

Розділ 5 ПРИЛАДИ І ПРИСТРОЇ СПІНТРОНІКИ

Упродовж багатьох років магніторезистивний ефект у феромагнітних товстих плівках використовується при розробленню датчиків магнітного поля і зчитуючих головок, проте впровадження тонкоплівкової технології відкрило нові можливості перед розробниками таких пристроїв і різко розширило сферу їх застосувань. Використання МР – ефекту із застосуванням сучасної інтегральної технології дає можливість створювати датчики і головки гранично малих розмірів з високою чутливістю (незалежною від частоти) у широкому діапазоні (включаючи постійні поля) і можливістю виготовлення на одній підкладці датчиків і головок, а також електронних схем обробки сигналів і керування.

Якщо резистивна смужка у вигляді одношарової анізотропної феромагнітної плівки з початковим електричним опором R_{\perp} буде поміщена у зовнішнє магнітне поле H_{\perp} (лежить у площині плівки перпендикулярно ВЛН), то її опір зміниться на величину ΔR , тобто

$$\Delta R \approx R_0(\Delta\rho/\rho) \cdot h_{\perp}^2 \cos 2\varepsilon,$$

де $\Delta\rho/\rho$ – коефіцієнт МР – ефекту; $h_{\perp} = H_{\perp}/H_k$; ε – кут між ВЛН і напрямом проходження струму.

Змінюючи кут ε , можна змінювати вид характеристики перетворення магніторезистора $\Delta R/(\Delta R)_m = f(h_{\perp})$, де $(\Delta R)_m = R_{\perp}(\Delta\rho/\rho)$ – максимальна зміна електричного опору. Магніторезистор у вигляді смужки із поздовжньою ВЛН ($\varepsilon=0^\circ$) має характеристику перетворення, виражену квадратичною функцією поля $\Delta R/(\Delta R)_m \approx h_{\perp}^2$.

На відміну від запам'ятовувальних елементів, МР – датчики магнітного поля і головки зчитування слугують для перетворення діючого в даний момент магнітного поля

в електричну величину (зміна електричного опору, напруги або вихідного струму). Інша особливість їх застосування в тому, що датчик або головка, як правило, входять як одиничний елемент у відносно складне і дороге вимірювальне, обчислювальне, записуюче, автоматичне регулювальне або інше обладнання. Параметри датчика або зчитуючої головки вирішальним чином впливають на технічні характеристики виробу в цілому.

Для лінійних датчиків необхідна однозначність відповідності вихідного сигналу величині вимірюваного магнітного поля. Для таких датчиків недопустимий або принаймні шкідливий гістерезис. Оскільки датчик часто обернений своїм входом до зовнішнього середовища, то випадкова дія магнітних полів, що багатократно перевищують вимірюваний діапазон, тут більш ймовірна, ніж у запам'ятовувальних пристроях.

Відомо, що МР – датчики можуть застосовуватись як порогові. У цьому випадку посилені вимоги, наприклад, стійкості до дії дуже великих полів, екстремальних температур тощо. У загальному випадку МР – датчики доцільно застосовувати у пристроях, у яких традиційно використовуються датчики на основі ефекту Холла. Типовий МР – датчик – це мостова схема, у чотирьох плечах якої використані магніторезистори.

5.1 Датчики магнітного поля на основі одношарових плівок

В одношарових МР – структурах спостерігається лише АМР – ефект. АМР – смужки сформовані таким чином, що їх поздовжні осі спрямовані вздовж ВЛН – плівки. Для збільшення електричного опору датчика при збереженні мінімальних розмірів кожне плече виготовляється у вигляді

кількох паралельно розташованих АМР – смужок, електрично послідовно сполучених низькорезистивними перемичками з алюмінію або міді.

Для формування відгуку мостової схеми на вимірюване магнітне поле на чутливі елементи двох протилежних плечей мостового датчика наноситься так звана барбер-полюсна (Barber-pole) структура низькорезистивних (Au або Al) смужок (рис.5.1), що забезпечує проходження струму під кутом $+45^\circ$ по відношенню до поздовжньої осі АМР – смужки. В іншій парі протилежних плечей кут нахилу низькорезистивних смужок по відношенню до поздовжньої осі дорівнює -45° . Дія однорідного в площині датчика магнітного поля з напруженістю H призводить до зменшення електричних опорів однієї пари плечей моста і до збільшення – іншої пари. Мостова схема має відносну стійкість до змін температури.

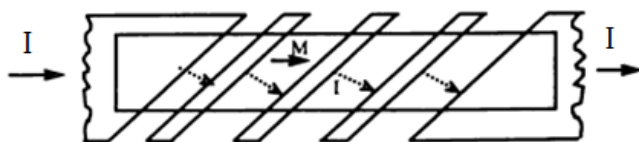


Рисунок 5.1 – Конфігурація барбер-полюсної структури

Інший спосіб побудови одношарових датчиків – розташування АМР – смужок однієї пари протилежних плечей моста під кутом $+45^\circ$ до ВЛН, а смужок іншої пари – під кутом -45° . Одношарові АМР – датчики внаслідок великих розмагнічуючих полів, що створюються на краях смужок векторами намагніченості магнітної плівки, мають великий гістерезис. Компенсувати його вплив можна подаванням перед кожним вимірюванням магнітного поля в додаткову планарну котушку датчика спеціальних імпульсів струму.

Як приклад реалізації МР – датчиків можна назвати одношарові датчики фірми Valvo. Чутливі елементи датчика виконані за тонкоплівковою технологією у вигляді меандрів з пермалою на Si підкладці з розмірами $1,6 \times 1,63 \text{ мм}^2$. Подібні датчики виготовляє фірма Philips. Параметри датчика KMZ-10B, як прилад, наведені в табл. 5.1. Недоліком МР – датчиків є наявність гістерезису, тобто залежність результатів поточного вимірювання від величини первинного магнітного поля. Причина гістерезису пов'язана із стрибкоподібним рухом доменних стінок («стрибки Баркгаузена»). У багатьох випадках ця проблема може бути усунена шляхом подачі перед вимірюванням імпульсу магнітного поля $H \leq 8 \text{ кА/м}$.

