамовою доріжкою словарної лінії і знаходяться в електричному контакті із нею. Словарна лінія, у свою чергу, розміщена над спін-вентильною структурою.

4.6 Спін-тунельні структури

Велика чутливість до зовнішніх магнітних полів отримана у спін - залежних тунельних структурах (рис. 4.12). У таких структурах шари феромагнетиків розділені тонким шаром діелектрика (< 2 нм), як правило Al_2O_3 , що дозволяє електрону пройти через цей бар'єр. Оскільки у феромагнетику енергія електронів з орієнтацією спіну «уверх» або «вниз» різна, то саме це призводить до спін - залежного тунельного ефекту, який пов'язаний із хвильовими властивостями електрона. Значення тунельного струму, який спрямований перпендикулярно до шарів структури, визначається напрямом векторів магнітних полів шарів феромагнетиків.

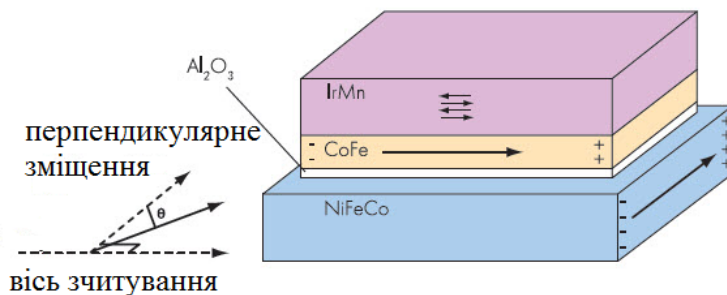
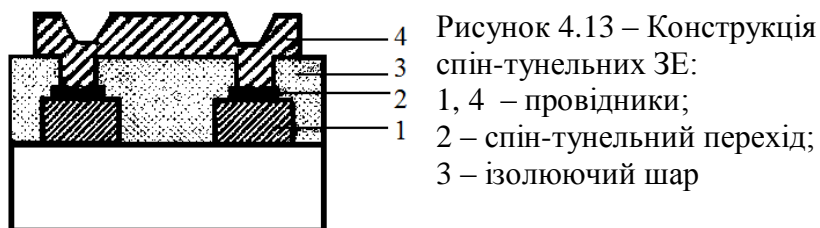


Рисунок 4.12 – Структура STD - елемента

Величина МО в STD - елементах із тунельним бар'єром у вигляді плівок Al_2O_3 або MgO становить 70 і 355 %, відповідно. Як потенціальні бар'єрні шари також можуть бути використані плівки Ta_2O_5 , GaAs і ZnS .

Напруженість магнітного поля насичення таких структур, що залежить від матеріалу магнітних шарів та методів одержання паралельної та антипаралельної орієнтації, коливається у межах від 1,25 до 125 Е, що і забезпечує створення надзвичайно чутливих магнітних датчиків. Завдяки наявності ізолюючого тунельного шару опір цих елементів великий, і вони придатні для роботи з джерелами постійного струму.

СТЗЕ (рис. 4.13) становиться із підкладки з діелектричним шаром, на якому сформовані провідники (1, 4), СТ – перехід (2) та ізолюючий шар (3). Підведення I_S до СТ – переходу здійснюється через магнітні плівки перпендикулярно до їх площині. Над ізолюючим шаром, що захищає СТ – структуру, розташовано один або два керуючих провідники для запису інформації і для динамічного зчитування.



Типова товщина магніторезистивних плівок – 5 – 10 нм, роздільного ізолюючого шару з Al_2O_3 – 0,8 – 1,5 нм. При статичному зчитуванні доцільне додавання ФШ $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$ для кращої стабілізації стану верхньої плівки. Перпендикулярне проходження I_S через СТ – структуру

призводить до відсутності впливу цього струму на напрям $\mathbf{M}_{h,l}$ МР плівок, на відміну від АМР і СВ структур. Це ускладнює запис інформації та вимагає двох провідників керування замість одного.

Особливостями СТЗЕ є його невеликі планарні розміри і великий питомий електричний опір роздільного діелектричного шару, що призводить до достатнього для нормальної роботи елемента електричного опору СТ – переходу. При такій самій товщині МР – плівок, як і в СВ – структурах, малі планарні розміри призводять до різкого збільшення розмагнічувальних магнітних полів, що погіршує стабільність станів ЗЕ з паралельними напрямками $\mathbf{M}_{h,l}$ обох плівок.

Запис у СТЗЕ проводиться шляхом подачі струму в провідник керування або одночасно в два провідники залежно від конструкції СТЗЕ. При цьому відбувається перемагнічування плівки з низьким значенням H_k або обох плівок залежно від типу СТЗЕ за рахунок надання векторам $\mathbf{M}_{h,l}$ потрібної орієнтації.