

# Віртуальні складові інтелектуальної око-процесорної розподіленої геоінформаційно –енергетичної системи

Цирульник С.М., Кожем'яко В.П., Кожем'яко К. В.

Вінницький національний технічний університет

Вершиною розвитку інформаційних систем є на сьогодні геоінформаційні системи (ГІС), які є втіленням найвищих досягнень у сфері оперування великими об'ємами даних глобальної бази знань. ГІС будується на високопродуктивних обчислювальних системах високого паралелізму. Багато обчислювальних задач для ГІС вимагають забезпечення системної пам'яті великої ємності з швидкісним високопаралельним зчитуванням. Обслуговування таких обсягів даних і переміщення їх для обробки надшвидкими процесорами вимагають радикально нових підходів при створенні пристроїв зберігання інформації. Тому дуже актуально розглянути сучасні перспективні технології побудови пам'яті.

## Пам'ять на магнітних носіях

Проблема підвищення щільності запису на магнітних носіях стає все більш і більш актуальною. Вирішити її намагаються по-різному. Цілий ряд дослідницьких груп зайнятий пошуком радикально нових шляхів подолання суперпарамагнітної межі.

Прикладом, що не належить до "тимчасових заходів", є використання спеціально підготовлених плівок, в яких картина розташування магнітних доменів наперед задається методом літографії. Як вважають експерти, цей метод дозволяє досягти дуже великої щільності запису інформації, проте на сьогодні поки не вдалося вирішити проблему масового виробництва, а також знайти відповідну схему механізму читання/запису даних [2].

Інший напрям досліджень - плівки з нанесеними на них намагніченими мікрочастинками, кожна з яких забезпечена немагнітною оболонкою, що забезпечує значне зменшення інтенсивності взаємодії частинок однією з одною [3].

До теперішнього часу розроблено декілька методів отримання намагнічених мікрочастинок. Один з них припускає використання дугового розряду: з його допомогою можна одержати кобальтові частинки з вуглецевою оболонкою, проте недолік даного методу полягає в тому, що в його рамках у край складно добитися монодисперсності частинок. Основа іншого методу - хімічний синтез. В цьому випадку забезпечити монодисперсність досить просто, проте виникає інша проблема - недостатня хімічна стійкість оболонки при розміщенні частинок на тонких плівках.

Над технологією, покликаною об'єднати в собі відразу декілька підходів, в даний час працює британська фірма NanoMagnetics. За її твердженнями, вона прагне знайти рішення, що не тільки забезпечує високу ємність носіїв, але і сумісне з нинішніми системами зберігання даних. Головна ідея NanoMagnetics полягає в тому, щоб формувати магнітні мікрочастинки усередині білкової молекули [2]. Для цієї мети використовується білок ферітін, який в живих організмах виконує роль накопичувача заліза. Він стійкий до високих температур (протягом обмеженого періоду часу він здатний витримати 65 °С без помітних руйнувань структури) і до широких коливань рН-чинника.

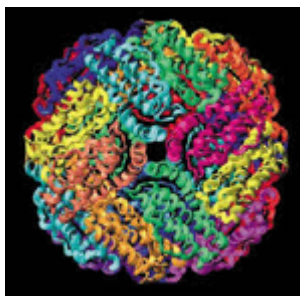


Рисунок 1. - Молекула ферітіну

Молекула ферітіну є сферичний клубок діаметром близько 12 нм, усередині якого є порожнина діаметром 7,5–8 нм (рис.1). Саме в ній в "природних умовах" і накопичується оксид заліза, утворюючи мінеральне ядро. Для отримання магнітних мікрочастинок його необхідно видалити, і робиться це методом розчинення. Структура апоферітін, що утворюється в результаті такої процедури, застосовується як своєрідна форма. Шляхом хімічної реакції усередині неї виходить магнітне ядро діаметром 8 нм, що налічує близько 4,5 тис. атомів заліза. Сам же білок при цьому виконує роль немагнітної оболонки, причому, що важливо, магнітна частинка усередині неї нерухома. При використанні описаного підходу монодисперсність "зерен" забезпечується мало не автоматично. В даний час в NanoMagnetics працюють над наступним кроком - пошуком оптимальних методів розміщення магнітних "зерен" на плівках. Як вважають фахівці компанії, дуже добре підходять інертні силіконові гелі. Очікується, що зрештою можна буде досягти щільності запису 4,5 Тб на квадратний дюйм, а в більш дальній перспективі - до 10 Тб на квадратний дюйм [2].