У результаті його дії вектор намагніченості магнітної плівки встановлюється кожного разу в одному і тому ж самому напрямі, і тоді процес вимірювання відбувається завжди по одній

Таблиця 5.1 – Характеристики МР датчика KMZ-10B

Діапазон вимірювання магнітного поля, кА/м	$\pm 2,0$
Чутливість, мВ/(В·кА/м)	3,2 – 4,8
Номінальна напруга живлення моста, В	5
Опір моста, кОм	1,6 – 2,6
ТКО, %/К	0,3
Лінійність % при $H=0 - \pm 1 \text{ кА/м}$	$\pm 0,5$
Напруга зсуву, мВ/В	$< \pm 1,5$
Дрейф зсуву %/К; $U=\text{const}; I=\text{const}$	0,01 – 0,3
Дрейф чутливості, %/К; $U=\text{const}$ і $I=\text{const}$	(-0,4) – (-0,1)
Максимальна напруга живлення моста, В	12
Максимальна потужність, мВт	120
Робочий температурний діапазон, °С	(-40) - (+150)

гілці характеристики. Для створення цього поля в МР – датчиках передбачена тонка планарна котушка.

Для зменшення гістерезису і температурної нестабільності МР – датчиків фірмою Honeywell запропоновано ряд цікавих рішень. Електрична схема з'єднання МР – смужок залишається практично без змін. МР – смужки не містять поворотних частин, вони розташовані паралельно і закінчуються з обох боків загостреними торцями. Послідовне з'єднання здійснюється за допомогою провідників-перемичок, накладених на МР – смужки і що сполучають смужки в меандроподібну структуру.

**Таблиця 5.2 – Характеристики АМР датчиків
НМС1001/1002**

Напруга живлення моста, В	5
Опір моста, Ом	850
Температурний діапазон, °С	(-40) –(+85)
Діапазон вимірюваних магнітних полів, А/м	±160
Нелінійність, %	1
Зміна сигналу після дії імпульсів S і R , мкВ	2
Чутливість при $U=8$ В, мВ/(В·Е)	3,2
Густина шуму при 1 Гц, $U=5$ В, нВ/Гц ^{1/2}	29
Порогова чутливість при $U=5$ В і смузі 10 Гц, мкЕ	27
Верхня межа частоти, МГц	5
Амплітуда імпульсів струму в котушці, А	3,2
ТКО, %/К	+0,25

Для виключення впливу на опір торцевих доменів над ними розміщують провідники, що електрично замикають смужки і створюють додаткове магнітне поле поблизу торців смужок. Ця сама фірма випускає серії одношарових одно-, дво- і тривісних анізотропних АМР – датчиків. У робочому діапазоні вимірюваних магнітних полів датчики мають лінійну непарну характеристику (табл. 5.2).

5.2 Датчики магнітного поля на основі багатшарових плівок

5.2.1 Датчик з парною характеристикою вхід-вихід

МР – датчики на основі багатшарових структур унаслідок відносно невеликого гістерезису дозволяють використовувати конструкції як з паралельним, так і з перпендикулярним взаємним розташуванням чутливих елементів у сусідніх плечах мостових схем. У багатшарових структурах вектори намагнічування по-різному змінюють свою орієнтацію у зв'язку із різницею у величині полів розмагнічування через анізотропію форми. При цьому характеристика вхід-вихід мостового датчика симетрична із зсунутими відносно нульового значення поля двома лінійними областями. Переваги такої топології – в її простоті і наявності вихідного сигналу при великих магнітних полях, що важливо для ряду застосувань (наприклад, у дефектоскопії). Недоліки – підвищений гістерезис, що виникає в плечах моста з поперечним розташуванням ВЛН, і необхідність постійного зміщеного Н-поля для роботи в лінійній області.

Інший варіант датчика є мостовою схемою із чотирьох магнітоопорів. На підкладці з діелектричним шаром

розташовані МР – сендвічі, що складаються з нижнього і верхнього захисних шарів Ti або TiN , нижньої МР – плівки, роздільної плівки Ti і верхньої МР плівки. З'єднання сендвічів у мостову схему здійснюється низькорезистивними провідниками. МР – сендвічі закриті ізолюючим шаром, поверх якого розташована планарна котушка для створення магнітного поля, що зміщує робочу точку у центр лінійного діапазону з максимальною чутливістю. Відмінність залежності зміни опору сусідніх плечей від поля досягається взаємно перпендикулярним розташуванням довгих сендвічів, що складають плечі мостової схеми.

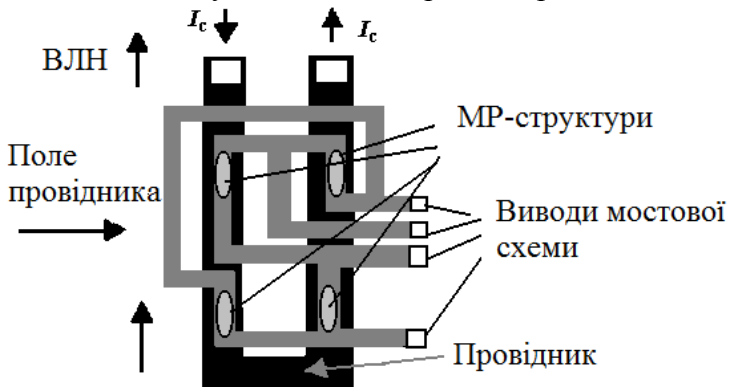
5.2.2 Датчик з непарною характеристикою вхід-вихід

Іншу характеристику вхід-вихід мають датчики з паралельним розташуванням ВЛН усіх сендвічів моста. У цих датчиках у провіднику, прокладеному над магніторезисторами, струмом I_C створюється магнітне поле, яке спрямоване в МР – елементах сусідніх плечей у протилежні боки (рис. 5.2). При такій конструкції характеристика вхід-вихід стає непарною подібно характеристиці датчика з барбер-полісною структурою. Перевагами таких датчиків є практично повна відсутність гістерезису внаслідок малих значень розмагнічувальних полів і можливість регулювання чутливості зміною величини I_C . Недоліки такої конструкції пов'язані з наявністю додаткового провідника і достатньо великими значеннями I_C для датчика з підвищеним полем магнітної анізотропії. Принцип роботи датчика полягає в такому. За відсутності в датчику зовнішнього магнітного поля і постійного струму вектори M_l у двох плівках усіх чотирьох плечей моста встановлюються вздовж ВЛН і взаємно антипаралельні. При пропусканні постійного струму через датчик можна нехтувати впливом магнітних полів,

створених струмом у двох магнітних плівках, оскільки ці поля набагато менші від H_k .

