

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ І КОНСТРУКЦІЯ СУЧАСНИХ
НОСІЇВ ЕЛЕКТРОННОЇ ІНФОРМАЦІЇ**

Студент гр. ЕП - 61

Д.І. Сещенко

Науковий керівник

к.ф - м.н, ст. викладач



Ю.М. Шабельник

Завідувач кафедри ЕЗПФ,

д.ф. – м.н., професор



І.Ю. Проценко

Суми 2020

РЕФЕРАТ

Предметом дослідження є функціональні та конструктивні особливості сучасних носіїв електронної інформації, параметри спін-залежного розсіювання електронів.

Метою даної роботи є ознайомлення з конструктивно-технологічними та функціональними особливостями спінових діодів та транзисторів різного функціонального призначення, різних типів пам'яті на ефекті ГМО, проведення критичного аналізу переваг та недоліків даних приладів. А також розрахунок основних параметрів спін залежного розсіювання електронів.

Розглянуто та проведено критичний аналіз переваг та недоліків різних типів запам'ятовуючих пристроїв: перфокарт, магнітних стрічок, флеш-пам'яті та «бігової» пам'яті тощо.

Установлено, що основними критеріями, які характеризують запам'ятовуючий пристрій є: щільність запису, кількість циклів перезапису, енергоефективність, стійкість до впливу зовнішніх факторів. Так, технологія HAMR, де робочими магнітними шарами виступають $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$, CoPt і Co_5Sm , дозволяє створити запам'ятовуючі пристрої із щільністю запису до 2 Тбайт/дюйм², та енергоспоживанням до 200 мВт. Об'єм переданих даних однією голівкою становить більше ніж 2 Пбайт.

Розраховано параметри спін-залежного розсіювання для плівкової системи Fe/Au/Fe/П. Параметр об'ємної асиметрії – α_m лежить в межах від 2,47 до 3,85, параметр спінової асиметрії – β змінюється від 0,42 до 0,59. Основними носіями є електрони зі спіном «верх», так як питомий опір мажоритарних приблизно у 2 рази більший за питомий опір міні тарних носіїв заряду.

Робота викладена на 33 сторінках і складається з трьох розділів, містить 17 рисунків, 3 таблиці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СПІН, ФЛЕШ-ПАМ'ЯТЬ, «БІГОВА» ПАМ'ЯТЬ, СПІН-ЗАЛЕЖНЕ РОЗСІЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ, ГМО, ПАРАМЕТРИ СПІНОВОЇ АСИМЕТРІЇ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ. ТЕХНОЛОГІЇ ХХ СТОЛІТТЯ	6
1.1 Станок Жаккара. Перфокарти.....	6
1.2 Магнітні стрічки.....	9
РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ І КОНСТРУКЦІЯ СУЧАСНИХ НОСІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ІНФОРМАЦІЇ	13
2.1. Спінова електроніка – сучасні носії інформації.....	13
2.2. Пам'ять на магнітоопорі та спін-вентильний транзистор.....	16
2.3. Зчитувальна головка на гігантському магнітоопорі.....	18
2.4. Система магнітного теплового зберігання даних.....	20
2.5. Сучасні типи флеш-пам'яті.....	22
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТРИШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ ЗРАЗКІВ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ	29
3.1. Вихідні дані.....	29
3.2 Розрахунок параметрів спін-залежного розсіювання.....	30
ВИСНОВКИ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

ВСТУП

Останніми роками спостерігається значний інтерес до матеріалів, у яких виникає ефект гігантського магнітоопору (ГМО), з точки зору їх практичного застосування. На основі цього класу матеріалів створюються велика кількість окремих груп електронних приладів та пристроїв: вимірювальні прилади (чутливі елементи ГМО-датчиків різного функціонального призначення) інформаційні системи (наприклад, високочутливі головки для зчитування інформації магнітних носіїв чи магнітні реле); активні елементи тонкоплівкової електроніки (спінові діоди і транзистори, транзистори на гарячих електронах) та ін.

Магнітні датчики запису/зчитування інформації знайшли широке застосування в комп'ютерній техніці. Використовуючи ряд переваг, таких як енергозалежність у режимах зберігання інформації, порівняно велика кількість циклів запису/зчитування інформації, радіаційна стійкість тощо, ГМО-прилади також використовуються в різних галузях електроніки – від комп'ютерної техніки та приладів автоматики до автомобільної, космічної промисловості та медицини.

Важливою складовою в розробці вище зазначених датчиків є експериментальні та теоретичні дослідження тонкоплівкових структур, в яких спостерігається явище ГМО. Основними параметрами спін-залежного розсіювання електронів (СЗРЕ) мультишарів, гранульованих сплавів, спін-вентилів тощо є параметр об'ємної асиметрії – α_m , параметр спінової асиметрії – β , питомий опір мажоритарних (ρ_m^+) та мінітарних носіїв заряду (ρ_m^-).

Метою даної роботи є ознайомлення з конструктивно-технологічними та функціональними особливостями спінових діодів та транзисторів різного функціонального призначення, різних типів пам'яті на ефекті ГМО, проведення критичного аналізу переваг та недоліків даних приладів. А також розрахунок основних параметрів спін залежного розсіювання електронів.

РОЗДІЛ 1. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ. ТЕХНОЛОГІЇ ХХ СТОЛІТТЯ

1.1 Станок Жаккара. Перфокарти

Носій інформації – це будь-який матеріальний предмет або середовище, який здатний доволі довгий час зберігати в собі закодовану в ньому інформацію. До цих об'єктів відноситься: папір, камінь, дерево, метал, кремній (також інші напівпровідники), стрічка з шаром намагніченого матеріалу (наприклад касети), пластик із специфічними властивостями (CD та DVD диски тощо), ЕМВ (електромагнітне випромінювання) тощо [1].

Жозеф Марі Жаккар – французький винахідник, іменем якого названо ткацький верстат та тканину, яка виготовляється на цьому верстаті (рис. 1.1). У цих станках для нанесення візерунків на тканину використовувались отвори у металевих пластинах, так звані перфокарти.

Цей розумний механізм є вкрай унікальним завдяки своїй різноманітності та безпомилковості дій. Для отримання шовкової тканини кожна нитка проходить через кільце, на верхню частину, якої давить шматок картону з «дірками» (перфокарта), з відповідними стержнями. Станок став яскравим

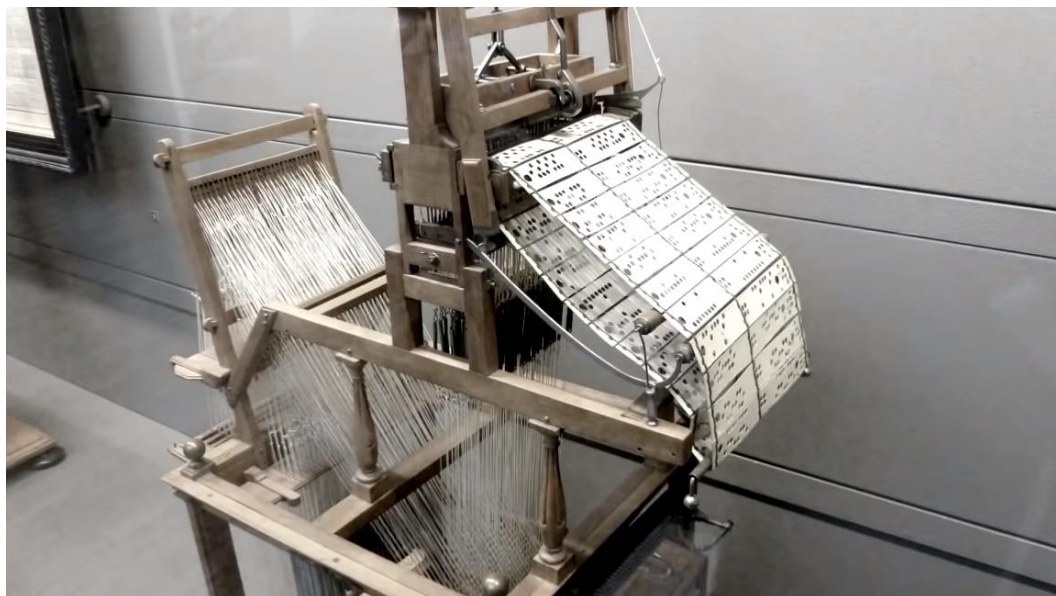


Рисунок 1.1 – Ткацький станок Жаккара. Із роботи [2]

прикладом машини з програмним керуванням. Перфокарта була набрана двійковим кодом: є отвір - не має отвору. Відповідно, якась нитка опускалась, якась ні. Одній такій картці відповідав один прокид човника.

Перфокарти почали використовувати повсюду для автоматизації виробництва ткацьких станків завдяки можливості змінювати послідовність роботи станка, завантажуючи в нього нові карти. Зараз ми називаємо це програмуванням.

У інформатиці перфокарти вперше були використані у розрахункових машинах. Так у 1891 р. з'явилася «Різницева машина Беббиджа», яка дозволяла робити обчислення різного спектру математичних задач. Наприкінці ХІХ століття, використовувались для обробки інформації перепису населення у США, в машині під назвою «Табулятор Холлерита». Починаючи з ХХ століття, з'явилися перфокарти формату «ІВМ» (рис. 1.2), які дозволяли закодувати цифри та букви у вигляді двійкової послідовності, де кожна колонка позначає 1 символ, а кожна відсутність пробивки означає пробіл . Одна така карта дозволяє записати на собі 24 машинних слова. Так у 1920 рр. з'явився перший аналоговий комп'ютер, який зробив вагомий внесок у подальший розвиток інформаційних технологій.

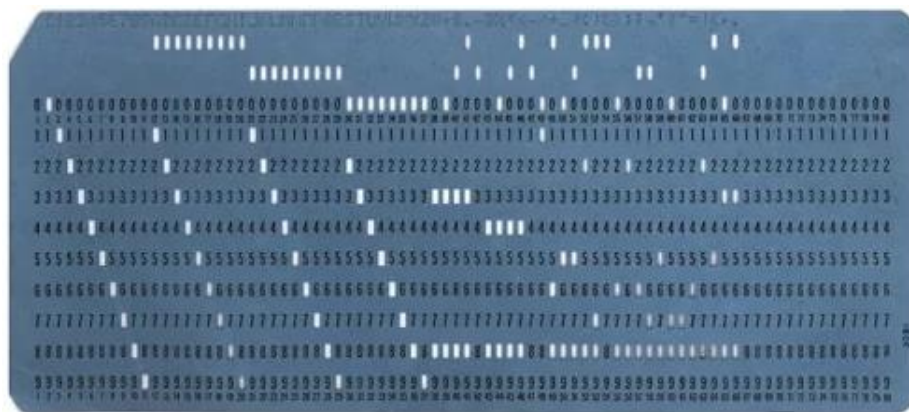


Рисунок 1.2 – Перфокарта формату «ІВМ». Із роботи [3]

Деталі перфокарти були виготовлені з тонкого картону у вигляді прямокутника розміром 187,325 на 82,55 міліметри та товщиною 0,178 мм.