Сучасні технології читання/запису на магнітних дисках базуються на використанні тонких квантових ефектів, таких як взаємодія спину електрона з магнітним полем і магнітного тунельного переходу. Ці явища лежать в основі створення клапанів спинів, в яких спостерігається так звана гігантська магніторезистивність (GMR – Giant Magneto Resistance). Зменшити розмір зони запису біта (суперпарамагнітна межа) можна за допомогою технології перпендикулярного запису [4].

Сьогодні найвища щільність запису в комерційно доступних продуктах складає 133 Gb/in<sup>2</sup>. Якщо такий темп збережеться, то до 2010 р. вона досягне значення 0,5 Tb/in<sup>2</sup>. Це значить, що на пластині 3,5 дюйма можна буде помістити 750 GB даних.



Рисунок 2 – Перспективи розвитку перпендикулярного запису

В квітні 2005 р. було повідомлення HGST про демонстраційне тестування диска з щільністю запису 230 Gb/in<sup>2</sup>. Результати тестування підтвердили величезний потенціал технології перпендикулярного магнітного запису. Результати тестування також продемонстрували особливості базової технології перпендикулярного магнітного запису, що використовує гранулярне середовище і однополюсну головку. Звичайно, для досягнення цього результату застосовувався цілий ряд нових технологій. Найбільший вплив на поліпшення продуктивності надало формування магнітного поля чіткішої геометрії за допомогою поглинання надмірних магнітних полів навколо магнітного наконечника записуючої головки. HGST використовувала такий же тип GMR-головок читання, як і в HDD з подовжнім записом. Це значить, що якщо з'являться головки читання з більшою чутливістю, то можна буде ще більше збільшити щільність запису. Теоретично подвоєння чутливості дозволяє також подвоїти щільність треків.

На міжнародній конференції з магнетизму InterMag 2005 був представлений ряд технологій, які дозволяють підвищити щільність треків і лінійну щільність запису. Однією з них є застосування в головках читання спінового клапану на базі магнітного тунельного переходу (Magnetic Tunnel Junction - MTJ).

Національний інститут індустріальних наук і технологій (AIST, Японія) спільно з компанією Anelva і поряд інших фірм продемонстрував MTJ-пристрій для використання в головках запису з магніторезистивним (MR) відношенням (зміна опору при включенні магнітного поля) 140% при кімнатній температурі і опором близько 2 Ом/мкм<sup>2</sup>, тоді як головки з цією технологією, що виготовляються американськими фірмами, мають показник всього 20% [4]. Чутливість головок росте разом з MR-відношенням, тому якщо розробку AIST вдасться реалізувати в комерційному варіанті, то можна буде, принаймні, подвоїти чутливість існуючих головок.

Тривалий час перешкодою для виробників HDD служила межа магнітної індукції магнітних матеріалів, яка становила 2,3 Тл. Одним з шляхів запису даних на магнітний шар з високою коерцитивною силою є метод теплової дії (thermal assist method). Fujitsu поставила перед собою мету досягти межі 2,7 Тл і повідомила, що вже подолала на цьому шляху межу 2,57 Тл в лабораторних умовах [4].

Тематика доповідей на InterMag 2005 включала також технології наступного покоління, серед яких найбільшу увагу привернули GMR з використанням струму з обмеженим шляхом (Confined Current Path - CCP) і середовища з дискретними треками (технологія CCP базується на наноструктурах, орієнтованих перпендикулярно до поверхні тонкоплівочного матеріалу).