Допускається, що напрями векторів \mathbf{M}_l у двох магнітних плівках не змінюються і залишаються антипаралельними. Керуючий провідник розміщений таким чином, що перпендикулярне до ВЛН магнітне поле від постійного струму діє на смужки однієї пари плечей моста в один бік, а смужки іншої пари – у протилежний. Під дією магнітного поля цього струму вектора \mathbf{M}_l у МР – смужках однієї пари плечей відхиляться на кут $+\varphi$, а іншої пари плечей – на кут $-\varphi$ щодо ВЛН.

Вимірюване магнітне поле діє перпендикулярно до ВЛН, як і поле керуючого провідника. Під дією поля всі вектори \mathbf{M}_l повертаються на деякий кут у його напрямі. При цьому залежно від напрямку вимірюваного поля в МР – смужках двох плечей моста абсолютне значення кута $|\varphi|$ зменшується, а в двох інших – збільшується. Це означає, що збільшується електричний опір однієї пари протилежних плечей моста і зменшується іншої пари, що призводить



Магнітне поле, яке вимірюється

Рисунок 5.2 – Схема датчика з непарною характеристикою

до розбалансу моста і появи вихідного сигналу. Полярність сигналу залежить від напрямку зовнішнього магнітного поля. При малих кутах відхилення залежність вихідного сигналу від величини поля лінійна.

5.3 Спінові транзистори

В основі принципу роботи спінтронних приладів лежать ефекти ГМО та спін-залежного тунелювання. У них зміна напрямку намагніченості здійснюється за допомогою власного внутрішнього або зовнішнього магнітного поля. Спін-поляризований польовий транзистор, СВ-транзистор, транзистор на «гарячих» електронах, логічні елементи, уніполярні спінові діоди і транзистори – лише дещо з перспективних приладів.

Логічним продовженням дослідження МР – ефекту в багат шарових структурах є створення спінового польового транзистора, схема якого наведена на рис. 5.3.

У спіновому польовому транзисторі витік може інжектувати в канал спін-поляризовані (тобто з направленими переважно у одному напрямку спінами) електрони. Передбачається, що напрямок спінової поляризації збігається з напрямком електронного транспорту. Для цього витік має бути однорідно намагніченим (без доменів) ФМ металом або феромагнітно впорядкованим напівпровідником, у яких переважна більшість електронів провідності є спін-поляризованою у напрямку намагніченості. Стік також має бути ФМ матеріалом, який має великий магнітоопір. Напрямок його намагніченості той самий, що і у витоку. Якщо електрони, що пройдуть канал, матимуть таку саму спінову поляризацію, як і спінова поляризація переважної частини електронів стоку, то вони пройдуть через матеріал

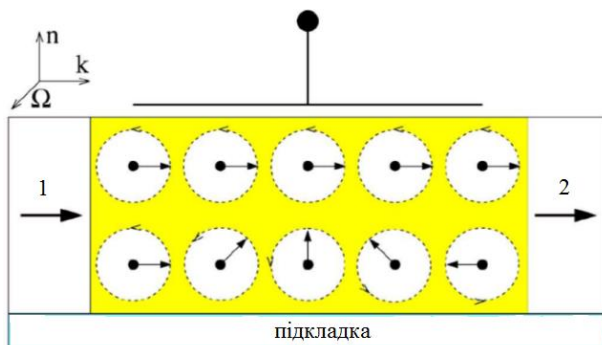


Рис. 5.3. Схема проходження фізичних процесів у спіновому польовому транзисторі: 1 – витік спін-поляризованих носіїв; 2 – стік (детектор спінового стану носіїв); V_3 – напруга, що прикладається до заслону; \mathbf{n} – нормаль до площини структури; \mathbf{k} – хвильовий вектор електронів, що рухаються в каналі під дією напруги витік-стік; Ω – вектор кутової швидкості прецесії спінів електронів під дією V_3

стоку із малим опором (т. зв. низькоомний спіновий канал). У протилежному разі опір буде високим, і електрони переважно розсіюються (високоомний спіновий канал).

Тобто стік відіграє роль детектора спінової поляризації електронів. Затвор пристрою керується електрично (шляхом прикладання напруги V_3). Завдяки спін-орбітальній взаємодії у каналі електричне поле створює ефективне магнітне поле, в якому навколо його напрямку відбувається прецесія електронів із кутовою швидкістю Ω , величина якої залежить від V_3 . На рис. 5.3 верхній і нижній рядки символів показують електрони, у яких прецесія відбувається таким чином. У верхньому ряду, коли величина V_3 або не спричиняє прецесії спінів, або прецесія навколо напрямку Ω відбувається із цілим числом обертів, усі електро-

ни приходять до стоку із напрямом спіну, який збігається із напрямом спінової поляризації, а отже, проходять крізь стік по низькоомному спіновому каналу (транзистор відкритий). Нижній ряд електронів, коли V_3 підібрано так, що електрон рухається у висовокоомному спіновому каналі (тобто спін повертається на півціле число обертів навколо Ω), відповідає ситуації, коли транзистор закритий.

Колекторний струм СВ–транзистора істотно залежить від магнітного стану в базі та суттєво змінюється залежно від напруженості зовнішнього магнітного поля (рис.5.4). Відмінність полів перемагнічування обумовлена різними значеннями коерцитивних сил пермалою ($H_c=0,4$ кА/м) та кобальту ($H_c= 1,76$ кА/м). При великих полях обидва магнітних шари мають паралельні напрями намагніченості та максимальний струм колектора. При зменшенні напруженості магнітних полів вектори намагніченості шарів NiFe та Co стають антипаралельними, а струм колектора I_c різко зменшується. Відомо кілька різних підходів до ідеї підвищення транзистора до поляризації спінів. Історично

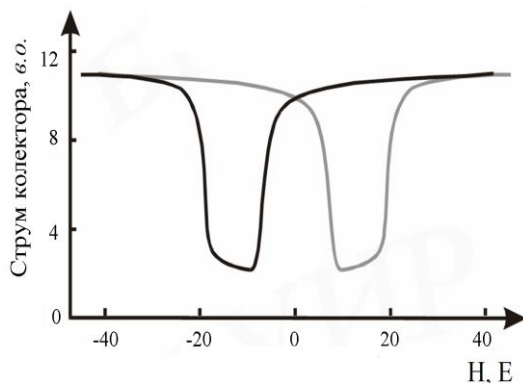


Рисунок 5.4 – Залежність струму колектора у спін-вентильному транзисторі від напруженості зовнішнього магнітного поля

першим підходом було виготовлення спінового транзистора на основі двох феромагнітних плівок, між якими розміщується парамагнітна плівка.

