

Практична робота 7-8

Спінові транзистори і датчики на основі ефекту гігантського магнітоопору (ГМО)

Теоретичні відомості

У металах і сплавах за кімнатної температури збільшення електричного опору при дії магнітного поля не перевищує 1 %. У феромагнетиках величина опору залежить від орієнтації вектора намагніченості $\mathbf{M}$ відносно напрямку електричного струму в матеріалі. Цей різновид магнітоопору (МО) називають *анізотропним магнітоопором* (АМО).

Кількісною характеристикою АМО є т. зв. магніто-резистивний коефіцієнт $\Delta\rho/\rho$, який можна визначити таким чином:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\overline{\Delta\rho}}{\overline{\rho}} = \frac{\rho_l - \rho_t}{\frac{1}{3}\rho_l + \frac{2}{3}\rho_t},$$

де $\overline{\rho}$ – середнє значення питомого опору розмагніченого зразка.

У магнітних матеріалах також виявлено ефект гігантського магнітоопору (ГМО), який уперше спостерігався в надгратках (мультишар) Fe/Cr, виготовлених методом молекулярно-променевої епітаксії, – періодичних структурах із чергуванням шарів Fe товщиною 3 нм і Cr – 4 нм (рис. 4.1).

Великі значення, незалежність від орієнтації магнітного поля і значне зростання $\Delta R/R$ при збільшенні числа періодів структури, а також зменшення опору в разі накладання магнітного поля (геометрії вимірювання) свідчать про новий механізм формування магнітоопору, що одержав назву ГМО-ефекту і був виявлений у надгратках Co/Cu, Co/Ru, Co/Cr, Fe/Cu, Co/Au, NiFe/Ag та ін. Характерною рисою цього класу матеріалів із сильною антиферомагнітною взаємодією є необхідність достатньо сильних магнітних полів насичення

(0,8–1,6 МА/м). Іншою особливістю таких надграток є підвищена чутливість $\Delta R/R$ до технологічних параметрів і товщини шарів.

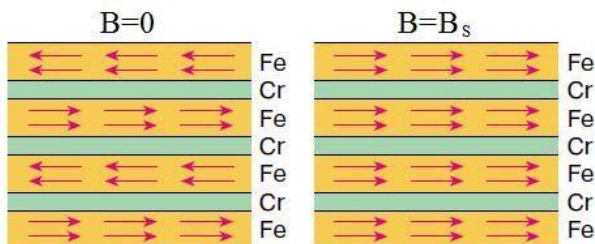


Рисунок 4.1 – Схематична будова мультишару Fe/Cr. Стрілки показують напрямки магнітних моментів атомів Fe

Магніторезистивний запам'ятовувальний елемент (ЗЕ) повинен забезпечувати запис, зберігання і зчитування інформації. В усіх типах магніторезистивних ЗЕ для виконання цих функцій використовують багатшарові смужки, що містять ферромагнітні плівки. Використовують два варіанти запису інформації в МР-елементах – перпендикулярний і поздовжній (рис. 4.2). Метод перпендикулярного запису – це технологія, за якої біти інформації зберігаються у вертикальних доменах, що дозволяє використовувати більш сильні магнітні поля та зменшувати площу матеріалу, необхідну для записування 1 біта інформації. У 2009 році була досягнута щільність запису дисків 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 використовують два стійкі стани магнітних плівок, що приймаються за «0» та «1». Ці стани визначаються гістерезисом, і під час записування інформації створюються прикладанням до ферромагнітної структури ЗЕ – магнітних полів, що генеруються струмами в

спеціальних керувальних 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 керувальними струмами зчитування, що проходять через магнітну структуру і по керувальних провідниках.

На рисунку 4.2 схематично зображений ЗЕ у вигляді смужки з двох феромагнітних плівок 1, через який проходить сенсорний струм, що створює в сусідніх плівках антипаралельні магнітні поля. Між плівками розміщений немагнітний роздільний шар 2. Для СТМР (спін-тунельних магніторезистивних) елементів, у яких сенсорний струм проходить перпендикулярно до площини плівок, структура інша, хоча основний елемент – сендвіч із роздільним шаром – залишається.