Інформація зчитувалась по наявності або відсутності отворів, які розміщувались в 12 рядків по 80 колонок – це приблизно 100 байт даних. Для порівняння, щоб зберегти 1 Мб інформації необхідно було б використати більше 10 000 перфокарт, а 1 Гб інформації взагалі мав би масу 22 тони [3].

Саме на таких перфокартах починали працювати програмісти ХХ століття. Їх використовували аж до 1980 рр., поки їм на заміну не прийшли більш місткі та компактніші версії.

Об'єднавши між собою перфокарти, у формі ланцюга, вони утворили перфострічку. Перші перфострічки застосовувались для кодування повідомлень у телеграфі кодом Бодо. Цей носій представляє собою тонку стрічку з паперу намотану на бобину (котушка, на яку намотується гнучкий матеріал) (рис.1.3).



Рисунок 1.3 – Паперова перфострічка. Із роботи [3]

Інформація зчитується з п'яти- або восьми-рядних стрічок, в середині, якої знаходиться доріжка з більш меншою перфорацією, так названа «транспортна доріжка». Вона слугує для переміщення стрічки за допомогою зубчастого колеса. Завдяки своїй простоті експлуатації пристроїв вводу-виведення, перфострічка отримала широке розповсюдження у комп'ютерній техніці. У 1940 рр. – з'явився перший комп'ютер Марк I на перфострічках з розрядністю в 24 біта.

Відмінність від перфокарти полягає в тому, що відсутність пробивки це не пробіл, а пустий символ NUL. Недоліком перфострічок, у порівнянні з перфокартам, є низька механічна міцність стрічки і неможливість «ручного редагування» текстових файлів. Епоха перфострічок, як і перфокарт, завершилась у 80 рр., де їх витіснили більш сучасніші різновиди збереження інформації.

1.2 Магнітні стрічки

Магнітна стрічка являє собою будь-який гнучкий матеріал товщиною 0,1-1 мкм, на одну з сторін якого нанесений тонкий шар феромагнітного порошку. За основу стрічки беруть синтетичні матеріали, такі як: ацетилцелюлози (діацетат і триацетат), поліетилентерефталат та поліміди. Сам робочий шар може складатися з кількох шарів феромагнітного порошку різного типу (Fe_2O_3 , CrO_2 та їх суміші, також використовують порошки чистих металів, такі як Fe). Розберемо детальніше конструкцію та принцип запису інформації (рис. 1.4).

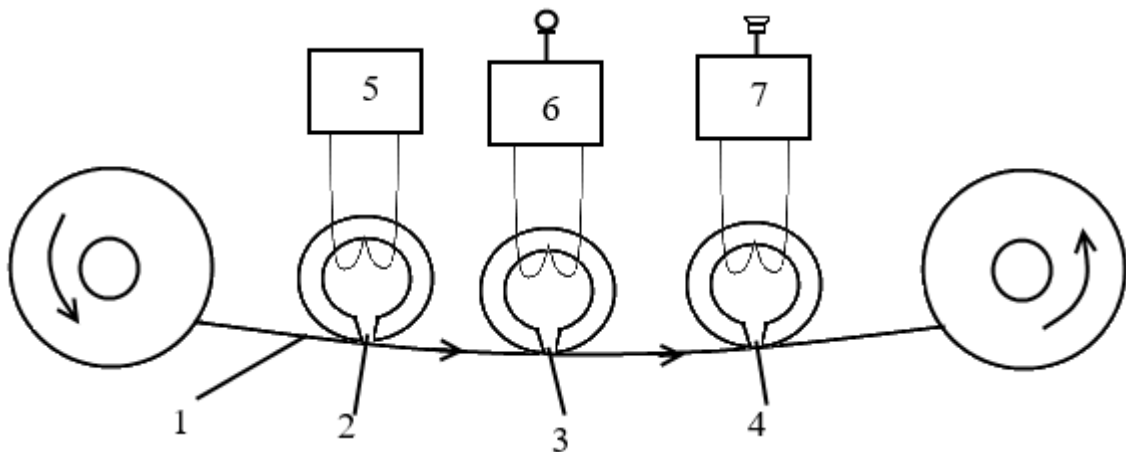


Рисунок 1.4 – Конструкція магніто-запису: 1 – магнітна стрічка; 2 – голівка для видалення; 3 – голівка для запису; 4 – відтворююча голівка; 5 – генератор видалення та підмагнічування; 6 – підсилювач запису; 7 – підсилювач відтворення сигналу Адаптовано із роботи [4]

Запис інформації здійснювався завдяки використанню залишкової намагнічуваності феромагнітних матеріалів. Сигнал подається на голівку для запису (ЗГ), через яку з постійною швидкістю рухається стрічка. Стрічка складається з ділянок однакового розміру, так звані домени. Її домени намагнічуються і при русі стрічки через відтворюючу голівку (ВГ) створюють в ній ЕРС змінного струму, після чого підсилюється. Залишкова намагніченість стрічки не є пропорційною силі магнітного поля ЗГ. Її намагніченість йде не

лінійною кривою, що імітує петлю гістерезису. Якщо ЗГ створює синусоїдальне магнітне поле, то залежність намагніченості окремих доменів, вздовж її довжини, буде не синусоїдальним. Щоб змінити передаточну характеристику на лінійну, необхідно змінити робочу точку на кривій намагніченості. Це можна зробити шляхом подачі на ЗГ струму високої частоти (10...100 кГц). Такий струм створює у ЗГ змінне магнітне поле, що поступово спадає по мірі віддалення від центру зазору і залишкова намагніченість спадає. Для того, щоб намагніченість стрічки при високочастотному підмагніченні мала, якомога більше лінійний характер і більше значення передавальної намагніченості, необхідно використовувати сильні постійні магніти. Наведемо приклад двійкового запису байту інформації 001 (рис. 1.5).

Два сусідніх домени намагнічені в різні сторони дають 1, а намагнічені в одному напрямі – 0. Розглянемо конструкцію ЗГ (рис. 1.6). За схожим принципом працюють голівки відтворення та видалення.

ЗГ перетворює електричні коливання звукової частоти у власні коливання магнітного поля. Це поле знаходиться поблизу робочого зазору, через який рухається і намагнічується стрічка.

У магнітній голівці видалення (ГВ) по обмотці проходить струм високої частоти і створює змінне магнітне поле, яке розмагнічує стрічку та видалляє записану інформацію.

Параметри голівки істотно залежать від товщини (h), довжини (l) та ширини (d) робочого зазору. Ширина зазору впливає на рівень намагнічування

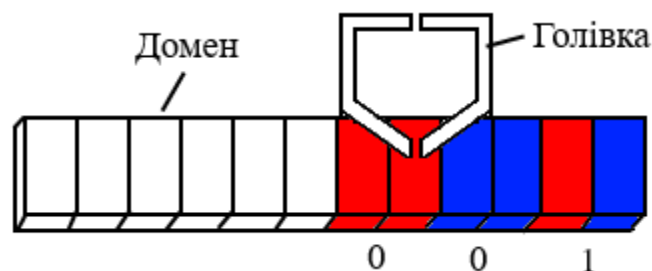


Рисунок 1.5 – Приклад запису байту інформації 001. Адаптовано із роботи [5]

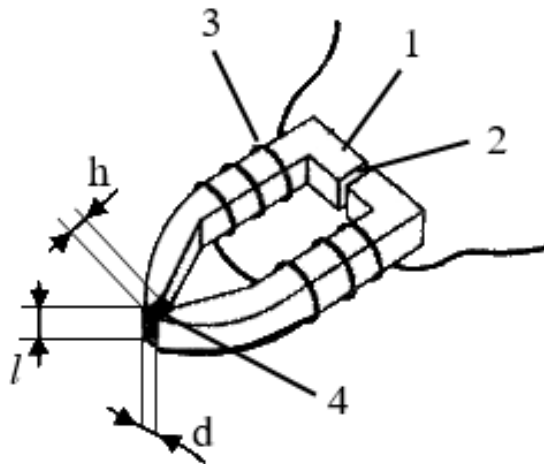


Рисунок 1.6 – Магнітна головка для запису: 1 – сердечник; 2 – додатковий зазор; 3 - обмотка; 4 – прокладка робочого зазору; h – товщина робочого зазору; l - довжина; d – ширина робочого зазору. Адаптовано із роботи [5]

запису стрічки, при малій ширині зазору, сигнал буде записаний з малою довжиною хвилі, через що магнітне поле буде не стабільним. Щоб отримати стабільність намагнічування стрічки, обирають товщину намагнічуваного шару рівну ширині робочого зазору (3-8 мкм).

Основні параметри магнітних голівок:

- 1) Струм запису (відповідає залишковій намагнічваності стрічки);
- 2) ЕРС відтворення (напруга, що досягає голівка в режимі холостого ходу);
- 3) Струм стирання (струм, що проходить через ГВ забезпечує рівень стирання);
- 4) Індуктивність.

У 1951 році магнітна стрічка була вперше задіяна у комерційному комп'ютері UNIVAC-I, стрічка була більш ємною, у порівнянні з перфокартами, її об'єм був рівним ємності десяти тисяч перфокарт, що дорівнював приблизно 1 Мб. Пізніше почали масово використовуватись у мейнфреймах та міні-комп'ютерах. Популярність магнітних стрічок продовжувався до 1980-х рр., пізніше використовувались тільки для зберігання дуже великої кількості даних завдяки своїй надійності та низькій вартості. По словам Альберта Пейса (голова обробки і збереження даних CERN) магнітна стрічка має такі переваги над жорсткими дисками (HDD – Hard Disk Drive):

- 1) Швидкість зчитування інформації (у 4 разі швидше, ніж у HDD);
- 2) Надійність (якщо вона порвалася, її можна легко склеїти, при цьому втрачаються лише кілька сотень мегабайт даних. У разі поломки HDD втрачаються всі дані);
- 3) Енергоспоживання (стрічки зберігаються у неактивному стані);
- 4) Безпека зберігання даних (складно видалити інформацію);
- 5) Ціна (у 2 рази нижче);
- 6) Довговічність (термін придатності більше 30 років, тоді як у HDD всього 5 років).