Подальший прогрес в MTJ-пристроях тісно пов'язують з успіхами технології CPP GMR. Японська компанія Alps Electric збільшила MR-відношення до 11,5%, використовуючи напівметалеву технологію в закріпленому і вільному магнітних шарах в пристроях з GMR CCP-типу. Опір продемонстрованого зразка склав 80 мОм/мкм<sup>2</sup>, що значно менше, ніж у MTJ-пристроїв від AIST і інших розробників. При таких характеристиках можна виготовити HDD з високою швидкістю зчитування даних і поверхневою щільністю запису близько 200 Gb/in<sup>2</sup> і вище. Компанія Hitachi досліджувала пристрої з нанооксидними шарами, імплантованими для збільшення MR-відношення між закріпленими і вільними магнітними шарами. Виготовлений прототип головки мав значення MR 3% і опір 0,6 Ом/мкм<sup>2</sup>. Дослідники дійшли висновку, що пристрій в змозі працювати більше 200 років, зберігаючи при цьому відношення сигнал/шум 30 dB і нормальну форму зчитаного сигналу.

Ведуться також розробки по створенню магнітних середовищ з дискретними треками, в яких треки відділяються один від одного канавками, і доменів з розташуванням магнітних частинок у вигляді регулярної структури для мінімізації взаємних впливів. Так, на InterMag 2005 компанії Komag і TDK продемонстрували результати своїх зусиль по виведенню дисків з дискретними треками на ринок. Остання представила прототип 2,5-дюймового диска з

дискретними треками і ділянками для сервокерування головками. Всі дослідницькі проекти переслідують мету досягти поверхневої щільності запису 200 Gb/in<sup>2</sup>.

### Flash - пам'ять

Основним елементом флеш - комірки є транзистор з плаваючим затвором. Фактично другий затвор такого транзистора грає роль накопичувача електронів - конденсатора. Він розташований між затвором і каналом та ізолюваний від провідних зон шаром двоокису кремнію [5, 6, 7]. Вже зараз товщина ізолятора досягає 90А і за словами фахівців, максимум, який можна отримати - 80 А, а потім почнеться витік заряду. Не дивлячись на це напруга, необхідна, щоб перемістити електрони на плаваючий затвор, так велика, що при щільності розміщення комірок на рівні 45 нм, викликає серйозні перехресні наведення в процесі запису. Мікроскопічні осередки буде у край складно ізолювати один від одного. Все це вимагає нових технологій виготовлення незалежної пам'яті.

Таблиця 1.– План розвитку напівпровідникових технологій

Рік	2002	2003	2004	2005	2008	2011	2014
Масштаб (half-pitch), нм	130	120	110	100	70	50	35
Мінімальна робоча напруга Vdd, В	1,2	1,2	0,9	0,9	0,6	0,5	0,3
Комірка DRAM, кв. мкм	0,1	0,08	0,07	0,044	0,018	0,008	0,003
Час збереження DRAM, мс	250	250	250	500	500	500	500
Час зберігання енергонезалежного ЗП, років	10	10	10	10	10	10	10
Максимальна кількість циклів перезапису	100 тис.	100 тис.	100 тис.	100 тис.	100 тис.	1 млн.	1 млн.
Вартість (цент/біт)	17	11	8	5,3	1,9	0,6	0,2

### **NROM: MirrorBit**

Концепція дзеркала (Mirror) найбільш схожа по своїй схемотехніці і методиці зберігання інформації з традиційною флеш-пам'яттю. Секрет в застосуванні відразу двох методик подвоєння інформаційної ємності: MirrorBit і Multi Level Cell (MLC) [8]. Згідно MLC технології, дані кодуються за допомогою декількох рівнів заряду: 4 рівні дозволяють надійно розпізнавати два бітових значення. Підсумкова ємність  $2 \times 2 = 4$ . Таким чином, не зменшуючи розміру осередку і товщини ізолюючого шару збільшується щільність запису даних.

