

7. МАГНІТНА ПАМ'ЯТЬ

Запам'ятовувальні пристрої, призначені для зберігання дискретної інформації, широко застосовують у різних галузях науки й техніки. Пристрої зберігання дискретної інформації мають вирішальне значення в сучасній обчислювальній техніці, де вони є важливою складовою ЕОМ. Дія пристроїв пам'яті ґрунтується на різноманітних фізичних принципах, але у пристроях тривалого енергонезалежного зберігання переважає магнітна пам'ять.

7.1. Визначальні особливості пристроїв пам'яті

Зазвичай у цифровій обчислювальній техніці інформація кодується у двійковій системі числення. Цей вид кодування дозволяє застосовувати для зберігання цифрової інформації найбільш прості й надійні елементи з двома стійкими станами – тригери, конденсатори, ферити й ін. Бістабільний елемент пам'яті має задовольняти таким вимогам:

- легко перемикатися з одного стану в інший (записування інформації);
- довго зберігати свій стан (зберігання інформації);
- дозволяти розпізнавання того, в якому стані елемент перебуває (зчитування інформації);
- повертатися до початкового стану (стирання інформації).

Для виконання всіх зазначених операцій елемент пам'яті у загальному випадку має сполучатися із зовнішнім середовищем двома каналами – вхідним і вихідним. Вхідним каналом надходять сигнали записування або стирання інформації, а також сигнал опитування стану елемента. За допомогою вихідного каналу знімаються сигнали зчитування, що вказують, яку інформацію записано в елементі. Якщо під впливом сигналу опитування стан запам'ятовувального елемента істотно змінюється, то реалізується руйнівне зчитування, або зчитування з руйнуванням інформації. Якщо ж після сигналу опитування стан елемента не змінюється, то здійснюється неруйнівне зчитування, або зчитування без руйнування інформації.

Під час формування ЗП із запам'ятовувальних елементів важливо мінімізувати кількість з'єднань елементів із зовнішніми відносно ЗП пристроями. Усі ЗП залежно від способу звертання до конкретної групи запам'ятовувальних елементів, що утворюють комірку для записування одного числа, можна розділити на кілька груп, схематично зображених на рис. 7.1:

a – стрічкові ЗП, у яких 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;

б, в – обертові ЗП, у яких до нерухомого пристрою записування-зчитування забезпечується циклічна подача комірок носія інформації, що має форму барабана або диска;

г – матричні ЗП, у яких запам'ятовувальні елементи розміщуються у вузлах матриці й потрібні клітинки обираються збудженням відповідних пересічних горизонтальних і вертикальних шин матриці;

д – променеві ЗП, у яких вибір запам'ятовувальних елементів здійснюється за допомогою електронного або світлового променя;

е – динамічні ЗП з акустичними або електромагнітними лініями затримки, у яких інформація у вигляді послідовності електричних імпульсів безперервно циркулює по замкненому електричному колу, і запам'ятовувальні комірки періодично проходять повз нерухомий пристрій записування-зчитування.

Якість ЗП визначають за низкою параметрів, з яких потрібно виокремити найбільш суттєві.

Кількість інформації, що зберігається в ЗП, називають ємністю: $C_N = N^n$, де N – кількість чисел у ЗП (кількість адрес); n – розрядність числа.

Ємність ЗП C_N вимірюється в бітах, але часто використовують іншу одиницю інформації – байт, що дорівнює восьми двійковим одиницям (бітам).

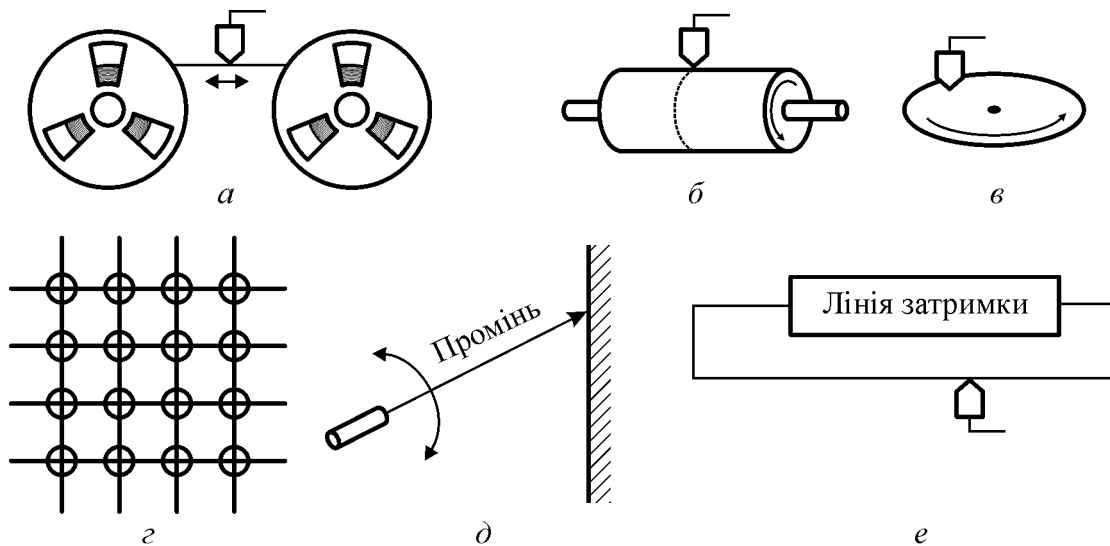


Рис. 7.1. Магнітна пам'ять із різними способами звертання до потрібної комірки

Швидкодія ЗП визначається декількома часовими характеристиками, до яких належать такі: час пошуку $t_{\text{п}}$ (час дешифрування адреси), що витрачається на пошук конкретної комірки; час записування $t_{\text{з}}$; час зчитування $t_{\text{зч}}$; час стирання $t_{\text{ст}}$; час регенерації $t_{\text{рег}}$ (у тих ЗП, у яких використовується руйнівне зчитування).

Найчастіше швидкодію ЗП оцінюють за укрупненою часовою характеристикою – *часом вибірки* $t_{\text{вб}}$, тобто часовим інтервалом від моменту надсилання до ЗП адреси необхідного елемента до моменту отримання числа на виході: $t_{\text{вб}} = t_{\text{п}} + t_{\text{зч}}$.

Залежно від кратності записування інформації ЗП поділяють на ЗП із записом, що не стирається, і ЗП із записом, що стирається. Запам'ятовувальні пристрої, пам'ять яких не стирається, допускають лише одноразове записування інформації, але багаторазове її зчитування. Цей принцип записування використовують для створення постійних ЗП для збереження в ЕОМ незмінної інформації. Пам'ять із записом, що стирається, допускає багаторазові записування, зчитування і стирання інформації.

У процесі виконання завдання ЕОМ запам'ятовувальні пристрої відіграють істотну роль. Дійсно, початкові дані й програму дій над ними для вирішення конкретного завдання вводять у машину через пристрої введення і зберігають у ЗП. Далі числа надходять із ЗП у арифметичний

пристрій – *процесор*, який виконує над ними операції згідно з програмою. Після виконання операції її результати з процесора переходять до ЗП і зберігаються там, поки вони знову не будуть потрібні на наступних етапах вирішення завдання.

Керування виконанням операцій відповідно до заданої програми реалізується в машині пристроєм керування, у який із цією метою перед здійсненням кожної операції із ЗП надходить закодована команда, яка визначає дії машини у процесі виконання операції. У цій команді містяться вказівки, які дії мають відбуватися у процесорі, та адреси комірок ЗП, з яких слід вилучити числа, які беруть участь в операції, та в які треба записувати числа, отримані під час її виконання. Остаточні та необхідні проміжні результати із ЗП машина видає через пристрій виведення.

З наведеного зрозуміло, що виконання кожної операції машиною неминуче пов'язано зі зчитуванням зафіксованої у ЗП інформації та із записуванням у ЗП нової інформації. Отже, для забезпечення великої швидкості роботи всієї машини необхідні швидкодійні не лише елементи у процесорі, пристроях введення і виведення, але й пристрої, які запам'ятовують інформацію.