Характеристики магнітних стрічок (табл. 1) досі покращуються. Так, у 2006 році ємність картриджа збільшилась до 8 Тбайт з щільністю запису приблизно 1 Гбіт/см². На 2017 рік вдалось досягти ємності більш ніж у 30 Тбайт. Єдиний вагомий недолік стрічки є тривалий час пошуку записаної інформації, тому вона не підходить для створення активних архівів.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика перфокарт та магнітних стрічок

Характеристика	Перфокарта	Магнітна стрічка
Щільність запису	Приблизно 0,5 біт/см ²	До 1 Гбіт/см ²
Можливість перезапису	Відсутня	Присутня
Технологія виготовлення	Проста	Складна
Надійність	Погана (при пошкодженні інші перфокарти виходять з ладу)	Хороша (у разі розриву можна склеїти)
Термін придатності	Середній (залежить від способу зберігання та експлуатації)	Високий (до 30 років)

З таблиці видно, що носії інформації ХХ століття були не достатньо вміскі та зручні для використання, тому потрібно було знайти альтернативні версії, які подолали б дані недоліки. Це вдалось зробити з використанням нових технологій.

РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ І КОНСТРУКЦІЯ СУЧАСНИХ НОСІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ІНФОРМАЦІЇ

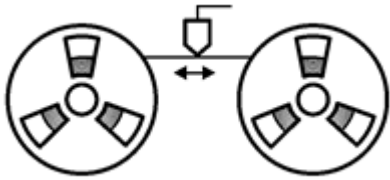
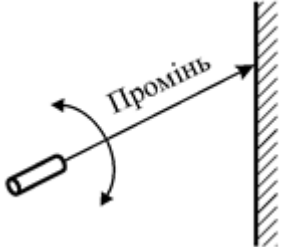
2.1. Спінова електроніка – сучасні носії інформації

Останнім часом широкого розповсюдження отримав новий напрям магнітоелектроніки, або «спінтроніка» (spintronics).

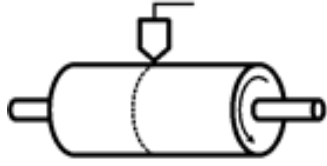

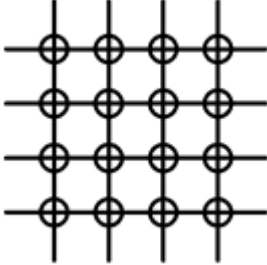

Спінтроніка – галузь електроніки, яка вивчає ефекти та явища, що використовують спіни електронів. Спінтроніка – це наука, яка досліджує магнітні й магнітооптичні явища взаємодії електронів у металевих і напівпровідникових структурах, а також квантові магнітні явища – у тонкоплівкових наноструктурах. Обчислення та оброблення інформації нині здійснюється за допомогою інтегральних мікроелектронних схем, а зберігають інформацію на магнітних дисках. Перевагами магнітних напівпровідників, які могли б сприймати та підсилювати оптичні сигнали, є можливість створення прямого перетворення інформації з оптичного виду в електронний, без процесу детектування. Також їх застосування дає змогу розміщувати процесор та пам'ять на одному чипі, позбувшись повільних каналів. Спінтроніка, як самостійний науково-технічний напрям, сформувалась наприкінці ХХ століття, після накопичення фундаментальних знань і виготовлення електронних приладів із спін-залежним перенесенням носіїв заряду методами мікроелектронної технології та нанотехнології. Надмірна увага до спінтронних електронних приладів обумовлена великими надіями щодо їх характеристик, що будуть характеризуватися кращими фізичними властивостями порівняно з їх звичайними напівпровідниковими приладами-аналогами. Вони також дадуть поштовх для реалізації квантових обчислень та квантових комп'ютерів, які ґрунтуються на вище описаних явищах. Спінові ефекти проявляються в тонкоплівкових структурах під впливом магнітного поля, в першу чергу, через особливості перенесення заряду електронами у наноструктурах структурах. Основною

характеристикою є магнітоопір, який визначається як зміна електричного опору матеріалу або структури, яка зумовлена зовнішнім магнітним полем [6]. Додатний магнітоопір відповідає підвищенню опору в разі прикладення магнітного поля, а від'ємний – зниженню. Магнітоопір характеризує спінові ефекти при умові дифузійного й балістичного перенесення носіїв заряду, а також явища тунелювання спін-поляризованих електронів. Таким чином можна зробити висновок, що спінтроніка – це напрям наноелектроніки, де поряд із зарядом для оброблення інформації використовують також поняття спіну електрона. Зараз уже створені пристрої на спінових явищах з використання ефекту гігантського магнітоопору, наприклад, головки, які зчитують/записують інформацію на магнітні диски (випускає фірма IBM), новий тип магнітної флеш-пам'яті MRAM (magnetic random access memory), чи магнітна пам'ять із довільним доступом [7].

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика різних типів ЗП

Тип ЗП	Характеристика	Спосіб звернення
Стрічкові	Інформація записується на стрічковий носій, в обидва боки перекочуючись із котушки на котушку. Під час перемотування стрічки до нерухомого пристрою записування подається необхідна комірка ЗП	
Променеві	Вибір запам'ятовувальних елементів здійснюється за допомогою електронного або світлового променя	

Продовж. табл. 2.1

Тип ЗП	Характеристика	Спосіб звернення
Обертіві	До нерухомого пристрою записування-зчитування забезпечується циклічна подача комірок носія	
	інформації, що має форму барабана або диска	
Матричні	Запам'ятовувальні елементи розміщуються у вузлах матриці й потрібні клітинки обираються збудженням відповідних пересічних горизонтальних і вертикальних шин матриці	
Динамічні з акустичними або електромагнітними лініями затримки	Інформація у вигляді послідовності електричних імпульсів безперервно циркулює по замкненому електричному колу, і запам'ятовувальні комірочки періодично проходять повз нерухомий пристрій записування-зчитування	

Усі запам'ятовувальні пристрої, що використовуються на даний час (ЗП) залежно від використання в їх конструкції конкретної групи запам'ятовувальних елементів, що утворюють елементарну комірочку пам'яті для запису одного числа, можна розділити на кілька груп (табл. 2.1).

2.2. Пам'ять на магнітоопорі та спін-вентильний транзистор

При зміні напрямку магнітного моменту, елемент зберігає деяку намагніченість до наступного перемикання, ця властивість дозволяє використовувати його як елемент пам'яті, зокрема у MRAM, де значну ефективність забезпечує спін-залежне тунелювання. Запам'ятовуючий пристрій складається з двох ортогональних у площині феромагнітних доріжок розміщених паралельно, між якими знаходиться тонкий ізоляційний шар.

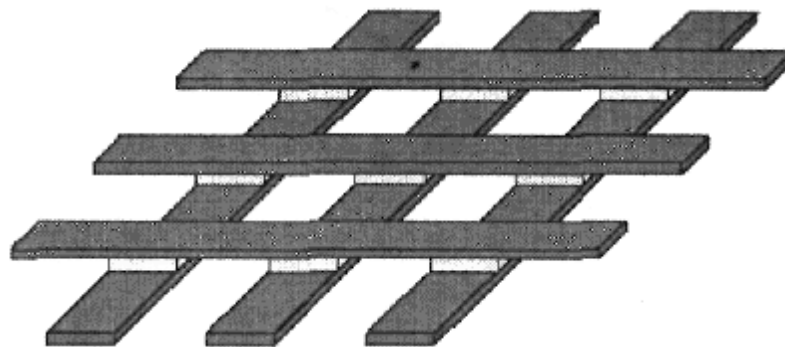


Рисунок 2.1 – Фрагмент запам'ятовувального пристрою з довільним порядком вибірки, побудований з елементів на тунельному магнітоопорі. Із роботи [8]

Коли напрямки намагніченості двох протилежних феромагнітних ділянок вирівнюються зовнішнім магнітним полем, значення тунельного опору зменшується, ніж коли вони протилежно напрямлені. На практиці цей опір необхідно змінювати принаймні на 30%.

Розглянемо спіновий транзистор, у якому вузький канал розміщено між витком і стоком, а над каналом знаходиться третій електрод – заслін. Виток та стік намагнічені в одному напрямі та є феромагнетиками, а канал – напівпровідником.

Електричний струм, що входить у канал із витoku – спін-поляризований. Щоб регулювання орієнтації спінів, необхідно змінювати напругу на заслоні. На рис. 2.2 зображений фрагмент запам'ятовувального пристрою з довільним порядком вибірки, що побудований з елементів на тунельному МО електронів

під час проходження каналу. Коли в кінці каналу спіни електронів мають орієнтацію зображену на рисунку 2.2а, вони починають відбиватися від краю стоку, а сам транзистор має високий опір. Це означає, що його опір можна регулювати електричним полем заслони. На рисунку 2.2б, між двома областями n-типу, які діють як емітер та колектор, в області бази знаходиться металевий, багатошаровий спіновий вентиль. Щоб потрапити з емітера в колектор гарячий електрон проходить через спін-вентильну базу, в якій розміщуються два феромагнітні матеріали NiFe і Co, які мають різні коерцитивні сили й розділені прошарком з матеріалу (Au).

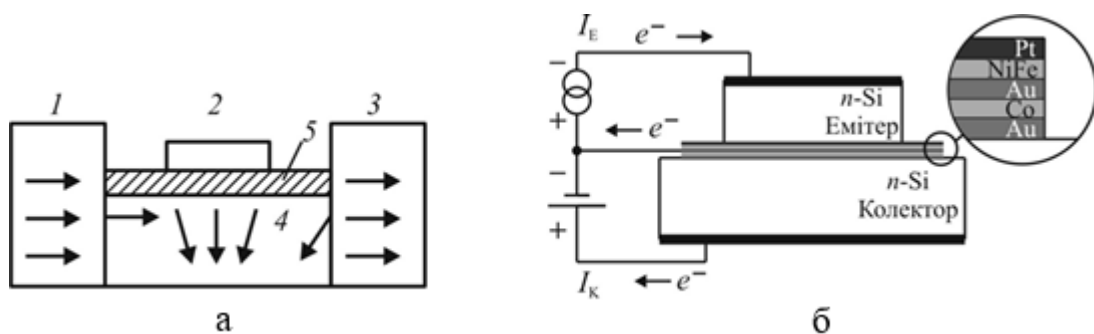


Рисунок 2.2 – Спінові транзистори: а – схематичне зображення спінового польового транзистора; б – одна з можливих реалізацій спін-вентильного транзистора з Si–Pt-емітером, Si–Au-колектором і NiFe–Au–Co-спін-вентильною базою: 1 – витік; 2 – заслін; 3 – стік; 4 – канал; 5 – підзаслонний діелектрик. Адаптовано із роботи [8]

Шари NiFe і Co через різницю коерцитивних сил спричиняють утворення чітко вираженої паралельної та антипаралельної орієнтації намагніченості в широкому інтервалі температур. Ці стани можна індивідуально перемикаєти відповідним зовнішнім магнітним полем. На межі поділу між металевою базою елементарної комірки і напівпровідниками формуються бар'єри Шотткі.