При використанні спін-вентильного ефекту внаслідок малої товщини багатошарової структури електричний опір вимірюється за допомогою пропускання струму в площині шарів. При цьому ефект сильно зменшується, оскільки в цьому випадку багато електронів переміщується всередині одного шару. У СВ – транзисторі електрони інjektуються в металеву багатошарову структуру (базу) із кремнієвої підкладки-емітера. Завдяки спін-вентильному ефекту колекторний струм, величина якого залежить від величини магнітного поля, може перевищувати струм емітера в десятки разів. Особливостями функціонування спінових транзисторів є те, що напрямок руху електронів, що перетинають магнітні шари, спрямований перпендикулярно до площини підкладки, а струм колектора експоненціально залежить від середньої довжини вільного пробігу електронів.

Інший технологічний підхід для створення СВ-транзисторів полягає у конденсації в надвисокому вакуумі аморфного напівпровідника поверх металевої бази. В обох випадках процес літографії забезпечує виготовлення пристроїв достатньо малих розмірів.

Структура спінового транзистора на «гарячих» електронах, що наведена на рис. 5.5, становиться із кремнієвих емітера і колектора та бази у вигляді магнітної плівки Co/Cu. Транзистор працює так. Між емітером і базою виникає такий струм (струм емітера), при якому електрони інjektуються в базу перпендикулярно до шарів спінового заслону.

Оскільки інjektовані електрони проходять через бар'єр Шотткі, то вони входять у базу як нерівноважні гарячі електрони. Коли вони перетинають базу, то починають пружно

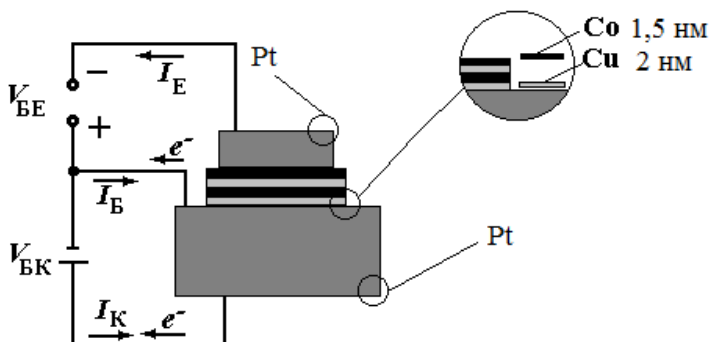


Рис. 5.5. Структура СВ-транзистора на гарячих електронах: V_{BE} – напруга база-емітер; $V_{БК}$ – колекторно-базова напруга; I_E – струм емітера; I_B – струм бази; I_K – струм колектора

або непружно розсіюватися, що призводить до зміни їхньої енергії і розподілу за напрямками спінових магнітних моментів.

Електрони тільки тоді потрапляють у колектор, коли вони накопичили достатню енергію для подолання енергетичного бар'єра з боку колектора. Кількість зібраних у колекторі електронів (колекторний струм) суттєво залежить від СЗРЕ в базі. Важливою перевагою спін-вентильного транзистора на гарячих електронах виступає відносно великий магнітний ефект при кімнатній температурі при незначних магнітних полях.

Подальший розвиток спінтроники пов'язаний із спін-тунельним транзистором (СТ), структура якого становиться з двох ферромагнітних шарів, розділених тонким діелектричним шаром (тунельний бар'єр). Опір СТ – транзистора залежить від орієнтації магнітних моментів двох фе-

ромагнітних шарів: він мінімальний, коли моменти паралельні один одному, і максимальний, коли моменти антипаралельні. У малих магнітних полях при кімнатній температурі такі пристрої мають МР коефіцієнт значно більший, ніж в СВ – структурах. Транзистори такого типу можуть бути застосовані як комірки магнітних енергонезалежних ЗП.

Концепція СТ-транзистора на гарячих електронах та його структура показані на рис. 5.6. Відомі методи удосконалення емітерного бар'єра, структури бази і бар'єра Шотткі, що дозволяють підвищити ймовірність передачі електронів приблизно до 50 %. Відносний магнітний відгук СТ-транзистора при $T=300$ К становить близько 300 %, а при $T=77$ К магнітострум перевищує 500 %. Характерно, що різні механізми розсіювання гарячих спін-поляризованих електронів можуть істотно змінювати величину відносного магнітного відгуку.

Якщо струм витоку колектора незначний, то струм I_c не залежить від зворотної напруги, прикладеної до бар'єра Шотткі. Це пов'язано з тим, що напруга між базою та колектором не змінює його висоту. Зміна емітерного струму також не впливає на енергію, при якій гарячі електрони інжектуються в базу.

Необхідно зазначити, що подальший розвиток спінтроніки пов'язаний із створенням елементів на квантових ефектах для розроблення спінових процесорів.