Розглянемо функціонування MirrorBit. Комірка NROM володіє специфічною структурою (рис. 3) [9] . Комірка представляє "сендвіч", що складається із загального

затвора, підключеного до лінії слів, і виготовлених з напівпровідників з однаковим типом носія (n) двох стоків/витоків, які під'єднуються до двох сусідніх ліній біт. У проміжку між стоками/витоками сформований тришаровий "плаваючий затвор": спочатку тонкий шар ізолюючого оксиду, потім нітрид кремнію, потім знову шар оксиду. "Плаваючий затвор" лише самими краями перекривається із зонами стоків/витоків. Щоб запрограмувати біт 1, необхідно прикласти підвищену напругу до найближчої до нього лінії біт і лінії слова.

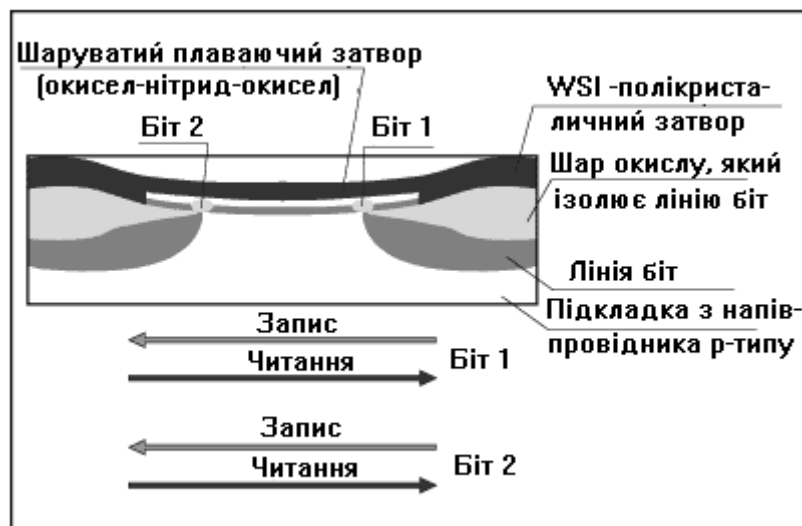


Рисунок 3 – Структура комірки NROM

Електрони, намагаючись подолати позитивне поле підкладки, концентруються на потрібній межі між підкладкою, правими стоком/витоком і відокремленим від них тонким шаром ізолятора нітридним плаваючим затвором. Найбільш високоенергетичні електрони (гарячі), одержують досить енергії, щоб проникнути крізь шар оксиду (інжекція гарячих електронів в канал або Channel Hot Electron injection (CHE)). Матеріал плаваючого затвора володіє чудовою властивістю - він сприяє локалізації заряду і перешкоджає його "розтіканню" по напівпровіднику. Це дозволило створити в плаваючому затворі окремі зони, в яких зберігаються різні заряди, що не взаємодіють між собою. Відповідно, приклавши напругу до лівих стоку/витоку і затвору, створимо ще один незалежний від першого заряд. Це і є другий біт. Читання здійснюється шляхом зміни ролей стоку і витоку: для читання першого біта невелика напруга подається на ліві стік/витік і затвор, а для детектування другого біта все робиться навпаки - під напругою правий стік/витік. Знищення зарядів проводиться шляхом подачі позитивної напруги на найближчі стік/витік і заземлення затвора, що приводить до процесу інжекції джок (Hot Hole Enhanced Tunneling - HHET) на плаваючий затвор і рекомбінації зарядів.

Технологія називається Ovonic Unified Memory (OUM), а фірма, що займається її розробкою – Ovonic. Компанія Ovonic, яка в даний час знаходиться в сумісному володінні Intel, ECD (Energy Conversion Devices) і Тайлера Лоури (Tyler Lowery), була спеціально створена для виведення OUM на ринок. Пам'ять покликана замінити не тільки EEPROM або флеш-пам'ять, але і SRAM разом з DRAM. Технологія потенційно сумісна з CMOS-процесом, що дозволить застосовувати її в логічних мікросхемах. У поточній конструкції (рис. 4) двостабільний стан осередку міняється з провідного на непровідний, але для зберігання біта використовується не плаваючий затвор модифікованого полярного транзистора, а ділянка шару, сформованого з халькогенідного сплаву (GeSbTe). Шар, а точніше тонка плівка із сплаву із змістом германію, селену і телура, розігрівається мініатюрним нагрівачем, яким керує польовий транзистор [9].