Для створення високоякісного бар'єру з випрямним ефектом, біля емітера й колектора розміщують дуже тонкий шар Pt і Au, які запобігають контакту магнітних шарів з кремнієм. Через те, що контакт Si–Pt утворює високий бар'єр Шотткі і його застосовують як емітер. Колекторний діод Шотткі має меншу висоту бар'єру на відміну від емітерного діоду. Виготовлення спін-

вентильного транзистора передбачає за собою осадження металу на дві кремнієві пластини та сполучення їх в умовах ультрависокого вакууму. Робота транзистора полягає в наступному: між емітером та базою подається струм, при якому електрони інжектуються в базу перпендикулярно до шарів спін-заслону. Інжектвані електрони повинні пройти через Si–Pt-бар'єр Шотткі [10], тому вони потрапляють у базу як нерівноважні гарячі електрони, енергія яких визначається висотою емітерного бар'єра Шотткі (складає приблизно 0,5...1 еВ та залежить від комбінації метал– напівпровідник). Як тільки гарячі електрони пройдуть через базу, вони піддаються впливу пружного та непружного розсіювання, які змінюють їх енергію та розподіл моментів. Електрони, які набули достатньої кількості енергії, здатну подолати енергетичний бар'єр колектора, можуть увійти у колектор. Висота колекторного бар'єру дещо менше ніж емітерного.

Необхідно, щоб момент появи гарячого електрона був узгоджений з доступними станами в колекторі. Кількість електронів у колекторі та струм колектора істотно залежать від спін-залежного розсіювання в базі, що регулюють перемиканням бази з узгодженого за намагніченістю низькоомного стану в антиузгоджений високоомний стан. З допомогою зовнішнього магнітного поля, яке діє на вирівнювання 2-х феромагнітних шарів тонкоплівкового спін-вентиля відбувається повне розсіювання. Такий тонкоплівковий спін-вентильний транзистор може бути використаний у пристроях магнітної пам'яті й датчиків магнітного поля [10].

2.3. Зчитувальна головка на гігантському магнітоопорі

Першим спіновим датчиком стала зчитувальна головка на магнітоопорі, яку почали виробляти ІВМ з 1997 року. Головки зчитують магнітні біти, що записані на поверхні магнітних дисків або стрічок у вигляді розорієнтованих магнітних ділянок (доменів). Розміри голівки завдяки ефекту гігантського магнітоопору становить 10-100 нм.

Розберемо, як зчитується інформація з магнітного диска з використанням

ГМО-ефекту (рис. 2.3). Цифрова інформація у вигляді бітів записується і зберігається на магнітних дисках та стрічках у вигляді орієнтованих доменів. Лінії вектора індукції магнітного поля \vec{B} поводять себе так, як показано на рис. 2.3а. Там, де стикаються головні частини двох протилежно намагнічених доменів ($\leftarrow \rightarrow$), некомпенсовані додатні полюси генерують магнітне поле (рис. 2.3б). Це поле напрямлене за межі носія інформації перпендикулярно до поверхні домену. У тому місці, де стикаються «хвостові» частини двох доменів, стінки містять некомпенсовані, від'ємні полюси, які утворюють стік для магнітних силових ліній потоку, який повертається в носій інформації, яким є від'ємна стінка домену. Протилежний випадок ($\rightarrow \leftarrow$) показано на рис. 2.3в.

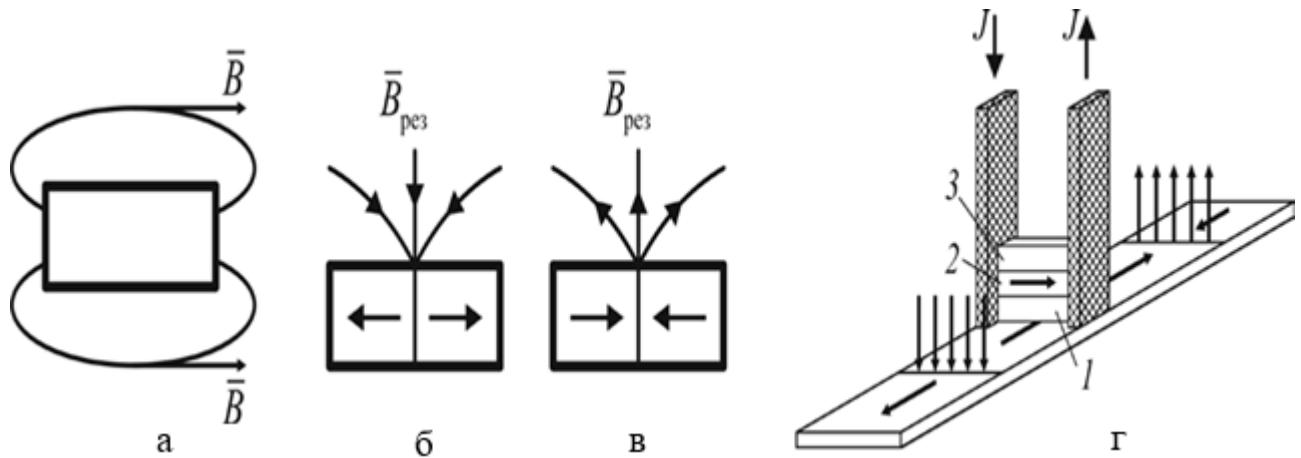


Рисунок 2.3 – Принцип зчитування: а – напрямок ліній вектора магнітної індукції одного домену; б, в – індукція на межі двох доменів; г – схематичне зображення головки, що зчитує інформацію з магнітного носія. 1 – шар NiFe, 2 – прошарок Cu (2 нм) і 3 – шар Co (2,5 нм). Із роботи [8]

Напрямок магнітного поля на стінках домену можна порівняти з логічним нулем та одиницею. Коли на стінках домену змінюється напрям магнітного поля, то головка, що запам'ятовує записану магнітну інформацію відчуває ці зміни. Ділянка міждоменної стінки для різних матеріалів складає 10-100 нм. Намагніченість шару Co, що є магнітотвердим матеріалом напрямлена стабільно перпендикулярно до площини стрічки – вгору або вниз. Намагніченість магнітом'якого шару NiFe набуває напрямку індукції

магнітного поля на кожному стику $\uparrow\uparrow$ або $\downarrow\downarrow$ відносно шару S_0 . Відповідно до цього струм у магнітній головці I зростає або зменшується. Чутливим елементом може бути також типовий тонкоплівковий спін-вентиль, що складається з двох шарів – шару з легко змінюваною намагніченістю (яка обертається – магнітом'який шар) та шару з фіксованою намагніченістю (магнітотвердий шар). Магнітний момент у магнітом'якому шарі паралельний площині носіїв інформації, що несе магнітні домени. Магнітний момент у магнітотвердому шарі перпендикулярний до площини носія інформації. В момент проходження голівки над додатною стінкою домену її намагніченість підвищується магнітним полем, якщо голівка пройде над від'ємною стінкою, то магнітний момент зменшиться. Коли напрямок намагніченості в «м'якому» шарі реагує на поля доменів, зміна електричного опору зчитується струмом, що проходить через спін-вентильну наноструктуру. Головки даного типу дозволяють отримати щільність запису до 100 Гбіт/дюйм². Раніше для намагнічення ділянок та наступного визначення напрямку намагніченості використовувались індукційні котушки, вони мали в двічі меншу ємність магнітних дисків та низьку швидкодію. З відкриттям ефекту гігантського магнітоопору індукційні котушки відійшли на другий план.

Робоча поверхня жорстких дисків рухається відносно голівки, як і у магнітофонів. При записуванні на котушку подається змінний електричний струм, який спричиняє появу змінного магнітного поля, яке із зазору голівки впливає на феромагнетик поверхні диска й змінює напрямок вектора намагніченості доменів залежно від рівня сигналу. При зчитуванні, у момент переміщення доменів, поблизу зазору голівки відбувається зміна магнітного потоку, який спричиняє ефект електромагнітної індукції зумовлений виникненням змінного електричного сигналу в котушці.

2.4. Система магнітного теплового зберігання даних

HAMR (Heat Assisted Magnetic Recoding) або термоасистована система запису – технологія характерна попереднім нагріванням ділянки (1 пс), на яку

проводиться запис, до температури 380-400 К за допомогою лазера. При проходженні головки лазера (рис. 2.4) над робочим шаром, променем здійснюється нагрівання, внаслідок чого зменшується магнітна сприйнятливість робочого шару феромагнетика. Це призводить до зменшення площі петлі гістерезису, що дає можливість переводити магнітний стан індукції із стану «0» в стан «1» і навпаки при менших значеннях індукції зовнішнього магнітного поля. Коли головка пройшла над нагрітою ділянкою її температура повертається до норми і петля гістерезису набуває свого початкового стану.

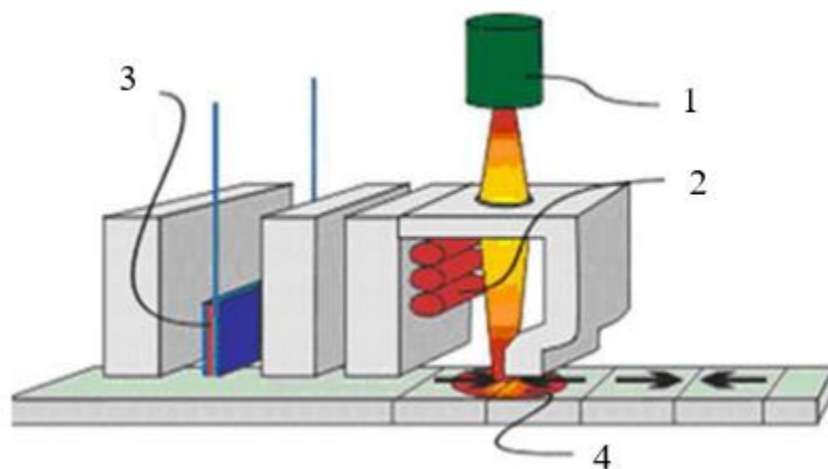


Рисунок 2.4 – Головка HAMR (лазер для підігріву носія інтегрований в головку запису): 1 – лазер; 2 – котушки запису; 3 – головка читання GMR; 4 – теплова пляма [11]

Такий спосіб збереження інформації дозволяє досягнути її щільності до 20 Тбіт/дюйм². Така щільність дозволить зберігати від 37 до 50 Тбайт даних на 3,5 дюймових жорстких дисках і до 12 Тбайт на 2,5 дюймових. Недоліком HAMR є необхідність використання матеріалів з високою анізотропією в якості магнітного робочого шару ($\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$, CoPt і Co_5Sm). На 2020 рік компанія Siagate випускає жорсткі диски з об'ємом більше 20 ТБ, а в 2026 році планує випустити свій перший диск на 50 Тб. Перевагами цих дисків є: збільшена ємність (до 2 Тбайт/дюйм²); надійність (передача даних більше ніж 2 Пбайт може здійснюватись однією головкою); енергоспоживання (менше 200 мВт).