Однак потрібно враховувати, що всі пристрої зберігання інформації не зосереджені в одному блоці ЗП. Усі блоки машини, в яких відбувається будь-яке оброблення інформації, мають вказувати на пристрої для зберігання інформації протягом необхідного часу. В пристроях введення і виведення інформації, в арифметичному, керівному та інших пристроях містяться ЗП найчастіше у вигляді реєстрів невеликої ємності, призначених для зберігання одного або кількох чисел і команд. Таким чином, в ЕОМ використовуються різноманітні ЗП, що відрізняються швидкодією та ємністю.

Для зберігання великих масивів інформації використовують зовнішній ЗП, який називають *накопичувачем*, у якому застосовують зазвичай пристрої з магнітним записуванням: магнітні стрічки, барабани та диски, на яких можна зберігати фактично необмежений обсяг інформації. Однак у

таких пристроях великий час вибірки – десятки секунд або навіть кілька хвилин.

Для зберігання інформації, що безпосередньо бере участь у процесі виконання операцій, процесор використовує оперативний ЗП, який складається зазвичай із швидкодійних феримагнітних запам'ятовувальних елементів. Ємність оперативних ЗП може становити до 10^6 команд, а час вибірки – частки мікросекунд.

У разі заповнення оперативного ЗП масив інформації переводиться у зовнішній ЗП. Для підвищення ефективності обміну інформацією пристроями ЕОМ, що працюють із різними швидкостями, і проміжного зберігання інформації під час обміну в складі електронних обчислювальних машин іноді використовують буферні ЗП, які погоджують зовнішні та внутрішні ЗП, що працюють із різними швидкостями. За ємністю й за швидкістю буферні ЗП посідають проміжне місце.

7.2. Фізичні принципи магнітного записування інформації

Запам'ятовувальні пристрої на магнітних носіях почали розробляти ще тоді, коли з'явилися перші цифрові обчислювальні машини, при цьому особливу увагу приділяли цифровим системам магнітного записування інформації. У сучасних ЕОМ магнітне записування використовують дуже широко – у пристроях введення й виведення інформації, в зовнішніх, внутрішніх і проміжних ЗП.

До основних переваг магнітного записування належать такі:

- технологічність процесу записування-відтворення;
- дешевизна носія інформації;
- простота поводження з носієм, легкість записувальних і зчитувальних пристроїв;
- можливість багаторазового використання носія;
- можливість тривалого зберігання запису без погіршення його якості;

- мале споживання енергії;
- компактність пристроїв.

До недоліків магнітного записування належать низька поперечна щільність записування й порівняно великий час вибірки.

Фізичною основою магнітного записування є властивість феромагнітних і феримагнітних матеріалів зберігати стан остаточної намагніченості. Носієм інформації зазвичай служать ферити, рідше металеві феромагнетики. Інформація записується в дискретній формі: двійковим цифрам 0 та 1 відповідають два стани намагніченості матеріалу в протилежних напрямках із залишковою індукцією $+B_z$ і $-B_z$. Якщо вимоги до точності записування й зберігання інформації порівняно невисокі, як, наприклад, у побутовому магнітофоні, то використовують не цифрове, а аналогове записування інформації.

Магнітні ЗП можна розділити на дві групи – динамічні й статичні. У ЗП *динамічного* типу записування здійснюється на рухомому носії з феримагнетика, зокрема у формі стрічки, циліндра, диска, за допомогою магнітних головок. У *статичних* магнітних ЗП середовище для зберігання інформації нерухоме й звертання до потрібної комірки відбувається посиленням сигналів відповідними комутаційними шинами.

У ЗП динамічного типу як магнітні носії інформації найбільшого поширення набули тонкі, близько декількох десятків мікрон, магнітні покриття з феролаку на немагнітній основі, тобто феромагнітного порошку, який перебуває в дисперсному стані в будь-якому сполучному матеріалі, наприклад нітраті або ацетаті целюлози, вінілових сполуках. Частинки магнітного порошку – це невеликі кристалики Fe_2O_3 (розміром 0,3...0,8 мкм), причому їх уміст у феролаку становить 25...50 %. Феромагнітні порошки характеризуються коерцитивною силою $(2...6) \cdot 10^4$ А/м і залишковою індукцією (0,04...0,12) Тл.

У процесі *записування* рухомий носій інформації піддається дії намагнічування у полі певного знака та різної інтенсивності, в результаті чого окремі ділянки феромагнітного шару намагнічуються, перетворюючись на елементарні постійні магнітики, що зберігають записану інфор-

мацію. Під час зчитування створені магнітики, рухаючись відносно пристрою, який зчитує інформацію, збуджують у його обмотці імпульси ЕРС, які відповідають записаній інформації.

У сучасних магнітних ЗП застосовують переважно записування із поздовжнім намагнічуванням, коли всі елементарні магніти орієнтовані в напрямку руху носія інформації. Магнітне поле, необхідне для записування, створюється за допомогою магнітних головок у вигляді кільцевого електромагніту з вузькою щілиною, обмоткою якого пропускають імпульси струму записування (рис. 7.2).

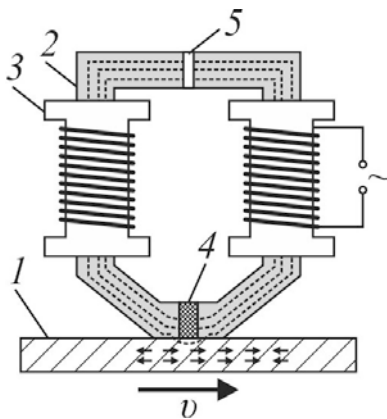


Рис. 7.2. Схема записування інформації за допомогою кільцевої магнітної головки: 1 – магнітний носій інформації; 2 – магнітний сердечник головки; 3 – обмотка головки; 4 – робочий зазор; 5 – додатковий зазор

Сердечник магнітної головки виконано з магнітом'якого матеріалу, що характеризується малою коерцитивною силою і великим значенням індукції насичення. Магнітний потік у зазорі сердечника концентрується на ділянках магнітного носія, який рухається поблизу зазору головки, й під час записування інформації намагнічує ці ділянки. Для зчитування інформації може використовуватися та сама магнітна головка.

Під час руху носія магнітної інформації повз зазор магнітне поле елементарних магнітів створює в магнітопроводі змінний за значенням магнітний потік, і в обмотці головки виникає імпульс ЕРС, який є сигналом зчитування інформації. Якщо записані ділянки в магнітному носії розміщені достатньо далеко одна від одної та їх взаємним впливом можна нехтувати, то форма імпульсу ЕРС, індукованої в обмотці магнітної головки зчитування, добре апроксимується кривою Гаусса.

Важливою перевагою ЗП з магнітним записуванням є висока щільність розміщення елементарних магнітів на поверхні носія інформації, тобто висока щільність записування інформації.

Поздовжня щільність – кількість кодових імпульсів, що розміщуються на 1 мм довжини магнітного носія в напрямку руху носія, – об-

межується взаємним впливом магнітних полів суміжних елементарних магнітів. У звичайних ЗП на магнітній стрічці поздовжня щільність записування не перевищує 40 імп./мм, хоча в деяких експериментальних розробках досягає близько 400 імп./мм.

Поперечна щільність записування обмежена шириною магнітної головки й наближається до двох доріжок на міліметр ширини накопичувача. Результуюча поверхнева щільність, що дорівнює добутку поздовжньої щільності записування на поперечну, сягає сотень бітів і більше на квадратний міліметр.

Є багато способів записування двійкових кодів на магнітну поверхню, оскільки для зберігання інформації можна використовувати *три стійкі стани* магнітного носія інформації, які визначаються трьома значеннями магнітної індукції ($+B_c$, 0, $-B_c$), якщо зовнішнього магнітного поля немає.

За характером змін стану намагніченості носія розрізняють такі способи записування: *з проміжками*, або *з поверненням до нуля*, за якого числа коду записуються на деякій відстані одне від одного; *без проміжків*, або *без повернення до нуля*, коли магнітний стан носія змінюється під час переходу до сусідньої ділянки записування лише за умови, що наступне двійкове число відрізняється від попереднього.

Крім того, за кількістю використовуваних станів магнітного носія розрізняють записування з двома й трьома рівнями. У першому випадку використовують два стани носія (магнітне насичення у двох протилежних напрямках $+B_c$ і $-B_c$), яким відповідають значення двійкових чисел 1 та 0; у другому – три стани (намагнічування до насичення в певному напрямку для записування 1 і 0, а також розмагнічений стан, що відповідає різним інтервалам між записами).