5.4 Датчики на основі ефекту ГМО

На базі тонкоплівкових структур із ГМО, осаджених на кремнієвій підкладці, виготовляються різні елементи датчиків – резистори, резисторні пари, напівмости, мости Уїтстона. У типовому датчику чотири ГМО – резистори

формують міст Уїтстона, вихідна напруга якого пропорційна зовнішньому магнітному полю. Температурний коефіцієнт усіх резисторів, виготовлених із одного і того самого матеріалу, однаковий. Два резистори моста становлять собою активні елементи датчика, а два інших

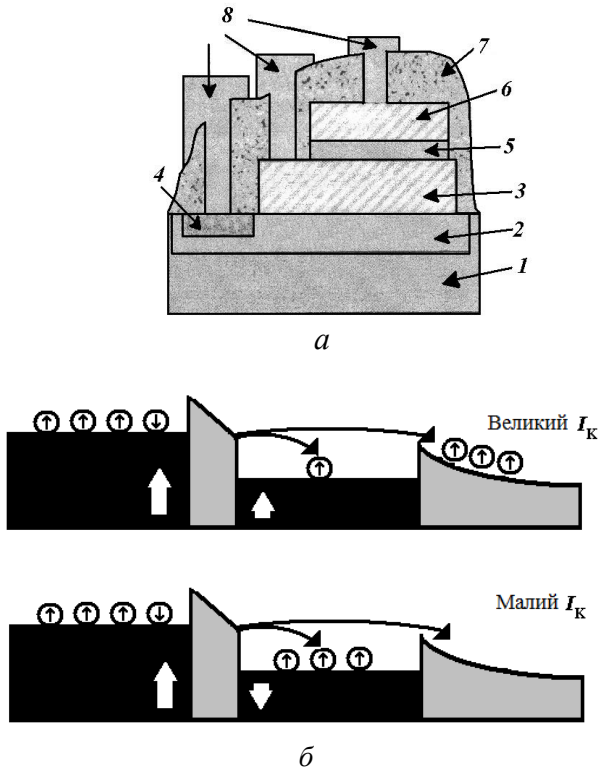


Рисунок 5.6 – Поперечний переріз (а): 1 – підкладка р-типу; 2 – колектор n-типу; 3 – ферромагнітна база; 4 – p^+ -контакт; 5 – тунельний шар Al_2O_3 ; 6 – магнітний емітер; 7 – Si_3N_4 ; 8 – Al та схематичне пояснення (б) принципу роботи СТ-транзистора на гарячих електронах

(пасивних) виконують функцію опорних елементів. На них наносяться невеликі екрани з плівки пермалою товщиною близько 100 нм, що захищають резистори від дії зовнішнього магнітного поля. Поверхневий опір усіх чотирьох резисторів однаковий, але зміна опору на 10 % активних резисторів викликає зміну його вихідної напруги на 5 %.

Для підвищення чутливості датчика у ряді випадків використовуються додаткові структури з пермалою (кілька товстих шарів, розділених прошарком високо резистивного або діелектричного матеріалу), що виконують функцію концентраторів магнітного потоку. Активні резистори розміщуються в зазорі між концентраторами (рис. 5.7).

Використання концентратора магнітного поля – один із шляхів збільшення чутливості магніторезистивних і ГМО – датчиків. Завдяки своїй сумісності з використовуваною для виготовлення ряду магніточутливих елементів (магніторезисторів, магнітодіодів, магніотранзисторів, магніточутливих елементів, датчиків Холла) планарною технологією найперспективнішими є товстоплівкові (товщина порядку одиниць мікрон мікрометрів). Концентратори магнітного поля формують методом конденсації на дві феритові поверхні в зазорі головки, що різко збільшує величину напруженості магнітного поля і дає можливість істотно підвищити густину інформації магнітного носія. У магніотранзисторах і МР – датчиках концентратори, що збільшують напруженість магнітного поля до 10 разів, виконуються, як уже зазначалось раніше, у вигляді двох паралельно розташованих багатошарових товстоплівкових структур з високорезистивними або тонкими діелектричними роздільними шарами та вузьким зазором між ними, в якому розміщений магніточутливий елемент. Магнітне поле спрямоване перпендикулярно до зазору. При цьому напрями векторів намагніченості сусідніх магнітних плівок

антипаралельні, що відповідає мінімуму енергії багатошарової структури. Відношення розміру зазору між концентраторами до довжини одного з них визначає ступінь впливу напруженості магнітного поля на параметри резисторів. Концентратори можуть виконувати також роль екранів, якщо розмістити і два інших резистори під ними. Чутливість моста можна варіювати, змінюючи зазор між концентраторами та їх довжину. Використання концентраторів дозволяє створювати датчики з полями насичення від 15 до 100 Е (розмір промислового датчика $6 \times 5 \text{ мм}^2$, загальний опір резисторів – 5 кОм).

ГМО – датчики на основі моста Уїтстона, що працюють у режимі гістерезису (за відсутності струму зміщення) або в лінійному режимі (при струмі 40 мА), також можуть виготовлятися на основі STD – структур. Режим гістерезису встановлюється у випадках, коли при перевищенні граничного значення напруженості магнітного поля

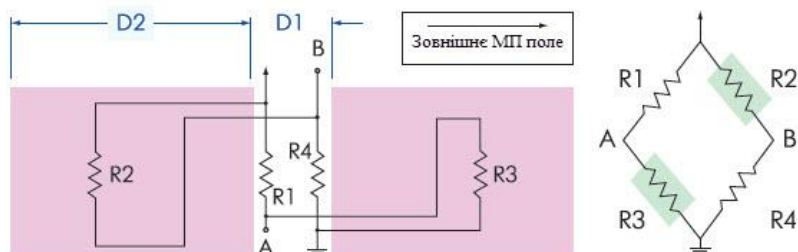


Рисунок 5.7 – Схема ГМО-датчика на основі моста Уїтстона:

D1 – ширина зазору між концентраторами;

D2 – довжина концентратора;

R1 і R4 – активні резистори, розміщені в зазорі між концентраторами;

R2 і R3 – опорні резистори

(порядку ± 1 Е) необхідна зміна сигналу. Датчики на STD –структурах мають такі параметри: діапазон лінійності ($\pm 0,5$ Е); двополярний вихідний сигнал; чутливість за напругою (10 – 100 мВ/Е); поле насичення (± 1 Е); опір моста (5 – 50 кОм); споживання потужності (2 – 20 мВт за хвилину); розмір кристала (1,65x2,14 мм²); діапазон робочих температур (- 40) – (+185) С; максимальна робоча напруга (15 В). Лінійний режим ідеальний для реєстрування незначних змін магнітного поля.