2.5. Сучасні типи флеш-пам'яті

З настанням 2020 року майже у кожного з нас в комп'ютері використовується накопичувачі на основі мікросхем тонкоплівкової флеш-пам'яті, що отримали назву Solid State Drive (SSD), які витіснили звичайні жорсткі диски. Перевагами SSD-накопичувачів по відношенню до вінчестерів HDD, в першу чергу, є швидкість зчитування інформації, що в 2-2,5 рази більша і досягає 250-300 Мб/с; порівняно менший середній час доступу (0,1-0,18 мс проти 14-15 мс у HDD), низьке значення енергоспоживання, безшумність роботи, висока надійність і стійкість до різних механічних впливів.

Наприклад, технологія SONOS (Silicon-Oxide-Nitride-Oxide-Silicon) (рис. 2.5) має плаваючий затвор виконаний не з полікристалічного кремнію, як у класичної флеш-пам'яті, а з нітриду кремнію (Si_3N_4), що має більш однорідну молекулярну структуру, яка краще утримує заряд. При цьому шар діелектрику може бути тоншим, а напруга запису – в декілька разів менша (5-8 В).

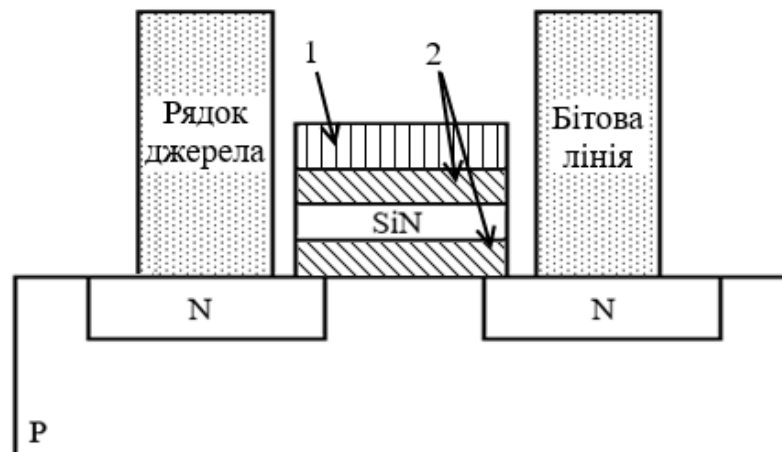


Рисунок 2.5 – Технологія SONOS: 1 – рядок символу; 2 – оксид.
Адаптовано із роботи [12]

Також однією з незвичайних технологій стала PRAM (Phase Change Random Access Memory) [13] (рис. 2.6), тобто пам'ять з довільним доступом на основі фазового переходу. Носієм інформації є особливий матеріал, який під впливом температури здатний змінювати свій стан на аморфний або кристалічний. Такий

же принцип використовується у перезаписувальних оптичних дисках CD-RW, DVD-RW та DVD+RW. Відмінність від дисків полягає в тому, що велику роль відіграє електричний опір, який в кристалічному стані низький (логічна одиниця), а у аморфному – високий (логічний нуль). Запис інформації здійснюється шляхом нагрівання осередків, а зчитування – вимірюванням їх опору.

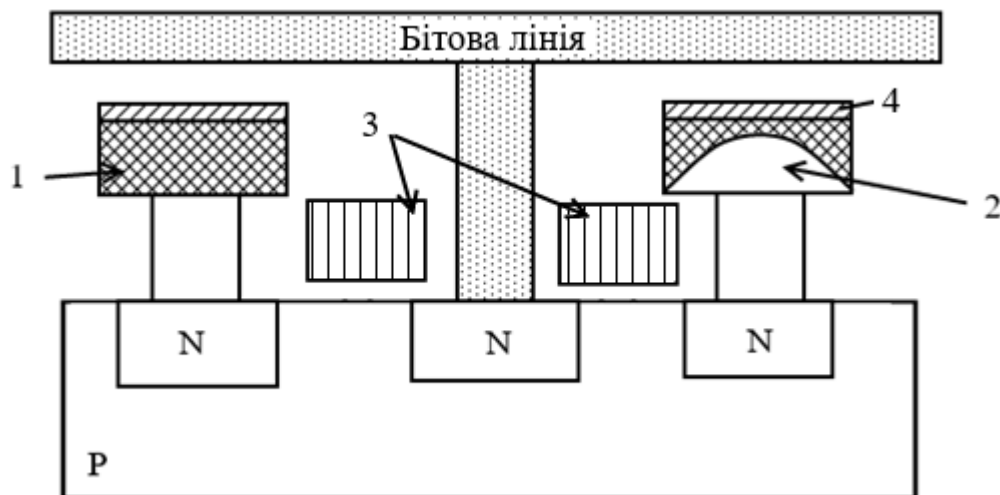


Рисунок 2.6 – Технологія PRAM: 1 – полікристалічні халькогеніди; 2 – аморфні халькогеніди; 3 – рядок символу; 4 – заземлення. Адаптовано із роботи [14]

Наступна технологія, яку на даний час використовують у запам'ятовуючих пристроях, має назву MRAM (Magnetoresistive random-access memory) [15, 16] (рис. 2.7), тобто магніторезистивна пам'ять з довільним допуском. Осередком пам'яті виступає магнітний тунельний перехід, що складається з тонкого діелектрику оточеного з обох боків двома магнітними шарами. Один з шарів має фіксований вектор магнітного поля, а у іншого змінюється, залежно від впливу зовнішнього магнітного поля. Якщо вектори направлені у протилежні боки, то електричний опір високий (логічний нуль), якщо в одному напрямі, то опір малий (логічна одиниця).

Пам'ять FeRAM (Ferroelectric Random Access Memory) [17, 18] – феромагнітна пам'ять з довільним доступом (рис. 2.8). Характерною властивістю цієї технології є можливість змінювати розподіл (поляризацію)

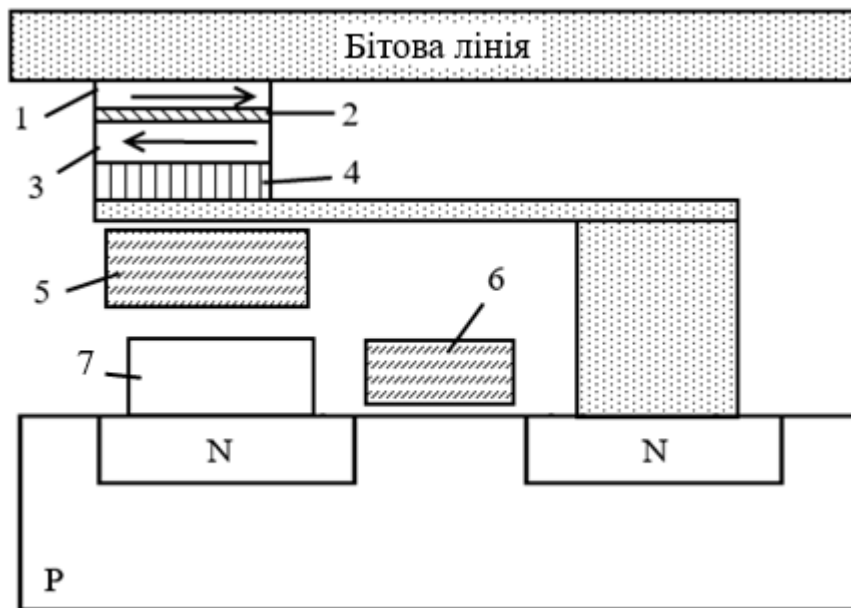


Рисунок 2.7 – Технологія MRAM: 1 – вільний магнітний шар; 2 – тунельний бар'єр; 3 – магнітний шар; 4 – антиферомагнетик; 5 – записування; 6 – зчитування; 7 – напруга, яка подається на транзистор. Адаптовано із роботи [14]

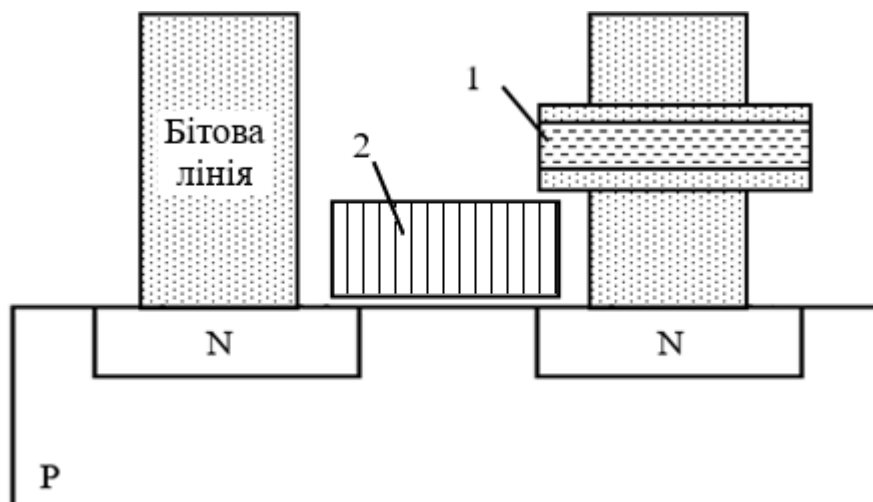


Рисунок 2.8 – Технологія FeRAM: 1 – шар феромагнетику; 2 – рядок символу. Адаптовано із роботи [14]

атомів у ферроелектричних матеріалах за рахунок зовнішнього магнітного поля. При подачі на ферроелектрик напруги, атоми, що знаходяться в цьому матеріалі будуть зміщуватись вгору або вниз, також зміниться електрична провідність. Зчитування даних відбувається за рахунок керуючого транзистора, який подає напругу переводячи клітинку в вимірювальний стан «0».

Якщо в осередку вже є логічний «0», то сигнал не змінюється, якщо в комірниці «1», то при зміні поляризації на виході виникне короткий імпульс, який означатиме «1».