Записування інформації з трьома рівнями з проміжками здійснюється різнополярними імпульсами струму, під дією яких попередньо розмагнічений носій намагнічується до насичення і потім досягає значень, що відповідають $+B_c$ та $-B_c$. Проміжки між числами становлять розмагнічені ділянки носія інформації. Під час зчитування як 0, так і 1 виникають різнополярні імпульси, які відрізняються за фазою.

Здебільшого застосовують способи записування без проміжків (що дає високу щільність записування), за яких перехід носія з одного магнітного стану в інший відповідає не кожному окремому двійковому числу, а групі чисел.

Дуже поширений ще один метод записування – *спосіб фазової модуляції*, за якого кожен двійковий знак зображують послідовністю двох півхвиль: логічну одиницю – позитивною півхвилею, за якою йде негативна півхвиля, а логічний нуль – зворотним порядком півхвиль. У пристроях звукозапису й відеозапису інформація записується у вигляді аналогових сигналів, тоді як у ЗП ЕОМ – у цифровій формі. Однак принцип записування і структура запису як у цифровій, так і в аналоговій формі майже однакові.

Записування зазвичай здійснюється одночасно на кілька доріжок, причому на одній з них записуються синхронізувальні імпульси, що фіксують точний момент підходу комірки ЗП до записувальних головок. Динамічні ЗП виготовляють на магнітних стрічках, картах, барабанах, дисках та ін.

Записувальний пристрій на магнітній стрічці складається зі стрічкопротяжного механізму, комплекту записувальних головок, що зчитують і стирають інформацію, а також касет із гнучкою стрічкою, вкритою феролаком та намотаною на спеціальні котушки, бобіни. Стрічка переміщується, зберігаючи контакт із магнітними головками. Записувальні пристрої цього типу використовують як зовнішні ЗП та пристрої введення і виведення інформації в ЕОМ. Товщина стрічки становить 40...60 мкм, а товщина покриття – 10...20 мкм; звичайна щільність записування – десятки імпульсів на 1 мм; довжина стрічки – до 1 км; кількість паралельних доріжок рідко перевищує 30; швидкість переміщення стрічки в ЗП зазвичай дорівнює кільком метрам за секунду. Інформація записується на стрічку у вигляді групи чисел, між якими залишаються чисті ділянки для розгону й зупинки стрічки. Час пуску/зупинки дорівнює 15 мс, швидкість записування/зчитування – близько 200 тис. біт/с.

Накопичувачі на магнітній стрічці мають певні переваги, зокрема можливість зміни бобін зі стрічкою означає фактично необмежену ємність, найнижчу вартість зберігання одного біта інформації; вони стійкі в роботі й достатньо надійні. Основним недоліком ЗП на магнітній стрічці є порівняно великий час вибірки (до декількох хвилин), що спричинено необхідністю перемотування стрічки, щоб відшукати потрібну зону запису. З огляду на це стрічкові пристрої застосовують переважно у системах резервного копіювання.

7.3. Пам'ять на магнітних дисках

Найбільш поширеними динамічними пристроями пам'яті в ЕОМ вважають ЗП на магнітних дисках. Використовують два типи магнітних дисків: диски на гнучкій основі (зазвичай на полімерах), які називають флоппі-дисками; диски на жорсткій основі (на алюмінії) – вінчестером (внутрішня назва виробу «30-30» була співзвучною з калібром мисливської рушниці «*Winchester*»). У США та Європі ця назва вже вийшла з ужитку, проте закріпилася у російській та українській мовах.

На певному етапі розвитку персональних комп'ютерів найбільшого поширення набули накопичувачі на гнучких дисках, у яких застосовують контактне записування, за якого магнітні головки ковзають поверхнею носія інформації. Гнучкий диск розміщується у спеціальному нерознімному конверті, в якому передбачено отвори для переміщення магнітних головок поверхнею диска. Всі розміри дисків і конвертів стандартизовано, але через контактний характер записування гнучкі диски мають обмежений термін використання. Крім того, швидкість обміну та обсяг даних, який уміщується на дискетах, малі (0,7...1,44 МБ для дискет і до 100 МБ для ZIP-дисків), тому вони вже вийшли з ужитку. Для збільшення ємності дискет було винайдено технологію лазерного позиціонування доріжок на магнітному диску (*Floptical*), завдяки якій поперечна щільність записування збільшилася зі звичайних 135 доріжок на дюйм до 15 000 доріжок на дюйм. Ємність дискети розміром 90 мм

(3,5 дюйма) становить 21 МБ. Простий інфрачервоний лазер використовували виключно для позиціонування магнітних головок за допомогою канавок на поверхні диска. Записування та зчитування, як і у звичайних дискетах, виконувалося контактним способом за допомогою магнітних головок. Комерційний продукт виявився недостатньо надійним та набагато повільнішим, ніж інші технології, тому суттєвого поширення не набув.

Носієм інформації у вінчестерах є алюмінієвий диск, покритий з обох боків тонким шаром феролаку завтовшки 2...10 мкм. Інформація записується на концентричних доріжках з обох боків диска. Диски збираються в пакети й розміщуються на спільній осі, що обертається за допомогою електродвигуна (рис. 7.3).

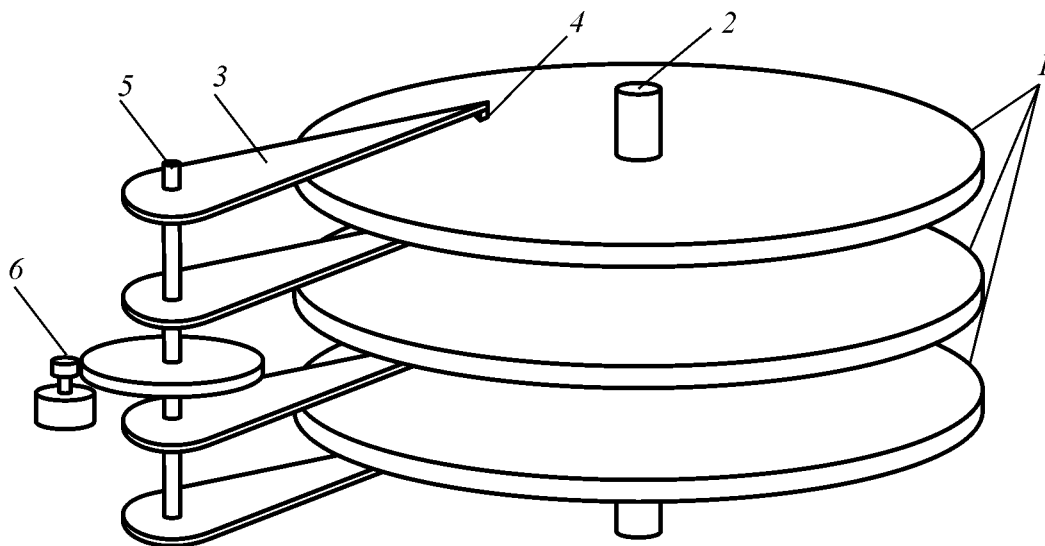


Рис. 7.3. Накопичувач на магнітних дисках:

1 – диски; 2 – вісь; 3 – важіль; 4 – магнітні головки; 5 – супорт; 6 – сервопривід

Записування і зчитування інформації виконуються за допомогою магнітних головок, що розміщуються між дисками. Головки можуть переміщатися від країв диска до центру за допомогою крокового двигуна, знімаючи або записуючи інформацію з різних концентричних доріжок.

У пакет входить від 1 до 12 дисків. Кожен модуль вінчестерного накопичувача, крім пакета дисків, містить індивідуальний блок магнітних головок, а також індивідуальні блоки приводу магнітних головок. Модулі розміщуються в жорсткому герметичному корпусі.

Диски обертаються за допомогою привідного електродвигуна зі швидкістю від 3600 до 15000 об./хв, тому в магнітних дисках вінчестерних накопичувачів застосовують безконтактне записування, за якого магнітні головки записування/зчитування за рахунок аеродинамічного ефекту «ширяють» над поверхнею магнітного покриття. Зазор між магнітною голівкою і поверхнею диска становить кілька мікрометрів.