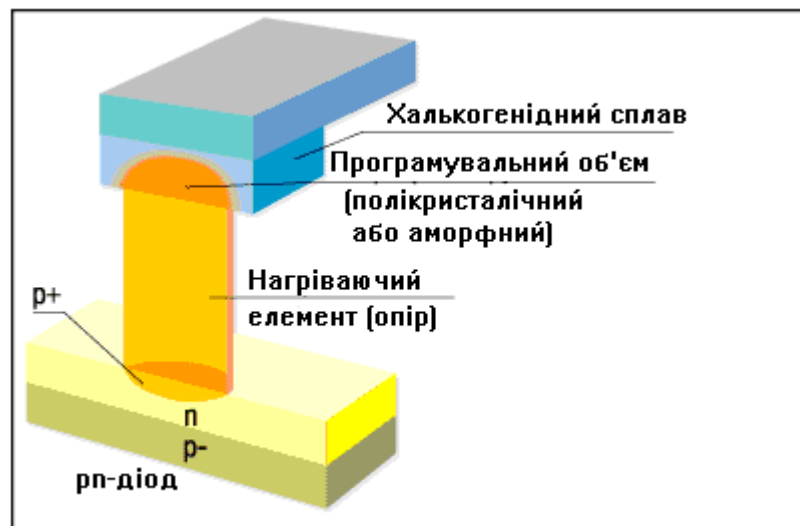


Рисунок 4 – Комірка Ovonic Unified Memory

За допомогою електричного імпульсу малої тривалості (10 нс) і великої амплітуди (1 мА) халькогенідний замінник "плаваючого затвора" вдається розігріти до 600 °С, що приводить до переходу матеріалу в аморфний стан, який відрізняється підвищеним опором. Але якщо цей же фрагмент шару витримувати при нижчій температурі у декілька разів довше, то матеріал кристалізується і переходить в "провідний стан". Перший пробний екземпляр OUM-чипа був представлений в лютому 2002 р. на конференції International Solid-State Circuits Conference. Він виготовлений за технологією 0,18 мкм, міг витримати 1012 циклів перезапису і здатний зберігати інформацію при температурі 120 °С протягом 10 років. Проектуванням мікросхеми займалися фахівці корпорації Azalea Microelectronics [9].

Зараз розглядається можливість збільшення ємності нового типу пам'яті за рахунок використання декількох рівнів провідності халькогенідної плівки. За наслідками досліджень,

опір матеріалу в провідному і непровідному станах розрізняється більш ніж в 100 разів, що залишає достатній простір для розробок.

Серед головних проблем, перешкоджаючих широкому впровадженню халькогенідних мікросхем, фахівці називають перегрів осередків при високій частоті циклів перезапису, взаємовплив осередків і високу токсичність використовуваних матеріалів.

### **FRAM: фероелектрична пам'ять**

Основою фероелектричного елемента пам'яті (Ferroelectric Random Access Memory - FRAM, FeRAM) є матеріал, здатний зберігати свій електричний дипольний момент у відсутності зовнішнього поля. Ефект обумовлений змінами структури кристалічної решітки. Ноу-хау технології - рухомі атоми, що міняють своє місцеположення в ґратах, що додає кристалам матеріалу властивості диполя (рис. 5). В якості субстанції, що запам'ятовує, в FRAM використовують сплави свинцю, цирконію і титану (PZT) або з'єднання  $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$  (SBT) [9]. У середині таких матеріалів утворюються домени, що включають безліч окремих диполів. У середині домену всі диполі завдяки взаємовпливу орієнтуються в одному напрямку, що і відрізняє один домен від іншого. Приклавши зовнішнє електричне поле - і диполі, що попали під його вплив, зорієнтуються уздовж його силових ліній. Завдяки ефекту "пам'яті" (рухомому атому) після відключення поля диполі зберігатимуть додану їм орієнтацію. Так проводиться запис.