Порівняльна характеристика нових технологій, у порівнянні зі звичайною флеш-пам'яттю наведена в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика

Характеристика	SONOS	PRAM	MRAM	FeRAM
Цикли перезапису	10^4	10^{10}	10^{16}	$> 10^{16}$
Швидкість запису	до 6 Мбайт/с	10 Мбайт/с	10^2 Мбайт/с	10^4 Мбайт/с
Щільність запису	Середня	Висока	Висока	Низька
Енергоспоживання	Низьке	Високе	Середнє	Низьке
Термін працездатності	5-7 років	> 10 років	10 років	> 10 років

Сучасні типи пам'яті, які представлені в табл. 3.1 та активно розробляються відомими світовими фірмами, такими, як “IBM”, “Samsung” та “Intel” в найближчий час мають замінити вже стандартні типи комп'ютерної пам'яті (HDD та SSD).

Окремої уваги заслуговує пам'ять століття нанотехнологій від компанії Nantero – NRAM (Nano-RAM) (рис. 2.9). Технологія ґрунтується на ефекті вуглецевих нанотрубок (ВНТ), який за рахунок притягування Ван-дер-Ваальса, під час переорієнтації ВНТ на плоскій поверхні, вони торкаються один одного

або відокремлюватись в вертикальному напрямі по відношенню до підкладки. Тут кожна «клітка» NRAM складається з кількох ВНТ, нанесені на ізольовані ділянки на металевих електродах. Решта нанотрубок знаходяться над електродом на висоті 13 нм, розтягуючись між двома ділянками. Коли ВНТ не контактують з опором стану тканини є високим – стан «0», якщо ВНТ вступають в контакт, стан опору тканини є низьким – стан «1». Завдяки тому, що ці 2 стани дуже стабільні NRAM діє як пам'ять. Стан також можна змінити шляхом зміни полярності заряду, що прикладається до двох електродів. У вимкненому стані механічна деформація трубок низька, це дозволяє їм зберігати цю позицію природним чином, тим самим запам'ятовуючи «0». Коли трубки притягнуті до контакту при потраплянні до верхнього електрода нового заряду, в гру вступають крихітні сили Ван-дер-Ваальса, які створюють механічну деформацію в трубці. Приймавши цю позицію, трубки продовжать зберігати її, тим самим запам'ятовуючи «1». Ці позиції досить стійкі до зовнішнього впливу.

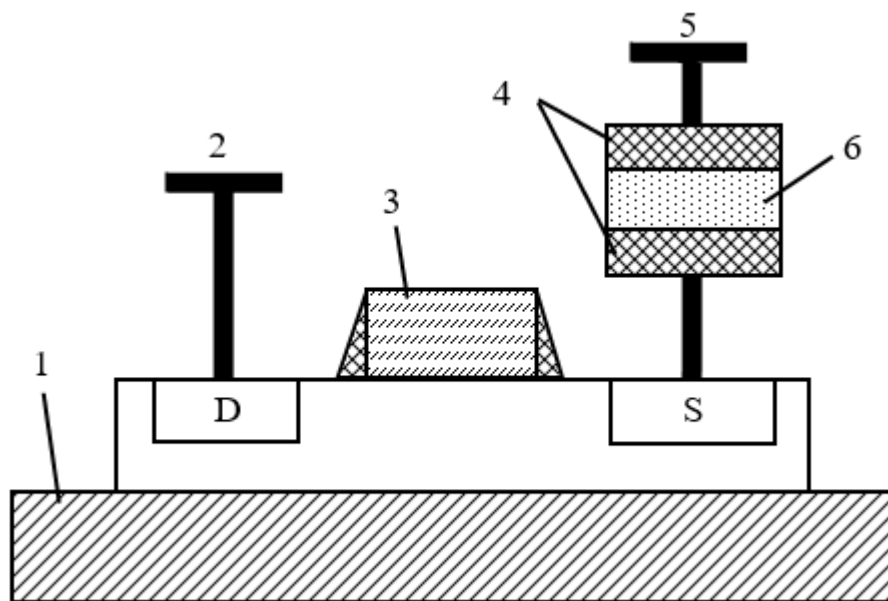


Рисунок 2.9 – Технологія NRAM: 1 – клітка NRAM; 2 – розрядна лінія; 3 – рядок символу; 4 – перетин нанотрубок; 5 – вибіркова лінія; 6 – резистивний стан тканини (CNT). Адаптовано із роботи [19]

Наступна технологія отримала назву Millipede (багатоніжка) (рис. 2.10). Дана технологія об'єднала в собі старі методи мікроелектромеханічних систем. Як і у жорстких дисках millipede одночасно зберігає дані у носії та отримує доступ до даних, переміщуючи носій під головою. Однак на відміну від жорстких дисків, у millipede використовується безліч наноскопічних головок, які можуть читати і записувати паралельно, тим самим збільшуючи кількість даних, прочитаних у певний час. Механічно millipede використовує численні зонди атомної сили, кожен з яких відповідає за зчитування і запис великої кількості бітів, пов'язаних з ним. Ці шматочки зберігаються як яма, або відсутність одного, у поверхні термоактивного полімеру, який осаджується у вигляді тонкої плівки на носії, відомому як санки. Будь-який зонд може прочитати або записати лише невелику доступну для нього сани, відому як поле для зберігання.

Що стосується створення відступів, не зшиті полімери зберігають низьку температуру близько 120°C , і якщо наконечник зонда нагрівається до даної температури, він залишає невеликий відступ. Відступи проводяться при бічній роздільній здатності 3 нм. Нагріваючи зонд безпосередньо поруч з відступом, полімер повторно плавиться і заповнює відступ, стираючи його. Після написання наконечник зонда можна використовувати для читання відступів. Якщо кожен відступ трактується як один біт, то теоретично може бути досягнута щільність зберігання $0,9 \text{ Тб/дюйм}^2$ [20].

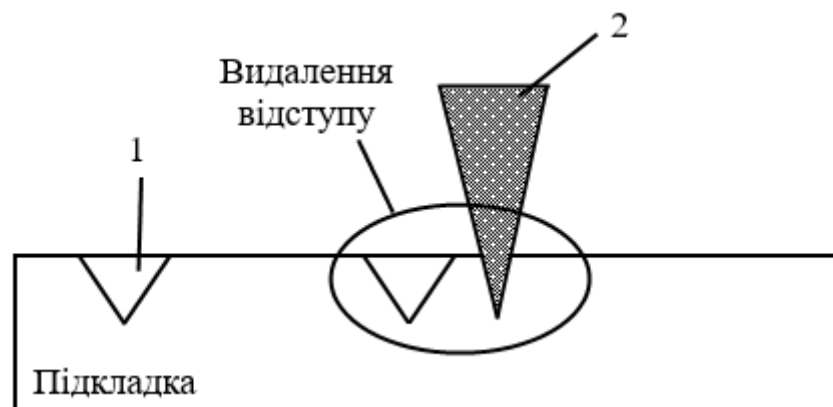


Рисунок 2.10 – Технологія Millipede: 1 – відступ (ямка); 2 – нагрітий наконечник зонда. Адаптовано із роботи [20]

Racetrack memory або Domain-wall memory, яку продемонструвала IBM у 2008 році [21] (рис. 2.11). Пам'ять Racetrack використовує спіново-когерентний електричний струм для переміщення магнітних доменів уздовж наноскопічного пермалоевого дроту приблизно 200 нм поперек і 100 нм завтовшки. Коли струм проходить через дріт, домени проходять через магнітні головки зчитування/запису, розміщеними біля дроту, які змінюють домени для запису шаблонів бітів. Пам'ять Racetrack [22] використовує електричні струми для "проштовхування" послідовності магнітних доменів через підкладку та пройдені елементи для читання/запису. Вдосконалення в способах магнітного виявлення, засновані на розробці магніторезистивних датчиків спінтрону, дозволяють використовувати набагато менші магнітні домени, щоб забезпечити набагато більшу щільність бітів.

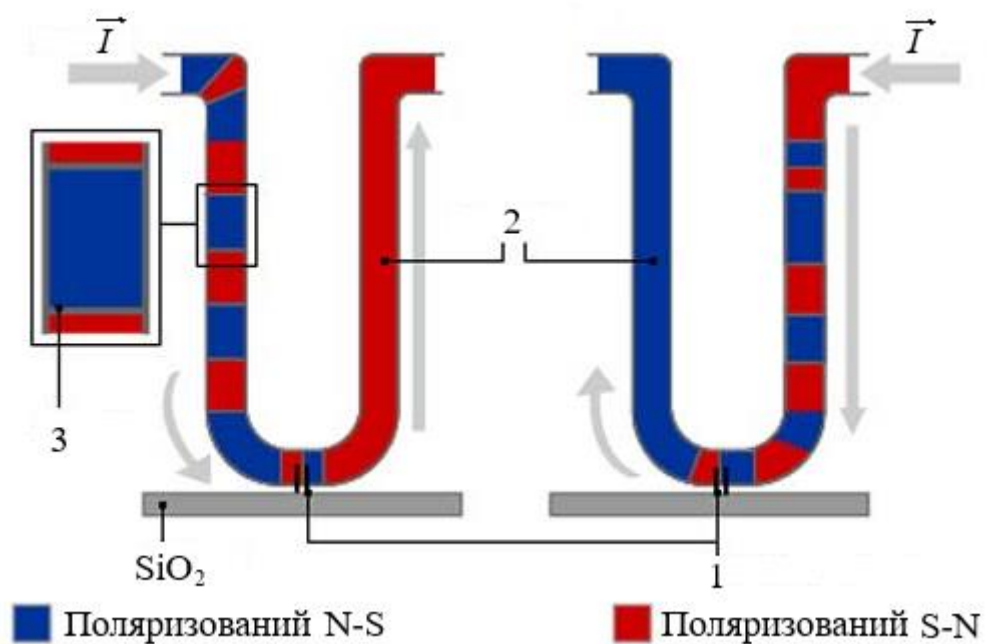


Рисунок 2.11 – Технологія Racetrack: 1 – записуюча/зчитуюча голівка; 2 – нанодріт; 3 – доменні стінки. Адаптовано із роботи [21]

Перелічені нанотехнології тільки починають розвиватися, їм необхідний час, щоб подолати свої конструкційні та фізичні недоліки пов'язані з малою щільністю, швидкістю зчитування/запису інформації, зносостійкістю тощо.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТРИШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ ЗРАЗКІВ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ

3.1. Вихідні дані

Вихідною плівковою системою для визначення параметрів спін-залежного розсіювання електронів (СЗРЕ) у тришарових структурах була обрана система Fe/Au/Fe/П, де Fe – феромагнітний шар, Au – немагнітний шар. Для розрахунку були використані літературні дані дослідження магніторезистивних властивостей (а саме – магнітоопору) для зразків двох типів: I – структури Fe(5)/Au(d_{Au})/Fe(5)/П (де П – ситалова підкладка, $d_{Au} = 3-10$ нм – товщина немагнітного шару); II – плівкова структура Fe(15)/Au(d_{Au})/Fe(15)/П ($d_{Au} = 3-10$ нм). Схематично структура досліджуваних зразків зображена на рисунку 3.1.