Принцип роботи жорстких дисків аналогічний до роботи магнітофонів, оскільки робоча поверхня диска рухається відносно голівки. Під час подавання змінного електричного струму (в разі записування) на котушку голівки виникає змінне магнітне поле, яке із зазору голівки впливає на феромагнетик поверхні диска й змінює напрямок вектора намагніченості доменів залежно від рівня сигналу. Під час зчитування переміщення доменів поблизу зазору голівки приводить до зміни магнітного потоку в магнітопроводі голівки, що, у свою чергу, зумовлює виникнення змінного електричного сигналу в котушці завдяки ефекту електромагнітної індукції.

Останнім часом для зчитування застосовують магніторезистивний ефект, для чого у дисках розміщують магніторезистивні голівки, які дозволяють збільшити достовірність зчитування інформації (особливо у разі значної щільності записування інформації).

Метод поздовжнього записування. Біти інформації записуються за допомогою маленької голівки, яка, проходячи над поверхнею диска, який обертається, намагнічує мільярди горизонтальних дискретних ділянок – доменів (рис. 7.4). За цих умов вектор намагніченості домену розміщений поздовжньо, тобто паралельно до поверхні диска. Кожна із цих ділянок є логічним нулем або одиницею, залежно від намагніченості. Максимально досяжна за використання цього методу щільність записування становить близько 23 Гбіт/см². На сьогодні цей метод поступово витісняється методом перпендикулярного записування.

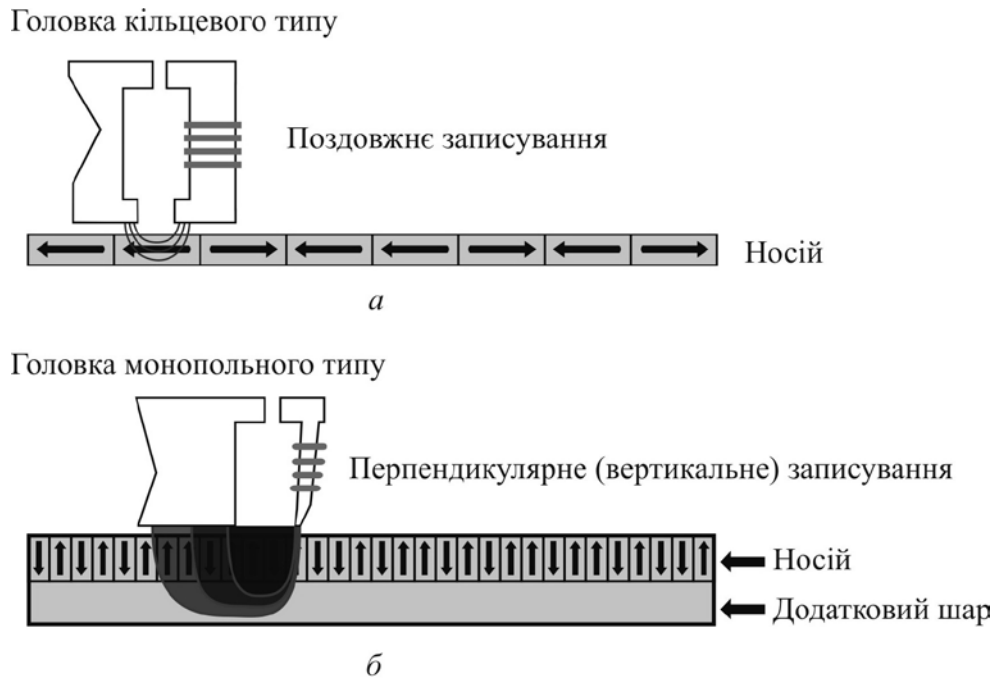


Рис. 7.4. Принцип поздовжнього (*a*) та перпендикулярного (*б*) записування

Метод перпендикулярного записування – це технологія, за якої біти інформації зберігаються у вертикальних доменах, що дозволяє використовувати сильніші магнітні поля і зменшити площу матеріалу, необхідну для записування 1 біт. Щільність записування у сучасних (на 2009 рік) зразків становить 62 Гбіт/см². Жорсткі диски з перпендикулярним записуванням доступні на ринку з 2005 року.

Метод теплового магнітного записування (англ. *Heat-assisted magnetic recording, HAMR*), який на сьогодні є найперспективнішим серед наявних і активно розробляється, полягає у використанні точкового підігрівання диска, який дозволяє головці намагнічувати дуже малі ділянки його поверхні. Після того, як диск охолоджується, намагніченість «закріплюється». На ринку дисків такого типу поки не представлено (на 2009 рік), є лише експериментальні зразки, щільність записування яких сягає 150 Гбіт/см². Інформаційна ємність на магнітних дисках може бути різною: від одиниць мегабайтів до кількох терабайтів.

7.4. Пам'ять на циліндричних магнітних доменах

Пам'ять на ЦМД – різновид енергонезалежної пам'яті обчислювальних машин – є розвитком магнітної пам'яті на твісторах (мініатюрного аналога пам'яті на магнітних сердечниках). Принцип дії твісторів ґрунтується на магнітострикційному ефекті, завдяки якому можливе переміщення «рельєфу намагніченості» у напрямку до детектора, в той час як намагніченість власне носія залишається незмінною.

Головний дослідник і розробник цього типу пам'яті Ендрю Бобек установив, що за використання магнітних плівок у твісторах ділянки зберігання (домени) мають бути порівняно великими, інакше записування не вдасться. Якщо після записування домену до всього матеріалу прикласти магнітне поле, то домен стискається у коло, розмір якого суттєво менший від нормальних доменів, що виникають, наприклад, у магнітних стрічках. Пам'ять на ЦМД виникла завдяки таким п'яти факторам:

- 1) керованому двовимірному руху доменних стінок у пермалоевих плівках;
- 2) застосуванню ортоферитів;
- 3) відкриттю стабільного ЦМД;
- 4) винаходу режиму роботи з доступом за допомогою поля;
- 5) відкриттю однонапрямленої анізотропії у гранатах.

Циліндричними магнітними доменами називають ізольовані однорідні намагнічені рухливі ділянки у феро- або феримагнетиках. Зазвичай ЦМД мають форму колових циліндрів, у яких напрямок намагніченості протилежний напрямку намагніченості магнетика.

Циліндричні магнітні домени виникають за певних умов у тонких монокристалічних пластинках або плівках феритів, що характеризуються сильною одноосьовою анізотропією (див. підрозд. 4.6). Вісь легкого намагнічування напрямлена перпендикулярно до поверхні плівки, в якій формуються динамічні неоднорідності у вигляді ЦМД (рис. 7.5). Рівновага ЦМД підтримується дією стискної сили з боку зовнішнього магнітного поля та магнітостатичної сили розтягування домену, тому ізольований домен існує в певному інтервалі значень зовнішнього поля:

$H_{\min} < H_{\text{вн}} < H_{\max}$, де H_{\min} – поле, за якого ЦМД розтягується у смуговий домен; H_{\max} – поле, за якого ЦМД сплющується – колапсує. Значення цих полів залежать від технологічних особливостей магнітної плівки.

Циліндричний магнітний домен можна переміщати у плівці завдяки

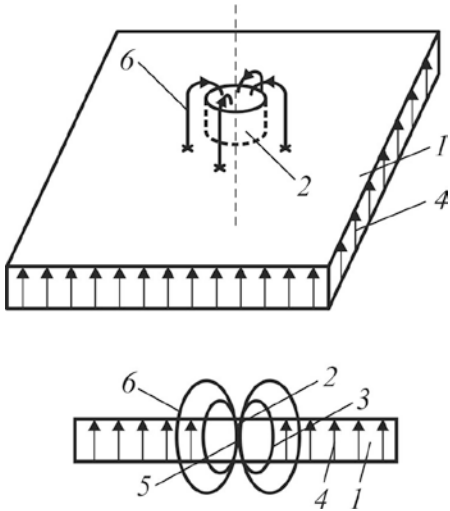


Рис. 7.5. Ізольований ЦМД:

- 1 – плівка ферит-гранату;
- 2 – ЦМД; 3 – стінка Блоха;
- 4 – вектор намагніченості сусіднього домену; 5 – вектор намагніченості домену;
- 6 – поле розсіювання домену

впливу на нього зовнішнього магнітного поля. Швидкість переміщення визначається силою цього поля, рухливістю домену та коерцитивною силою фериту. Перехід вектора намагніченості з одного стану в другий відбувається на межі поділу між двома доменами, яку називають доменною межею (або перехідним шаром), яка буває різних типів.