Відома велика кількість сфер застосування ГМО – датчиків. У промисловому обладнанні вони застосовуються для виявлення намагнічених об'єктів, отворів в пластинах феромагнетиків, реєстрації наявності чи відсутності провідників, наявності в них дефектів, наявності оксиду заліза у червоній фарбі банкнот, для знаходження підземних провідних магістралей і навіть непровідникових водяних труб та вимірювання електричного струму. Як приклад, на рис.5.8 наведені структури чутливих елементів ГМО-датчиків переміщення і руху (рис.5.8 а, б) та повороту об'єктів (рис.5.8 в,г). Точність вимірювання кутового положення становить $\sim 1^\circ$, діапазон робочих температур від -40 до 150 °С. Перевага ГМО-датчика на основі багатошарової плівки полягає в тому, що він має інтенсивний сигнал (більше 10 %), але він уніполярний, і це не дає можливості здійснювати магнітний запис інформації. У той самий час ГМО-датчик на основі СВ – біполярний, але величина його сигналу не перевищує 10 %.

Відмітимо, що якщо маркувати перший тип ГМО-датчика прикріпленим до нього невеликим постійним магнітом (як у випадку СВ ГМО – датчика), то його також можна використовувати для вимірювання кута повороту. Але у цьому випадку необхідно користуватися кривою

градування (рис.5.8 г) залежності величини ГМО від кута повороту об'єкта із прикріпленим до нього магнітом.

Також представляє інтерес ГМО-датчик прискорення, розроблений спеціалістами лабораторії реактивних двигунів Каліфорнійського інституту технології, космічного центру Ліндона Джонсона, університету Райса і дослідницького центру Ленглі. До цього часу датчик прискорення виготовлявся на основі електромеханічних, п'єзоелектричних, пьезорезистивних і ємнісних елементів. Конструктивно він становиться з мембрани із нітриду кремнію товщиною 0,5 мкм, що формується об'ємною обробкою кремнієвої підкладки; магнітотверду тонку плівку, напилену поверх мембрани, і ГМО-елемент, виготовлений шляхом вакуумного напилення на другу кремнієву підкладку. При збиранні датчика обидва кристали поєднуються методом анодного зварювання. Датчик визначає прискорення, реєструючи зміну магнітного поля, викликаного зміщенням мембрани з магніто – твердою плівкою. Типова структура чутливого елемента у таких датчиках $\text{Si/SiO}_2/\text{Ta/Cu/Co/FeNTa}$. Шар Co між провідним шаром Cu і пермалою запобігає зміщенню Cu і пермалою, яке спостерігається при температурі датчика менше 200°C . Товщина шарів ГМО – структури становить 30 - 40 нм. Як матеріал магнітотвердої плівки використовується CoCrTaPt , FePt або CoPt .

Технологія ГМО знайшла комерційне застосування багато в чому завдяки американській компанії NVE, науковцями якої на базі ГМО – резистора із структурою спінового вентиля створений датчик, що реєструє кутове положення в межах 360° . Структура ГМО – датчика, як зазначалося раніше, завдяки можливості отримання великого вихідного сигналу, малим розмірам і простоті освоєння масового виробництва знайшла широке застосування в головках зчитування.

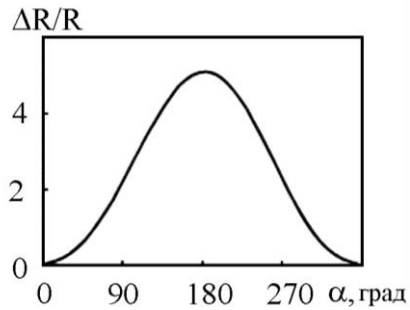
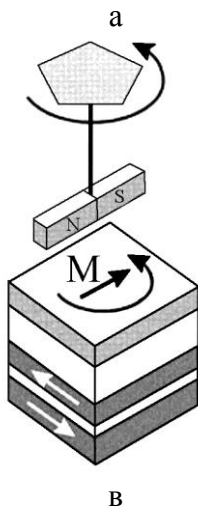
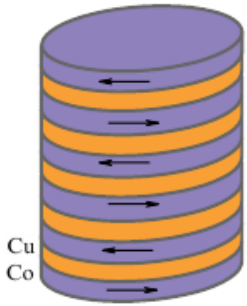


Рисунок 5.8 – Чутливі елементи ГМО – датчиків на основі багат шарової (а) та спін-вентильної (в) пліткових структур для детектування положення і повороту об'єкта. Залежність величини ГМО від товщини немагнітного прошарку Cu (б) та робоча характеристика датчика повороту (г)

Це і стало стимулом до створення іншого типу кутового датчика (рис.5.9), який не вимагає фізичного контакту (див рис.5.8 в) для формування вхідного сигналу і відрізняється високою зносостійкістю. ГМО- датчик має структуру Ta/NiFeCo/CoFe/Cu/CoFe/Ru/ CoFe/CrMnPt. Напруженість магнітного поля фіксованого шару, яку створює тришарова синтетична антиферомагнітна структура CoFe/Ru/ CoFe, перевищує 500 Е. Таке значення обумовлене нульовим результуючим кінцевим магнітним моментом структури в результаті сильного зустрічно-паралельного зв'язку між двома шарами CoFe однакової товщини через тонкий шар Ru. Обмінний шар, що забезпечує фіксовану орієнтацію магнітного поля синтетичної структури (CrMnPt), відрізняється високою температурою блокування і термічною стабільністю при відпалюванні упродовж однієї години при температурі 250 °С. Як магніто-м'який матеріал з вільно орієнтованим полем використовується двошарова структура NiFeCo/CoFe. Коерцитивна сила уздовж осі легкого намагнічення поля цього шару складала ~ 4 Е. Опір СВ- резистора залежить від кута θ між вільно орієнтованим і фіксованим магнітними полями.

Якщо прикласти зовнішнє магнітне поле $H > H_s$ шару з вільною орієнтацією і меншим, ніж у фіксованого поля, то вільне поле орієнтується відповідно до зовнішнього магнітного поля. Таким чином, значення МО визначатиметься $\cos \theta$ у діапазоні від 0 до 180°. Для отримання датчика кутового положення на діапазон 360° потрібний другий резистор із СВ – структурою та із затримкою сигналу щодо першого на 90°. Опір одного визначатиме $\cos\theta$, опір іншого – $\sin\theta$.

З метою компенсації теплового дрейфу, який виникає при експлуатації приладу в реальних умовах, датчик кутового положення виконується у вигляді двох напівмостів Уїтстона. Повний опір одного напівмоста в такій схемі дорівнює

величині включених послідовно резисторів, причому опір одного плеча залежить від $-\sin\theta$, а опір іншого – від $\sin\theta$. Аналогічно, опір другого напівмоста дорівнює величині включених послідовно опорів, що залежать від $-\cos\theta$ і $\cos\theta$, відповідно. Такий міст може працювати при постійній або змінній напрузі.