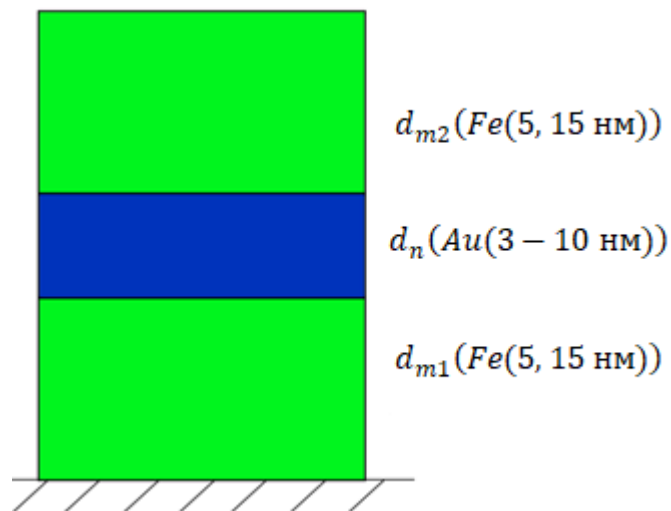


Рисунок 3.1 – Схематична структура зразка

Результати вимірювання магнітоопору для досліджуваних плівкових зразків (літературні дані) для трьох орієнтацій магнітного поля та температур, представлені в таблиці 3.1.

Величина МО розраховувалася за співвідношенням:

$$MO = [R(B) - R(B_s)/R(B_s)] * 100\%_2 \quad (3.1)$$

де $R(B_s)$ – електричний опір у магнітному полі насичення або у максимально можливому магнітному полі; $R(B)$ – поточне значення опору плівки в магнітному полі.

Таблиця 3.1 – Величина магнітоопору у трьох геометріях вимірювання гранульованих сплавів, сформованих після термовідпалювання тришарових систем Fe/Au/Fe до $T_s = 300, 700$ і 900 К

Зразок	МО, %								
	поздовжн. геом.			попереч. геом.			перпенд. геом.		
	300 К	700 К	900 К	300 К	700 К	900 К	300 К	700 К	900 К
Fe(5)/Au(5)/Fe(5)/П	0,11	0,08	0,02	0,1	0,04	0,05	0,12	0,02	0,03
Fe(5)/Au(15)/Fe(5)/П	0,15	0,15	0,06	0,12	0,05	0,07	0,11	0,08	0,1
Fe(5)/Au(25)/Fe(5)/П	0,25	0,22	0,12	0,11	0,06	0,1	0,13	0,16	0,4
Fe(25)/Au(5)/Fe(25)/П	0,21	0,07	0,05	0,12	0,03	0,06	0,1	0,02	0,04
Fe(25)/Au(15)/Fe(25)/П	0,22	0,1	0,06	0,15	0,04	0,05	0,16	0,02	0,02
Fe(25)/Au(25)/Fe(25)/П	0,27	0,12	0,1	0,2	0,04	0,04	0,15	0,16	0,02

3.2 Розрахунок параметрів спін-залежного розсіювання

Розрахунок потрібно розпочати із побудови залежності магнітоопору (δ) від відношення товщини немагнітного та магнітного шарів. Експериментальні результати для вище зазначених зразків були представлені на рис. 3.2 у вигляді залежності δ від товщини немагнітного прошарку d_n нормованого на товщину d_m базового магнітного шару для двох типів зразків.

Аналізуючи залежність, представлену на рисунку 3.2, слід зазначити, що при зростанні товщини немагнітного шару d_n від 3 до 10 нм відбувається майже лінійне зростання амплітуди магніторезистивного відношення для обох типів зразків. Ці дані й були використані при розрахунках параметрів спін-залежного розсіювання: параметра об'ємної асиметрії – α_m , питомого опору мажоритарних та мінитарних носіїв заряду, параметра спінової асиметрії – β [23].

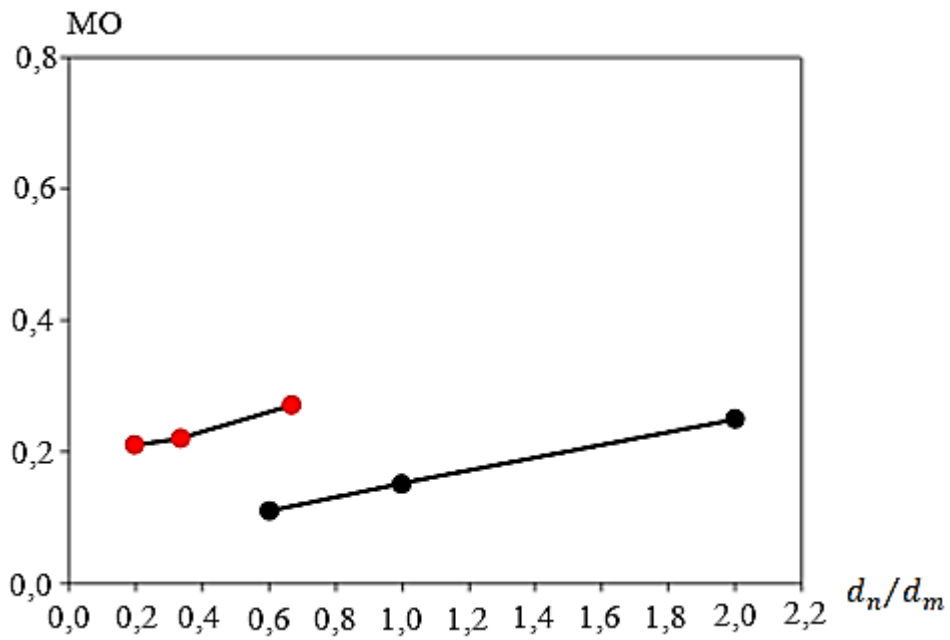


Рисунок 3.2 – Експериментальна залежність δ від товщини немагнітного прошарку d_n нормованого на товщину d_m базового магнітного шару для двох типів зразків: I – $d_m = 15$ нм, $d_n = (3-10)$ нм) (•), II – $d_m = 5$ нм, $d_n = (3-10)$ нм) (•)

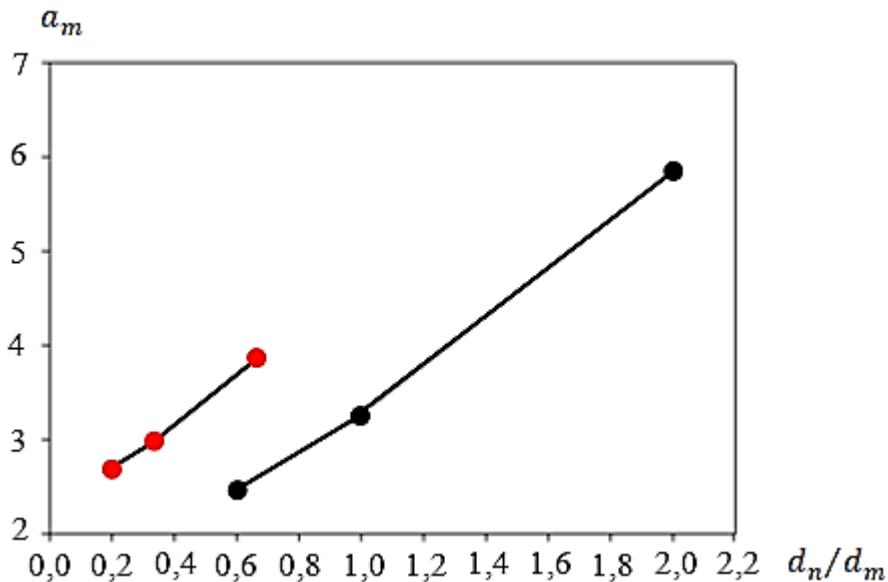


Рисунок 3.3 – Розрахункова залежність параметра об'ємної асиметрії a_m від товщини не магнітного шару d_n нормованого на товщину d_m базового магнітного шару для двох типів зразків: I – $d_m = 15$ нм, $d_n = (3-10)$ нм) (•), II – $d_m = 5$ нм, $d_n = (3-10)$ нм) (•)

Розрахунок параметра об'ємної асиметрії α_m проводився за наступним співвідношенням:

$$\alpha_m = 1 + 2(1 + d_{n,m}) \left(\delta(d_{n,m}) + \sqrt{\delta(d_{n,m}) (1 + \delta(d_{n,m}))} \right), \quad (3.2)$$

де величина магніторезистивного ефекту δ та величина $d_{n,m}$ – експериментальні дані з рисунка 3.2. Результати розрахунків зведені у таблиці 3.2.

Аналізуючи дані для параметра об'ємної асиметрії α_m слід зазначити, що його величина змінюється у межах від 2,47 до 5,85 для систем Fe(5)/Au(d_{Au})/Fe(5)/П та від 2,71 до 3,85 для систем Fe(15)/Au(d_{Au})/Fe(15)/П.