Неєлівська межа наявна в дуже тонких магнітних плівках (тонших за 30 нм). Вектор намагніченості орієнтований уздовж осі легкої намагніченості, а поворот атомних магнітних моментів у межі відбувається лише у площині плівки.

Блохівська межа наявна у плівках завтовшки понад 100 нм і в усіх масивних феромагнетиках (див. рис. 4.8). Розвертання магнітних моментів можливе як за, так і проти годинникової стрілки. Особливістю блохівської доменної стінки є те, що на її краях магнітних полів немає. Проміжним типом є межа з поперечними зв'язками, яка існує у плівках завтовшки від 30 до 100 нм.

Для пристроїв на ЦМД значний інтерес становлять вертикальні блохівські лінії (ВБЛ) у смугових доменах. Такі лінії є одним з типів динамічних неоднорідностей, на основі яких створено прилади для оброблення та зберігання інформації. У двійковому численні логічним 1 і 0 відповідає наявність або відсутність ВБЛ. Відстань між сусідніми ВБЛ достатньо мала, тому в стінці одного такого смугового домену можна зберігати значну кількість бітів інформації, зокрема у смуговому домені розміром 0,5 мкм – до 100 біт інформації.

Запам'ятовувальний пристрій складається з набору маленьких електромагнітів з одного боку й детекторів з другого. Вихід детектора також під'єднується до системи електромагнітів, утворюючи у такий спосіб замкнене коло, в якому можуть переноситися стани намагніченості індивідуальних доменів.

Перші ЦМД-прилади виготовляли на плівках із рідкоземельних ортоферитів із загальною формулою LnFeO_3 , проте на їх основі неможливо було забезпечити високу щільність записування інформації та економічність приладів.

Найбільш оптимальним середовищем для створення ЦМД-приладів виявилися монокристалічні плівки ферит-гранатів та епітаксіальні плівки ферит-шпінелів. Магнітоодноосьові плівки ферит-гранатів, вирощені на намагнічених підкладках галієво-гадолінієвого гранату (ГГГ), не мають помітної конкуренції з боку інших матеріалів.

Розрізняють гранати таких систем: $(\text{LaLuSmCd})_3 \cdot (\text{FeGa})_5 \text{O}_{12}$, $(\text{YSm})_3 \cdot (\text{FeAl})_5 \text{O}_{12}$ та $(\text{YLuSm})_3 \cdot (\text{FeGaSe})_5 \text{O}_{12}$. У разі формування континуальних середовищ намагаються отримати ЦМД субмікронного діаметра, для чого використовують, наприклад, гранати без іонів Sm^{3+} , а для доменопересувних структур – пермалоєві плівки (79 % Ni + 21 % Fe) з нульовим коефіцієнтом магнітострикції. Для пристроїв, що використовують спінове відлуння як динамічні неоднорідності, можуть бути застосовані ізотопні сполуки типу $\text{NiFe}^{57}\text{O}_4$, плівка або порошок Co^{59} та плівка $\text{Co}^{59}\text{Fe}^{57}$.

Генерація, детектування і керування динамічними неоднорідностями ЦМД. Інформація у пристроях на динамічних неоднорідностях типу доменів кодується двома основними способами: наявністю або відсутністю доменів у заданий момент у заданому місці, або станами меж доменів.

Процес генерації доменів здійснюється переважно локалізацією електромагнітного поля, наприклад, за допомогою аплікації у вигляді петлі, по якій проходить струм (рис. 7.6). Під час увімкнення імпульсу струму створюється поле розмагнічування, що перевищує значення

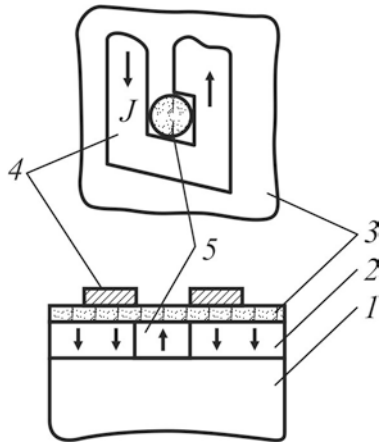


Рис. 7.6. Генерація доменів за допомогою петлі струму:
 1 – підкладка ГГГ;
 2 – епітаксiальна феритова плівка; 3 – iзолювальна плівка; 4 – аплікація;
 5 – ЦМД

робочого поля і має протилежний знак. Під такою аплікацією плівка локально перемагнічується й утворюється домен.

У пристроях на спінових хвилях використовують провідник зі струмом, струмові петлі та інші засоби генерації магнітного поля. Керування динамічними неоднорідностями магнітоелектронної природи здійснюють за допомогою різних фізичних ефектів і явищ, пов'язаних із накладенням фізичних полів. За своєю природою ЦМД мають магнітне поле, яке, взаємодіючи із зовнішнім полем, створює сили, що переміщують домен у напрямку мінімальної інтенсивності зовнішнього поля, тобто домен переміщується в на-

прямку, в якому його енергія буде мінімальною.

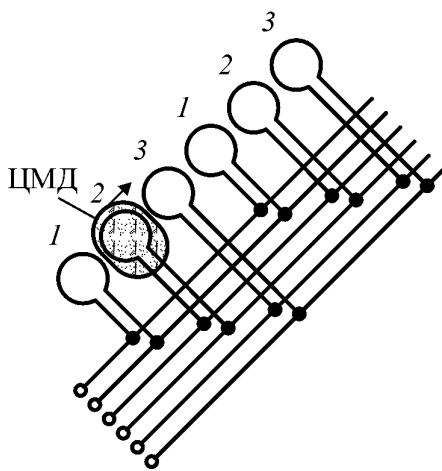


Рис. 7.7. Керування рухом ЦМД за допомогою струмових аплікацій

Струмові аплікації, що генерують магнітне поле, мають вигляд петель з металеві плівки (рис. 7.7). Напрямок струму в аплікації такий, щоб з'явилося магнітне поле, протилежне зовнішньому, й утворилася «яма», яка рухається в заданому напрямку внаслідок послідовного подавання імпульсів на фази Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 . Перевагу надають тритактовій схемі, щоб уникнути взаємодії сусідніх доменів, а також їх поворотного руху. Тактові аплікатури прості, але ненадійні через велику кількість провідників.

Для інших видів динамічних неоднорідностей наявні власні конструкції пристроїв керування, які ґрунтуються на магнітоелектричних ефектах і явищах.

Зчитування інформації полягає у виявленні типу динамічних неоднорідностей, що несуть логічні 0 і 1, та здійснюється у пристрої, який

називають детектором. Для детектування динамічних неоднорідностей використовують зазвичай фізичні процеси та явища, обернені до процесів генерації: ефекти індукції, магніторезистивний, магнітооптичний та ін. Загальні принципи конструювання детекторів потребують забезпечення необхідного рівня «сигнал/шум», технологічної сумісності детектора з пристроями керування і генерування, стійкості до зовнішніх впливів.

Найбільш широкого застосування ЦМД набули у пристроях пам'яті, що дозволяє отримати високу щільність записування інформації, енергонезалежність, малу споживану потужність, високу швидкодію, низьку вартість. Відсутність рухомих носіїв дозволяє використовувати пристрої пам'яті на ЦМД у бортових системах.

Інформаційні структури пристроїв пам'яті на ЦМД можуть бути організовані різними способами. Наприклад, для пристроїв великої інформаційної ємності характерна організація послідовно-паралельного типу. Типову комірку пристрою пам'яті на ЦМД наведено на рис. 7.8.

Окремий чип виготовляють за планарною технологією груповим методом. Як підкладку чипа використовують сапфір, на який наносять ферит-гранатову плівку, в якій можуть

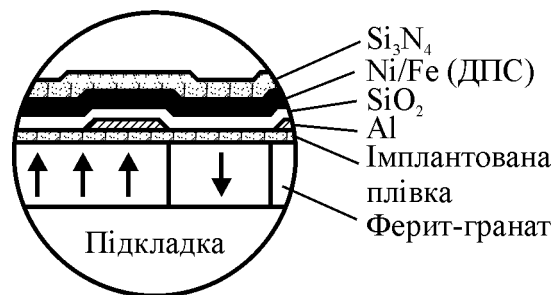


Рис. 7.8. Комірка пристрою пам'яті

утворюватися домени. За допомогою фотолітографії формують струмові шини, пермалоєві (NiFe) доменопересувні структури. Чип захищений плівкою нітриду кремнію і закріплюється на діелектричній немагнітній пластині. Два постійні самарієкобальтові магніти створюють у ферит-гранатовій плівці домени оптимальних розмірів.