Один із найперспективніших напрямів розвитку малогабаритних магнітних датчиків – створення спінтронних біодатчиків типу «лабораторія на кристалі» для систем біомедичного аналізу, в основі якого лежить метод приєднання магнітних міток до рідини, що захоплюється ГМО- датчиком, що фіксує кількість міток. Його конструкція являє собою інтегровану платформу на основі кремнієвої мікросхеми з трьома мостами Уїтстона розміром 20×4 мкм². Опорні ГМО – датчики моста захищені шаром діелектричного полімера. Спінновий вентиль датчика має таку структуру: Ta/NiFeCo/Ta/NiFeCo/CoFe/Cu(2,5нм)/CoFe/CrPtMn. Резистори для зчитування розміщуються безпосередньо під каналом шириною 13 мкм і глибиною 18 мкм, через який пропускається струмінь мікропроби (довжина 5 мкм), що містить порядку $5 \cdot 10^8$ магнітних наночастинок розміром 10 нм. Канал відокремлюється від СВ – структури шаром нітриду кремнію товщиною 300 нм. У полімерній кришці системи мікрообробкою формується канал шириною 30 мкм і глибиною 25 мкм, розміщений перпендикулярно до мікροструменевого. В області перекриття двох каналів можливий перехід струменя з одного каналу в інший. Система на кристалі монтується на друковану плату, до входних отворів якої під'єднуються мікрокапіляри. В області перекриття двох каналів виникає потік рідин, що не перемішуються. Система розташовується між полюсами мініатюрного електромагніту, поле якого направлене вздовж ВЛН ГМО – елемента. Швидкість потоку визначається шляхом кореляції сигналів двох мостів. Її

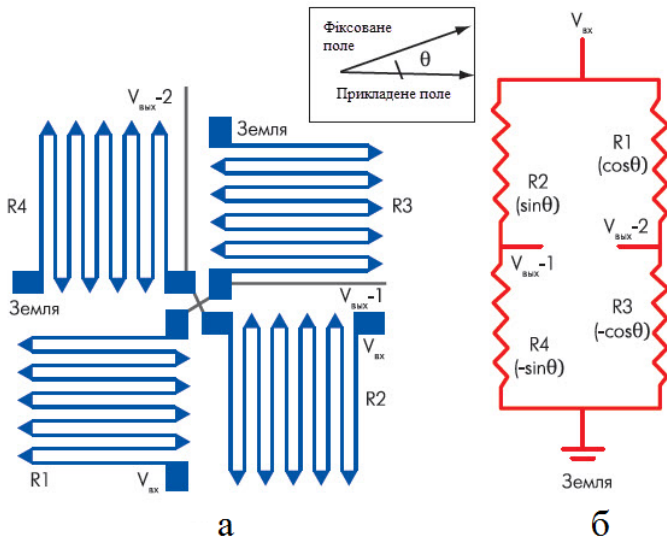


Рисунок 5.9 – Конфігурація (а) та схема (б) кутового датчика

розрахункове значення дорівнює $19,0 \pm 0,4$ мм/с, що добре узгоджується із швидкістю накачування насоса – 21 ± 2 мм/с.

Постійно відбувається розширення галузей застосування ефекту ГМО, наприклад, спінові вентиляції набули широкого використання і як гальванічні ізолятори, що виконують ту саму функцію, що й оптоелектронні, та забезпечують розв'язку ланцюгів з живлення та заземлення. Основні елементи гальванічного ізолятора – плоска котушка та ГМО-датчик, що вмонтовані інтегральну схему (рис.5.10). Для передавання сигналу з одного ланцюга на інший по котушці пропускається струм. Магнітне поле, створене струмом, впливає на чутливий елемент ГМО-датчика. Ізо-

лятори такого типу працюють у 10 разів швидше за сучасні оптичні.

Інше застосування ГМО-датчиків проілюстровано на рис.5.11 і 5.12 на прикладі псевдоспін-вентилів для вимірювання поздовжньої деформації. Відмінність псевдоСВ порівняно із типовим СВ полягає в тому, що обидва магнітні шари різної товщини виготовляються із одного й того самого феромагнітного матеріалу (у даному випадку – із Co). Різниця в товщині плівок Co обумовлює різну їх коерцитивність і дозволяє функціонувати псевдоСВ. На рис.5.12 наведена залежність величини ГМО псевдоСВ від товщини немагнітного шару $Au(d)$ при сталому навантаженні або за його відсутності. Значна зміна ГМО дає можливість використовувати псевдо СВ як чутливий елемент датчика деформації, який знайшов промислове застосування. Приклад кривих градування такого датчика для випадку поздовжньої деформації наведено на рис.5.12.

Очевидно, що для зручності вимірювань деформації найкраще використовувати залежності, що наведені на даному рисунку під номерами 1, 3 та 5 і близькі до лінійних.

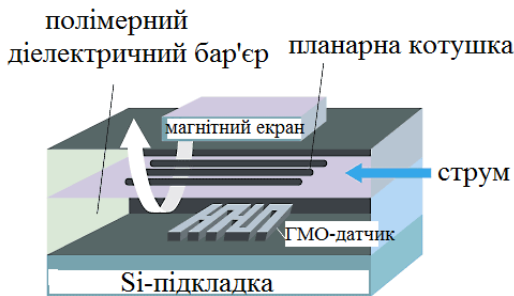


Рисунок 5.10 – Структура гальванічного ізолятора на основі ГМО-датчика

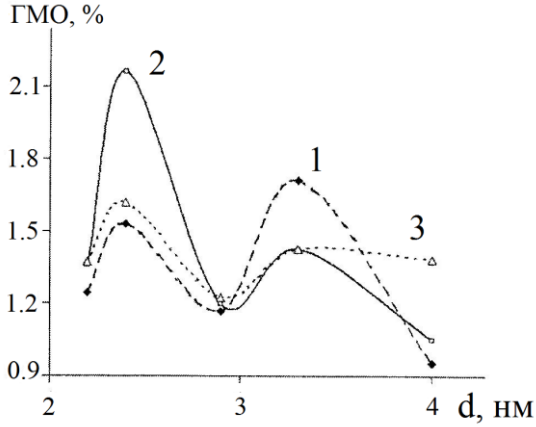


Рисунок 5.11 – Залежність ГМО псевдоспін-вентилля Cr(5нм)/Au(2,5нм)/Co(5нм)/Au(dнм)/Co(2нм) від товщини d плівки Au: 1 – стиснення (- 0,86%); 2 - розтягування 0,86% і 3 – без деформації