Знаючи величину параметра об'ємної асиметрії ρ_m та враховуючи той факт, що згідно припущення даної теоретичної моделі питомий опір проміжного немагнітного шару ρ_n дорівнює питомого опору мажоритарних носіїв заряду ρ_m^+ (експериментальні дані розмірної залежності питомого опору проміжного шару золота наведені на рисунку 3.3), можна розрахувати величину питомого опору міноритарних носіїв заряду ρ_m^- , а також параметр спінової асиметрії β за формулами:

$$\rho_m^- = \alpha_m \rho_m^+ \quad (3.3)$$

$$\beta = \frac{(1+d_{n,m}) \left(\delta(d_{n,m}) + \sqrt{\delta(d_{n,m}) (1 + \delta(d_{n,m}))} \right)}{1 + (1+d_{n,m}) \left(\delta(d_{n,m}) + \sqrt{\delta(d_{n,m}) (1 + \delta(d_{n,m}))} \right)} \quad (3.4)$$

Результати розрахунків також зведені у таблиці 3.2. Розрахункова залежність параметра спінової асиметрії β від товщини не магнітного шару d_n нормованого на товщину d_m базового магнітного шару для двох типів зразків представлена на рисунку 3.4.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків

№ п/п	Система	МО, %	α_m	$\rho_m^- \cdot 10^{-7}$, Ом·м	$\rho_m^+ \cdot 10^{-7}$, Ом·м	β
1	Fe(5)/Au(5)/Fe(5)/П	0,11	2,47	4,00	1,62	0,42
2	Fe(5)/Au(15)/Fe(5)/П	0,15	3,26	4,40	1,35	0,53
3	Fe(5)/Au(25)/Fe(5)/П	0,25	5,85	6,44	1,1	0,71
4	Fe(25)/Au(5)/Fe(25)/П	0,21	2,71	4,40	1,62	0,46
5	Fe(25)/Au(15)/Fe(25)/П	0,22	2,97	4,01	1,35	0,50
6	Fe(25)/Au(25)/Fe(25)/П	0,27	3,85	4,24	1,1	0,59

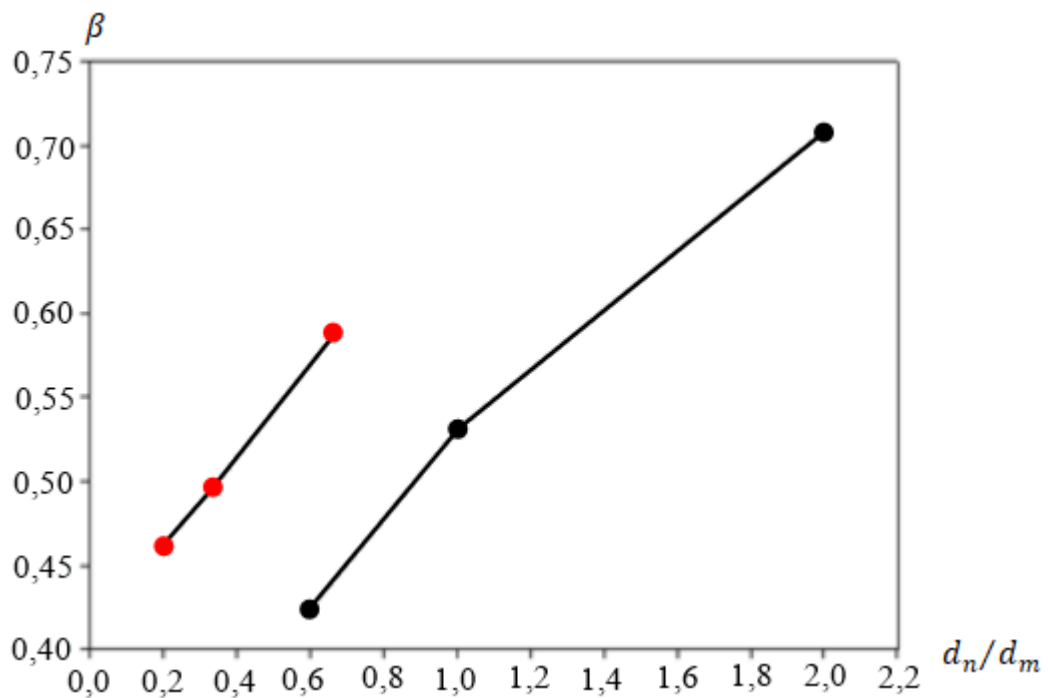


Рисунок 3.4 – Розрахункова залежність параметра спінової асиметрії β від товщини не магнітного шару d_n нормованого на товщину d_m базового магнітного шару для двох типів зразків: I – $d_m = 15$ нм, $d_n = 3-10$ нм) (●), II – $d_m = 5$ нм, $d_n = 3-10$ нм) (●)

Аналізуючи розрахункові дані для мажоритарних носіїв заряду, відмітимо що для системи $\text{Fe}(15)/\text{Au}(d_{\text{Au}})/\text{Fe}(15)/\text{П}$, на відміну від системи $\text{Fe}(5)/\text{Au}(d_{\text{Au}})/\text{Fe}(5)/\text{П}$, відбувається зменшення величини ρ_m^- при зростанні товщини немагнітного прошарку.

Порівнюючи дані для спінової асиметрії β слід зазначити, що його величина змінюється у межах від 0,42 до 0,71 для систем $\text{Fe}(5)/\text{Au}(d_{\text{Au}})/\text{Fe}(5)/\text{П}$ та від 0,46 до 0,59 для систем $\text{Fe}(15)/\text{Au}(d_{\text{Au}})/\text{Fe}(15)/\text{П}$.

ВИСНОВКИ

1. У роботі розглянуті та проведений критичний аналіз переваг та недоліків різних типів запам'ятовуючих пристроїв: від перфокарт (XIX ст.) до «бігової» пам'яті.

2. Установлено, що основними критеріями, які характеризують запам'ятовуючий пристрій є: щільність запису, кількість циклів перезапису, енергоефективність, стійкість до впливу зовнішніх факторів. Так, технологія HAMR, де робочими магнітними шарами виступають $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$, CoPt і Co_5Sm , дозволяє створити запам'ятовуючі пристрої із щільністю запису до 2 Тбайт/дюйм², та енергоспоживанням до 200 мВт. Об'єм переданих даних однією голівкою становить більше ніж 2 Пбайт.

3. Показано, що до перспективних технологій та нових типів пам'яті належать SONOS, PRAM, MRAM, FeRAM та інші. Вони характеризуються великою кількістю циклів перезапису (до 10^{16}), високою швидкістю запису (до 10^4 Мбайт/с), високою щільністю запису та низьким енергоспоживанням

4. Експериментальний зразок нового типу пам'яті – «бігова» пам'ять (Racetrack memory) був виготовлений компанією IBM з дроту пермалою (NiFe) довжиною 10 мкм та шириною 150 нм. Час відклику становить 20-32 нс, що в близько 10^5 разів більше, ніж в твердотільних зразках.

5. Були проведені розрахунки параметрів спінової залежності розсіювання для плівкової системи $\text{Fe}/\text{Au}/\text{Fe}/\text{П}$. Параметр об'ємної асиметрії – α_m лежить в межах від 2,47 до 3,85, параметр спінової асиметрії – β змінюється від 0,42 до 0,59. Основними носіями є електрони зі спіном «верх», так як питомий опір мажоритарних приблизно у 2 рази більший за питомий опір міні тарних носіїв заряду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Обчислювальна техніка – інформатика – інформаційні технології. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ukrainiancomputing.org/Early_u.html (Дата доступу: 17.04.2020 р.).
2. Essinger James. Jacquard's web. – USA: Oxford University Press, Oxford, 2007. – 316 p.
3. Як змінювалися носії інформації — від перфокарт до хмарних сховищ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://thebabel.com.ua> (Дата доступу: 17.04.2020 р.).
4. Поплавко Ю. М., Борисов О. В., Голубева І. П., Діденко Ю. В. Магнетики в електроніці: навчальний посібник. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – 366 с.
5. Магнітні головки запису і відтворення. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://opticstoday.com/> (Дата доступу: 17.04.2020 р.).
6. Товстолиткін О. І., Боровий М. О., Курилюк В. В., Куницький Ю. А. Фізичні основи спінтроніки. Навчальний посібник. – м. Вінниця: Вид-цтво «Нілан-ЛТД», 2014р. – 467 с.
7. What is MRAM? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mram-info.com/> (Дата доступу: 17.04.2020 р.).
8. Socolovsky L. M. Giant magnetoresistive properties of Fe/Au alloys produced by mechanical alloying / L. M. Socolovsky, F. H. Sanchez, P. H. Shingu // J. Magn. Magn. Mater. – 2001. V. 226–230. – P. 736–737.
9. Amram D. Phase transformations in Au(Fe) nano- and microparticles obtained by solid state dewetting of thin Au–Fe bilayer films / D. Amram, L. Klinger, E. Rabkin // Acta Mater. – 2013. – V. 61. – P. 5130–5143.
10. Magnetotransport properties of magnetically soft spin-valve structures / B. Dieny, V. S. Speriosu, S. Metin [et al.] // J. Appl. Phys. – 1991. – V. 69. – P. 4774–4779.
11. Лебедь О. О., Орленко В. Ф., Кочергіна О. Д. Фізичні основи інформаційних систем. Навчальний посібник. – м. Рівне; НУВГП, 2013р. – 185 с.
12. Design and scaling of a SONOS multielectric device for nonvolatile memory applications / M.L. French, Chun-Yu Chen, H. Sathianathan, M.H. White // IEEE T. Comp. Packaging Manufactur. Technol. – 1994. – V. 17, No 3. – P. 390–397.

13. Modeling of void formation in phase change memory devices / Adam Cywar, Zachary Woods, Sang Bum Kim [et al.] // *Solid-State Electron.* – 2020. – V. 164. – P. 107684.
14. Пам'ять завтрашнього дня. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://it-tehnolog.com/> (Дата доступу: 17.04.2020 р.).
15. Spintronics based random access memory: a review / Sabpreet Bhatti, Rachid Sbiaa, Atsufumi Hirohata, [et al.] // *Mater. Today.* – 2017. – V. 20. – P. 530-548.
16. Atasoyu Mesut. Sensing schemes for STT-MRAMs structured with high TMR in low RA MTJs / Mesut Atasoyu, Mustafa Altun, Serdar Ozoguz // *Microelectron. J.* – 2019. – V. 89. – P. 30-36.
17. Carbon nanotube ferroelectric random access memory cell based on omega-shaped ferroelectric gate / Seongchan Kim, Jia Sun, Yongsuk Choi [et al.] // *Carbon.* – 2020. – V. 162. – P. 195-200.
18. Hwang Cheol Seong. Ferroelectric memories. *Advances in Non-Volatile Memory and Storage Technology (Second Edition)* / Cheol Seong Hwang, Thomas Mikolajick // *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials.* – 2019. – P. 393–441.
19. Технологія NRAM. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nantero.com/technology/> (Дата доступу: 12.05.2020 р.)
20. Nitin. Millipede: Die-Stacked Memory Optimizations for Big Data Machine Learning Analytics / Nitin, Mithuna Thottethodi, T.N. Vijaykumar // *2018 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS).* Vancouver, BC. – 2018. – P. 160–171.
21. Parkin Stuart S.P. Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory / Stuart S.P. Parkin, Masamitsu Hayashi, Luc Thomas // *Science.* – 2008. – V. 320. – P. 190–194.
22. Ummelen F. Racetrack memory based on in-plane-field controlled domain-wall pinning / F. Ummelen, H. Swagten, B. Koopmans // *Sci. Rep.* – 2017. – V. 7. – P. 833.
23. Calculation of Spin Polarized Transport Parameters in "Simetric" GMR Structures of Co/Cu/Co Type / L.V. Dekhtyaruk, A.P. Kharchenko, Yu.O. Shkurdoda [et al.] // *Proc. NAP-2017.* – 2017. – V. 6(2) – 02MFPM04.