Нині розробляють пристрої із субмікронними розмірами доменів. Зменшення розмірів носія інформації можна досягти, використовуючи пам'ять, що ґрунтується на вертикальних блохівських лініях. Інформаційний масив у цьому разі формується зі страйпів. Канал введення інформації складається з генератора блохівських ліній, доменопересувної

структури, в якій кількість позицій дорівнює кількості ліній струмових шин. Канал виведення інформації містить систему реплікаторів (за кількістю ліній). Сформована кодова послідовність ЦМД спрямовується в детектор, де зчитується інформація. Інформаційна ємність пристроїв пам'яті на вертикальних блохівських лініях сягає $1,5 \cdot 10^4$ біт.

На сьогодні розробляють «інтелектуальні» ЦМД-системи, у яких на одному кристалі розміщені логічний процесор та інформаційний масив. У такій системі можна поєднати на одній платі процеси зберігання й оброблення інформаційних масивів у реальному масштабі часу.

Перевагою пам'яті на ЦМД вважають відсутність рухомих частин, що зумовлює високу механічну стійкість і надійність, а недоліком – порівняно повільну швидкість зчитування, оскільки для доступу до певного біта потрібно опрацювати стан ЦМД від місця зберігання до детектора.

Елементи пам'яті на ЦМД набули найбільшого поширення у 70–80 роках ХХ століття. Таку пам'ять застосовували лише у системах, що зазнавали значної вібрації, однак із винаходом флеш-пам'яті й цей напрям утратив актуальність для побутової електроніки, але залишається цікавим для спеціальних розробок.

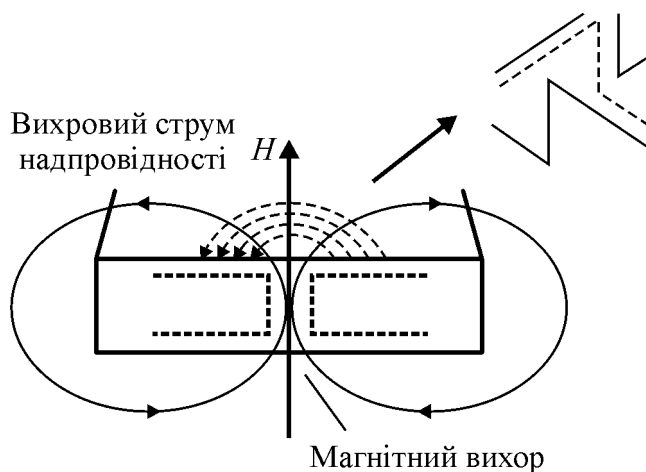


Рис. 7.9. Магнітний вихор у надпровідній плівці

Запам'ятовувальні пристрої, крім ЦМД, можуть також використовувати **магнітні вихори**, що характеризуються замкненими магнітними колами (рис. 7.9). Принципи організації пристроїв пам'яті на магнітних вихорах аналогічні пристроям, які застосовують ЦМД.

Генератор магнітних вихорів (флюксонів) формує вихори, що перебувають у рівноважному стані. Пристрій керування становить схему просування вихорів каналом, яке здійснюється силою Лоренца, створеною транспортним струмом.

Односпрямованість руху вихорів забезпечується асиметрією каналу просування. Зчитування магнітних вихорів може здійснюватися з використанням квантових інтерферометрів, а також одиничних джозефсо-нівських контактів.

Можливий також варіант формування зсувного регістру на магнітних вихорах (варіант мажор-мінорної організації). У цьому разі реалізується накопичувач на магнітних вихорах із паралельно-послідовною організацією записування і зчитування інформації. Прогнозована щільність записування інформації становить $2 \cdot 10^8$ біт/см. Аналіз показує, що швидкість оброблення інформації таких пристроїв сягає близько 10^9 біт/с. Буферна або зовнішня пам'ять на флюксонних ЗП технологічно й оперативно сумісна з мікроелектронними системами й криогенними процесорами.

7.5. Магнітооптичні диски

Магнітооптичні диски є різновидом оптичних ЗП із носієм, що має магнітні властивості. В оптичних дисках зі стиранням і перезаписуванням інформації використовуються домени тербієво-залізокобальтового сплаву з точкою Кюрі 240°C . Власне носій складається з феромагнітного матеріалу, вміщеного між пластиковими пластинами. Записування і зчитування відбувається безконтактним способом.

Домени спочатку орієнтовані в одному напрямку (рис. 7.10, а). Під час зчитування промінь лазера освітлює поверхню диска. Завдяки *магнітооптичному ефекту Керра* інтенсивність і поляризація відбитого променя залежать від стану намагніченості освітлюваної ділянки. Вимірюванням характеристик відбитого

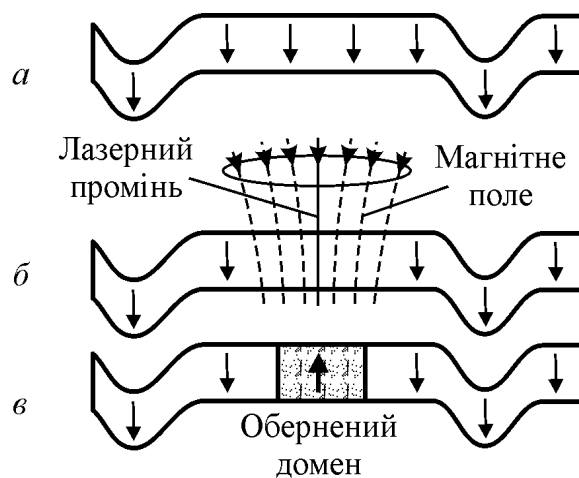


Рис. 7.10. Динаміка обертання домену в оптичному диску: а – початковий стан матеріалу магнітного носія; б – локальне нагрівання ділянки магнітного матеріалу; в – зміна орієнтації домену

променя визначають стан намагніченості ділянки диска й, відповідно, записаний біт інформації.

Для записування потужність лазерного променя підвищується настільки, що приводить до локального нагрівання ділянки магнітного матеріалу вище точки Кюрі (рис. 7.10, б). Якщо в цьому місці впливати зовнішнім магнітним полем, то можна змінити орієнтацію домену (рис. 7.10, в), оскільки коерцитивне поле значно знижується з підвищенням температури. Намагніченість нагрітої ділянки закріплюється з охолодженням.

Зазвичай записування виконується у кілька проходів. Під час першого проходу – стирання – за допомогою лазера ділянка носія нагрівається і магнітною голівкою намагнічується до стану, що відповідає логічному 0. Під час другого проходу полярність магнітного поля змінюється на протилежну й локальним нагріванням лазерним променем потрібні ділянки встановлюються в 1. Під час третього проходу відбувається контрольне зчитування записаної інформації. На деяких спеціальних носіях час записування зменшено завдяки перезаписуванню без попереднього стирання, тому записування зазвичай потребує вдвічі-втричі більше часу, ніж зчитування, однак, на відміну від лазерних оптичних приводів, магнітооптичні диски характеризуються дуже високою надійністю.



Рис. 7.11. Загальний вигляд магнітооптичного диска розміром 90 мм і видимі оптичні мітки на поверхні магнітооптичного носія

Магнітооптичний носій уміщують у пластиковий корпус, подібний до корпуса дискет 90 мм (рис. 7.11), який захищає носій від пилу та зовнішніх забруднень. Спочатку їх випускали з одноразовим записуванням (аналогічно до CD-R), однак згодом почали виготовляти диски з можливістю необмеженого перезаписування.

Придатні до комерційного використання моделі з'явилися 1985 року. З того часу випускають моделі з

носієм діаметром 130 мм (5,25 дюйма) та 90 мм (3,5 дюйма). У деяких країнах, наприклад у Японії, магнітооптичні диски дуже поширені, тоді як в інших майже не застосовуються. З погляду операційної системи накопичувачі на магнітооптичних дисках подібні до вінчестерів і на них використовуються файлові системи жорстких дисків.