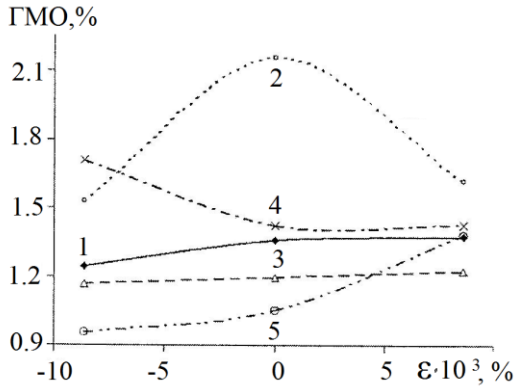


Рисунок 5.12 – Залежність величини ГМО від поздовжньої деформації для псевдоспін-вентилля Cr(5нм)/Au(2,5нм)/Co(5нм)/Au(dнм)/Co(2нм) для різних товщин плівки Au, нм: 1– 2,2; 2– 2,4; 3– 2,9; 4– 3,3 та 5– 4,0

5.5 Застосування матеріалів з ГМО

Останніми роками спостерігається значний інтерес до багатошарових магнітних структур, у яких спостерігається ефект ГМО, з точки зору їх практичного застосування в галузях обчислювальної техніки та автоматизованих системах з використанням різного роду сенсорів. Магнітні елементи, завдяки таким перевагам, як енергозалежність, широкий температурний діапазон, радіаційна стійкість, можливість використання планарної інтегральної технології, займають особливе місце серед елементів твердо тільної електроніки. Багатошарові плівкові магніторезистивні елементи мають енергозалежність у режимі зберігання і необмежену кількість перезапису, високу радіаційну стійкість, широкий температурний діапазон, а також можливість зменшення їх розмірів до 0,1 мкм. Вони широко застосовуються в авіаційній, космічній та автомобільній промисловості, медицині та інших галузях виробництва. Швидкозростаючим ринком для таких пристроїв є автомобільний сектор, ключовими факторами розвитку якого є потреба в поліпшеному керуванні двигунами внутрішнього згорання та системами гальмування.

Об'єднання ГМО-матеріалів з напівпровідниковими транзисторами приведе до дуже істотного збільшення густини запису інформації, чутливості датчиків і потенційно до створення сімейства радіаційно стійких логічних мікросхем та квантових комп'ютерів.

Кількість матеріалів, у яких спостерігається ефект ГМО, та варіанти їх використання на практиці досить різноманітні (рис.3.7). Один з очевидних напрямів застосування нових матеріалів із ГМО – це створення високочутливих головок для зчитування інформації з магнітних носіїв (магнітна стрічка, магнітний диск тощо). Головка “роз-

пізнає” інформацію, що збережена на носіях, за допомогою детектування крайових полів, що виникають на межах доменів із протилежною орієнтацією магнітних моментів. Ці поля детектуються робочим матеріалом головки, для якого характерний магнітоопір, тобто опір чутливого елемента змінюється пропорційно зміні магнітного поля. За інших рівних умов чутливість такої головки залежить від магніторезистивних властивостей матеріалу, що використовується як сенсорний елемент. Як магніторезистивний матеріал у магнітних головках широко використовується пермалой ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$), МО якого становить 2 – 2,5 % у полях 0,4 – 0,8 кА/м при кімнатній температурі.

Перемагнічення феромагнітного матеріалу відбувається за рахунок руху доменних стінок. Коли частота коливань поля сягає десятків мегагерц, пінінгування доменних стінок на структурних дефектах починає перешкоджати процесам перемагнічування і відповідно погіршує експлуатаційні характеристики виробів із традиційних металевих сплавів. Гранульовані матеріали позбавлені цього недоліку, оскільки їх розміри настільки малі, що вони не розбиваються на окремі домени і становлять собою єдиний монодомен. За таких умов процес перемагнічування феромагнітного сплаву не ускладнюється переміщенням доменних стінок і тому частотні межі якісної роботи гранульованих матеріалів значно вищі, ніж у гомогенних сплавів.

З огляду на це розробляють високоякісні магнітні головки та чутливі елементи із використанням гранульованих магніторезистивних матеріалів, одним із недоліків яких є те, що для реалізації ГМО-ефекту необхідні магнітні поля $H > 10$ кА/м.

На основі спінових вентилів створено експериментальні зчитувальні головки, розроблено високочутливі

магнітні реле. Подібні тришарові структури, що складаються з магнітотвердого шару, магнітом'якого шару і діелектричного прошарку (використовується тунелювання електронів через діелектричний бар'єр), застосовують для створення спін-тунельних переходів, керованих магнітним полем. На таких елементах створено нанометрові комірки пам'яті.

Гранульовані ізотропні матеріали можна використовувати як надчутливі датчики температури (оскільки температурна залежність електроопору у них перевищує чутливість нинішніх вугільних і напівпровідникових термодатчиків приблизно на порядок), та як чутливі датчики поля (заміна датчиків Холла). Однак слід пам'ятати про сильну температурну залежність їх опору і необхідність забезпечення якісної термостабілізації датчиків.

На основі манганітів лантану вже створено перші виробни – телефонну мембрану. Плівка манганіту наноситься на мембрану, що розміщується у неоднорідному магнітному полі електромагніту. Звукові коливання переміщують плівку в цьому полі і змінюють її опір, що спричиняє зміну спаду напруги на плівці. Навіть без підсилювачів електричний відгук на звук становить значну величину – кілька мілівольт.

Таким чином, використання матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів у вигляді багатошарових плівок, мультишарів, гранульованих плівкових сплавів, спінових клапанів на основі металів та напівпровідників як чутливих елементів приладів різного функціонального призначення та інформаційних матеріалів з високою щільністю запису інформації є вигідним і перспективним напрямом спінової електроніки.