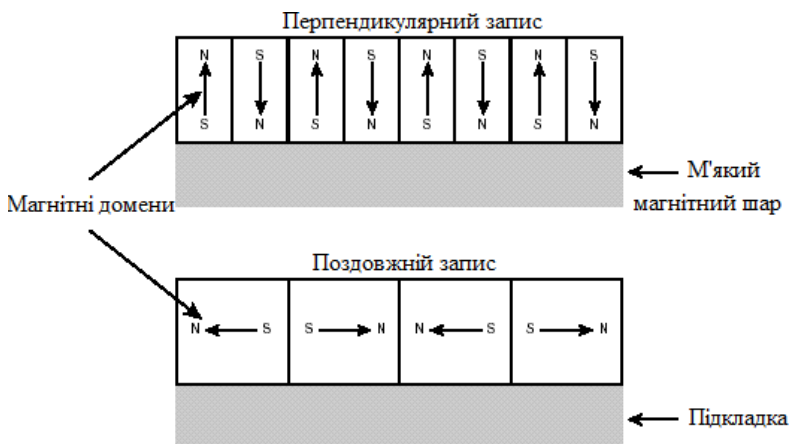


Рисунок 4.2 – Схема перпендикулярного і поздовжнього записів інформації

Запам'ятовувальний елемент – це пороговий елемент із гістерезисною характеристикою, що входить до

запам'ятовувальної матриці пристрою. На його основі проєктують енергозалежні репрограмувальні мікросхеми пам'яті зі щільністю зберігання інформації до 10^7 біт/мм², з неруйнівним зчитуванням, із довільною вибіркою та необмеженим числом циклів перезапису інформації.

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 чутливість до завад. Ці властивості й призвели до того, що елементи на основі ефекту ГМО насамперед набули застосування в зчитувальних головках жорстких дисків. Це дозволило приблизно за десятиріччя збільшити щільність запису жорстких дисків із 4,1 до більше ніж 1 Тбіт/дюйм².

Пам'ять MRAM є енергонезалежною пам'яттю. Час вибірки даних у MRAM може становити менше ніж 10 нс, що в п'ять разів менше, ніж у флеш-пам'яті, а час запису – порядку 2 нс (на три порядки менший, ніж у флеш-пам'яті). Водночас енергоспоживання магніторезистивної пам'яті вдвічі менше, ніж у флеш- та динамічної пам'яті DRAM (Dynamic Random Access Memory).

Під час записування струм, що проходить по розрядній і числовій шинах, наводить перехресне магнітне поле, яке змінює магнітний стан вільного шару. Під час 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»).

Структура спінового транзистора на «гарячих» електронах складається з кремнієвих емітера і колектора та бази на основі плівки Co/Cu. Між емітером і базою виникає струм, за якого

електрони інжектуються в базу перпендикулярно до шарів спінового заслону. Оскільки інжектвані електрони проходять через бар'єр Шотткі, то вони входять у базу як нерівноважні «гарячі» електрони. Коли вони перетинають базу, то починають пружно або непружно розсіюватися. Електрони лише тоді потрапляють у колектор, коли вони накопичили достатню енергію для подолання енергетичного бар'єра з боку колектора. Колекторний струм залежить від спін-залежного розсіювання електронів у базі. Важливою перевагою спін-вентильного транзистора на «гарячих» електронах є відносно великий магнітний ефект за кімнатної температури при незначних магнітних полях.

Питання до семінарських занять

1. Фізичні процеси в спінових транзисторах.
2. Типи спінових транзисторів, їх параметри.
3. Конструкція та принцип дії спін-транзисторної МПДД.
4. Спіновий польовий транзистор. Спін-вольтаїчний ефект.
5. Принцип дії магнітодіода.
6. Будова та принцип дії спінового світловипромінювального діода.
7. Спін-залежне розсіювання електронів.
8. Анізотропний, тунельний, колосальний магнітоопір.
9. Спін-вентильні структури.
10. Класифікація датчиків на основі ГМО-ефекту.
11. Фізичні принципи магнітного записування інформації.
12. Магніторезистивна оперативна пам'ять.