Ємність дисків розміром 130 мм становить від 650 МБ до 9,2 ГБ. Найбільшого поширення набули магнітооптичні диски розміром 90 мм та ємністю від 128 МБ до 2,3 ГБ. Незважаючи на надзвичайно високу надійність, через порівняно високу вартість і низьку швидкість записування магнітооптичні диски поступилися дешевшим флеш-пам'яті й оптичним дискам з можливістю перезаписування.

7.6. Наномагнітні плівки у пристроях пам'яті електронних обчислювальних машин

Вивчення магнітних матеріалів, переважно плівок, виготовлених за нанотехнологіями, має на меті збільшити ємність магнітних накопичувачів інформації, зокрема жорстких дисків комп'ютерів. Намагнічення у певному напрямку дуже малої ємності магнітного носія називають бітом. Для досягнення щільності збереження $1,55 \text{ Гбіт/см}^2$ окремий біт має займати місце завдовжки 70 нм і завширшки 1 мкм, а товщина магнітної плівки – становити близько 30 нм.

Магнітні пристрої для зберігання інформації, наприклад жорсткі диски, ґрунтуються на застосуванні дрібних кристаликів зі сплаву хрому й кобальту. Однією з проблем, які виникають за розмірів біта, менших ніж 10 нм, є «самостирання» пам'яті через те, що вектор намагніченості в намагніченій мікроділянці може змінити напрямок під дією теплових флуктуацій. Вирішення цієї проблеми потребує використання нанорозмірних зерен з високими значеннями намагніченості насичення, що характеризуються більш сильною взаємодією між зернами.

Наприклад, за допомогою нанотехнології було отримано магнітні нанозерна сполуки FePt із більшим значенням намагніченості, ніж в аналогах. Частинки FePt формувалися під час нагрівання розчину аце-

тилацетонату платини й карбонілу заліза з додаванням відновника. Після розпилення розчину на підкладку він випаровувався, залишаючи на ній пасивовані частинки. Тонка плівка, одержана в результаті цієї операції, складається з твердого вуглецевого шару, що містить частинки FePt розміром близько 3 нм, який може забезпечити щільність записування 23 Гбайт/см², тобто в 10 разів більшу, ніж у більшості наявних комерційно доступних носіїв.

Коли розміри магнітних наночастинок стають надто малими, магнітні вектори атомів у зовнішньому магнітному полі орієнтуються однаково в межах зерна, усуваючи складності, які за інших умов виникають через наявність спільних доменних стінок і ділянок із різними напрямками намагніченості. Причиною цього є особливість нанокластерів, яка полягає у зниженні концентрації дефектів структури всередині кластера (дефекти, які виникають у разі застосування технології, легко дифундують на поверхню).

Зазвичай у магнітних носіях використовують витягнуті магнітні зерна. Динамічні властивості поведінки системи витягнутих нанорозмірних магнітних частинок описують моделлю, яка передбачає, що без прикладання магнітного поля еліпсоїдальні зерна мають лише два можливі стійкі напрямки магнітного моменту: «вгору» або «вниз» відносно довгої осі магнітної частинки, як показано на рис. 7.12. Залежність магнітної енергії від орієнтації вектора магнітного моменту становить симетричну потенціальну яму з двома мінімумами, розділеними потенціальним бар'єром. Під дією теплової флуктуації частинка може змінювати орієнтацію магнітного вектора.

Частинка також може (але з набагато меншою ймовірністю) змінити свою магнітну орієнтацію за допомогою квантовомеханічного тунелювання, коли теплова енергія $k_B T$ набагато менша від висоти бар'єра. Тунелювання – суто квантовомеханічний ефект, який виникає внаслідок того, що є незначна ймовірність зміни магнітного стану з напрямку «вгору» на «вниз». У зовнішньому магнітному полі потенціал змінюється так, як це показано на рис. 7.12 пунктирною лінією, і в разі досягнення полем зна-

чення, яке дорівнює коерцитивній силі, один з рівнів стає нестійким.

Наведена модель пояснює багато магнітних властивостей маленьких магнітних частинок, наприклад форму петлі гістерезису. Проте вона має таке обмеження: у ній переоцінено значення коерцитивного поля,

оскільки можливий тільки один спосіб переорієнтації. Магнітна енергія частинок у моделі є функцією колективної орієнтації спінів магнітних атомів, що становлять частинку, і зовнішнього магнітного поля. У моделі враховано найпростішу (лінійну) залежність магнітної енергії частинок від їх розмірів, але коли розмір частинок наближається до 6 нм, більшість атомів містяться на поверхні, тобто вони можуть мати такі магнітні властивості, які суттєво відрізняються від параметрів великих частинок. Наприклад, оброблення поверхні наночастинок магнітом'якого α -заліза завдовжки 600 нм та завширшки 100 нм різними хімічними речовинами змінює коерцитивну силу до 50 %, що свідчить про важливу роль поверхні нанорозмірних магнітних частинок у формуванні магнітних властивостей зерна. Отже, динамічне поведіння дуже малих магнітних частинок виявляється більш складним, ніж це впливає з розглянутої моделі.

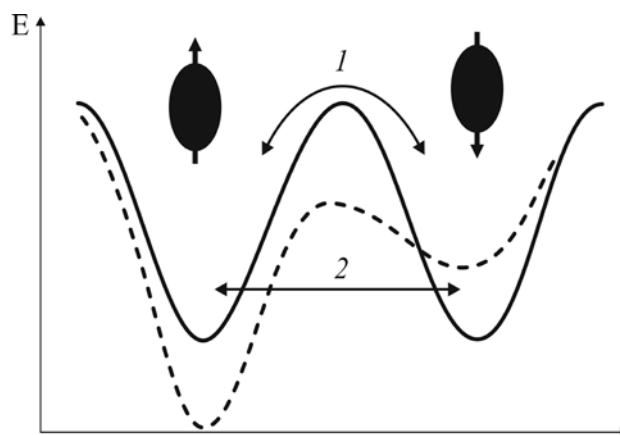


Рис. 7.12. Схема потенціалу подвійної ями – залежність енергії від орієнтації магнітного моменту за відсутності (суцільна лінія) та наявності (пунктирна лінія) зовнішнього магнітного поля:
1 – термічно активований перехід;
2 – тунельний перехід

7.7. Магніторезистивна оперативна пам'ять

Технологія магніторезистивної оперативної пам'яті почала розвиватися з 1990 року. Щільність наявних технологій пам'яті, зокрема флеш-пам'яті й динамічних пристроїв пам'яті, продовжує підвищуватися, забезпечуючи їм нішу на ринку. Однак прихильники магніторезистивної

оперативної пам'яті вважають її переваги настільки значущими, що зрештою вона може стати панівною для всіх типів пам'яті, тобто буде універсальною пам'яттю.

На відміну від звичайних технологій оперативної пам'яті, у магнітнорезистивній оперативній пам'яті дані зберігаються у вигляді не електричного заряду чи струму, а магнітних елементів, які утворюються з двох феромагнітних пластин, кожна з яких може зберігати намагніченість, розділених тонким ізолювальним шаром. Одна з двох пластин – постійний магніт, установлений з певною полярністю, поле другої може бути змінено, відповідно до зовнішнього, полем для запам'ятовування. Така конфігурація, яку називають *спіновим клапаном*, є найпростішою структурою магнітнорезистивної оперативної пам'яті.

Найпростіший метод читання полягає у вимірюванні електричного опору елемента. Певна комірка ЗП вибирається вмиканням пов'язаного з нею транзистора, який проводить струм від джерела живлення через елемент пам'яті на землю. Завдяки магнітному тунельному ефекту електричний опір елемента змінюється залежно від орієнтації поля двох пластин. Опір елемента визначають, вимірюючи струм, і у такий спосіб опосередковано знаходять полярність, записану на другій пластині. Зазвичай стан, коли дві пластини мають однакову полярність, означає 1, а у стані з протилежною полярністю опір буде вищим і відповідатиме 0.

Дані можна записати в комірки різними способами. Найпростіше, коли кожна комірка розміщена між парою ліній запису, орієнтованих перпендикулярно одна до одної. Коли через них проходить струм, між ними виникає індуковане магнітне поле, яке й запам'ятовує записувальна пластина. Цей спосіб дії подібний до принципу пам'яті на магнітних кільцях, який широко використовували у 60-х роках ХХ століття, однак вимагає достатньо сильного струму для створення поля, що робить його неприйнятним для малопотужних пристроїв і одним з основних недоліків магнітної оперативної пам'яті. Крім того, зі зменшенням розмірів пристрою настає момент, коли індуковане поле перекриває сусідні елементи на невеликій площі, що може призводити до помилкового за-

писування в сусідні комірки. Через вплив на сусідні комірки необхідно виготовляти ЗП достатньо великих розмірів. Перший підхід до вирішення цієї проблеми полягає у використанні кругових доменів за допомогою гігантського магніторезистивного ефекту, однак цей напрям більше не розвивається; другий підхід (*режим перемикання*) – у багатоступеневому процесі записування до модифікованої багат шарової комірки. У модифікованій комірці міститься «штучний антиферомагнетик», магнітна орієнтація якого набуває одного з двох протилежних значень, у результаті чого шари мають лише два стійкі стани. Записування здійснюється за умови, що струм однієї з ліній запису має певний часовий зсув відносно другої, коли утворюється «обертове» поле. Будь-яка напруга, менша від рівня записування, підвищує стійкість комірки до перемикання, тобто комірки, розміщені вздовж однієї з ліній записування, не постраждають від впливу сусідніх, що дозволяє зменшувати їх розміри.

За новим методом *спінової передачі обертального моменту*, або *перемикання перенесення спіну*, використовують спін-вирівняні («поляризовані») електрони для безпосереднього впливу на домени. Якщо електрони, що вносяться до шару, змінюватимуть спін, то виникатиме обертальний момент, який, у свою чергу, впливатиме на сусідні шари, знижуючи струм, необхідний для записування комірки, приблизно до рівня струму зчитування. Таким чином, комірки спінової передачі придатні для пристроїв з високою щільністю завдяки зниженим вимогам до струму. За прогнозами, такі комірки матимуть розміри 65 нм і менше. Їх недоліком є необхідність збереження спінової когерентності.

Основним чинником, що визначає вартість пам'яті, є щільність компонентів. Чим менші компоненти, тим більше їх може бути упаковано на один чип, що, у свою чергу, означає більше чипів з кожної пластини. Така магнітна оперативна пам'ять за фізичними ознаками подібна до динамічної пам'яті, хоча й не потребує транзистора для операції записування. Комірки магнітної оперативної пам'яті можуть зазнавати

впливу сусідніх комірок, коли їх розміри досягають 180 нм і менше. Новітні методи перемикання дозволяють зменшити розміри комірок до 90 нм, що порівнянно з динамічною пам'яттю.

Конденсатори динамічної пам'яті втрачають свій заряд із плином часу, тому слід *періодично* оновлювати всі комірки близько 20 разів на секунду читанням кожної з них (що й приводить до перезаписування). Це вимагає сталого джерела живлення, тому динамічна пам'ять втрачається під час вимикання живлення комп'ютера. Чим менші комірки динамічної пам'яті, тим частіше їх потрібно оновлювати.

Натомість магнітна оперативна пам'ять не потребує оновлення, а отже і сталого енергоспоживання, тобто вона зберігається з вимиканням живлення. Теоретично для зчитування необхідно більше енергії, ніж у динамічній пам'яті, але на практиці різниця незначна. Записування вимагає вищої енергії для перемикання стану комірки, але завдяки тому, що немає втрат на оновлення, пристрої магнітної пам'яті можуть мати перевагу й за споживаною енергією.

Магнітна оперативна пам'ять зберігає інформацію в умовах вимикання живлення, як і флеш-пам'ять. Вимоги живлення у разі зчитування флеш-пам'яті й магнітної оперативної пам'яті подібні, однак для записування флеш-пам'яті потрібне накручування імпульсу напруги (близько 10 В), що потребує часу. Крім того, імпульси струму зумовлюють фізичне спрацювання комірки, тому її можна перезаписати обмежену кількість разів. З цього погляду магнітна оперативна пам'ять потребує меншої енергії для перезаписування, а кількість циклів перезаписування майже необмежена.

Швидкодія динамічної пам'яті визначається часом, протягом якого зчитується чи записується заряд. Принцип дії магнітної оперативної пам'яті ґрунтується на вимірюванні напруги, а не заряду чи струму, тому швидкість доступу може бути високою. Дослідники з фірми *IBM* продемонстрували пристрої магнітної оперативної пам'яті з часом доступу близько 2 нс, що навіть краще, ніж у найсучаснішої динамічної пам'яті, оскільки дозволяє підвищити швидкодію у тисячі разів.

Резюме

1. Магнітні пристрої зберігання дискретної інформації мають вирішальне значення в сучасній обчислювальній техніці, де вони є важливою складовою електронних обчислювальних машин. Пристрої пам'яті можуть ґрунтуватися на різноманітних фізичних принципах.

2. Фізичною основою магнітного записування є властивість феромагнітних і феримагнітних матеріалів зберігати стан залишкової намагніченості. Носієм інформації зазвичай служать ферити, а металеві феромагнетики застосовують рідше. Інформація записується в дискретній формі. Двійковим числам 0 і 1 відповідають два стани намагніченості матеріалу в протилежних напрямках із залишковою індукцією $+B_z$ та $-B_z$. Якщо вимоги до точності записування і зберігання інформації порівняно невисокі, то використовується не цифрове, а аналогове записування інформації.

3. Магнітні ЗП можна розділити на дві групи – динамічні й статичні. У пристроях *динамічного* типу записування здійснюється на рухомому носії з феримагнетика у формі стрічки, циліндра, диска за допомогою магнітних головок. У *статичних* магнітних ЗП середовище для зберігання інформації нерухоме й звертання до потрібної комірки виконується за рахунок посилення сигналів відповідними комутаційними шинами.

4. До найбільш поширених динамічних пристроїв пам'яті в ЕОМ належать ЗП на магнітних дисках двох типів: дисках на гнучкій основі (зазвичай на полімерах), або флоппі-дисках; дисках на жорсткій основі (на алюмінії) – вінчестерах.

5. За методом *поздовжнього записування* біти інформації записуються за допомогою маленької головки, яка, проходячи над поверхнею диска, який обертається, намагнічує мільярди горизонтальних дискретних ділянок – доменів. За цих умов вектор намагніченості домену розміщений поздовжньо, тобто паралельно до поверхні диска. Метод *перпендикулярного записування* – технологія, за якої біти інформації зберігаються у вертикальних доменах, що дозволяє використовувати більш сильні магнітні

поля і знижувати площу матеріалу, необхідну для записування 1 біт. За методом *теплого магнітного записування* використовується точкове підігрівання диска, яке дозволяє головці намагнічувати дуже малі ділянки його поверхні. Після того, як диск охолоджується, намагніченість «закріплюється».

6. Запам'ятовувальний пристрій на циліндричних магнітних доменах утворюється набором маленьких електромагнітів з одного боку та набором детекторів з другого. Вихід детектора також під'єднується до системи електромагнітів, утворюючи у такий спосіб замкнене коло, в якому можуть переноситися стани намагніченості індивідуальних доменів.

7. Магнітооптичні диски є різновидом оптичних ЗП із носієм, що має магнітні властивості. В оптичних дисках зі стиранням і перезаписуванням інформації зазвичай використовуються домени тербієзалізокобальтового сплаву, а носій складається з феромагнітного матеріалу, вміщеного між пластиковими пластинами. Записування та зчитування відбувається безконтактним способом.

8. У магніторезистивній оперативній пам'яті дані зберігаються у вигляді не електричного заряду чи струму, а магнітних елементів, які утворюються з двох феромагнітних пластин, кожна з яких може зберігати намагніченість, розділених тонким ізолювальним шаром. Перша пластина – постійний магніт, установлений з певною полярністю, поле другої може бути змінено, відповідно до зовнішнього, полем для запам'ятовування. Така конфігурація, яку називають *спіновим клапаном*, є найпростішою структурою магніторезистивної оперативної пам'яті. Запам'ятовувальний пристрій побудований із сітки таких елементів.

9. Магнітна оперативна пам'ять зберігає інформацію під час вимикання живлення, як і флеш-пам'ять. У *режимі перемикання* магніторезистивної пам'яті використовується багатоступеневий процес записування до модифікованої багатошарової комірки. За методом спінової передачі обертального моменту, або *перемикання перенесенням спіну*, використовують спін-вирівняні («поляризовані») електрони для безпосереднього впливу на домени.