Щоб зчитувати інформацію з осередку, необхідно прикласти до нього меншу напругу, але таким же чином, як це було зроблено при запису. Якщо полярність електричного поля читання буде такою ж, як і при запису, то на лінії біт, підключеній до осередку, з'явиться невеликий електричний імпульс. У випадку, якщо прикладена напруга змусить диполі змінити свою орієнтацію, то вихідний імпульс на лінії біт буде більшим унаслідок зміни свого місцеположення "блукаючим" атомом. Після закінчення операції стан осередку буде змінений, тому кожен цикл читання повинен включати цикл перезапису. Перемикання диполя відбувається за час, менший 1 нс, а загальний час доступу дорівнює сьогодні 70 нс (за інформацією компанії Ramtron) [9]. Відмінність між "нормальним імпульсом" і "імпульсом перемикання" дуже мала, детектувати його досить проблематично.



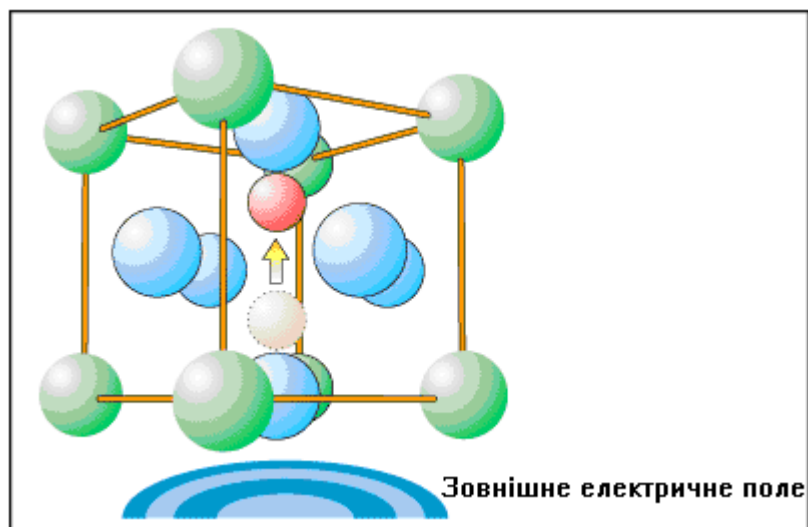


Рисунок 5 – Утворення домену фероелектричного елемента пам'яті

Переваги FRAM в порівнянні з будь-якими різновидами традиційної флеш-пам'яті величезні: енергетично менш ємка схемотехніка, великий ресурс циклів перезапису і висока швидкість перезапису, стабільність, стійкість пам'яті до коливань напруги живлення. Фероелектрична пам'ять повністю сумісна по кількості виробничих етапів із стандартною CMOS-технологією. Велика кількість робочих циклів дозволила FRAM претендувати на місце SRAM.

### **MRAM: магніторезистивна пам'ять**

По своїх характеристиках MRAM є прямим конкурентом FRAM і має високу швидкість запису (менше 50 нс) і зчитування, необмежену кількість циклів перезапису. Принцип її дії ґрунтується на зміні напрямку намагніченості феромагнетика, що впливає на електричний опір спеціально сформованої структури. По властивостях феромагнетик аналогічний фероелектрику: атоми його кристалічної решітки зберігають напрям магнітного моменту, доданий зовнішнім полем, і після виключення останнього. В ролі датчика виступає якнайтонша плівка (1,5 нм) діелектрика, що розділяє два намагнічені електроди. Під дією магнітного поля плівка придбає властивості тунельного магнітного переходу (Magnetic Tunnel Junction - MTJ). Якщо магнітні поля феромагнітних електродів будуть антипаралельними, то опір MTJ виявиться високим, а якщо електроди намагнітяться паралельно один одному, то опір плівки зменшиться. Електроніка фіксує зміну опору запам'ятовуючої комірки.

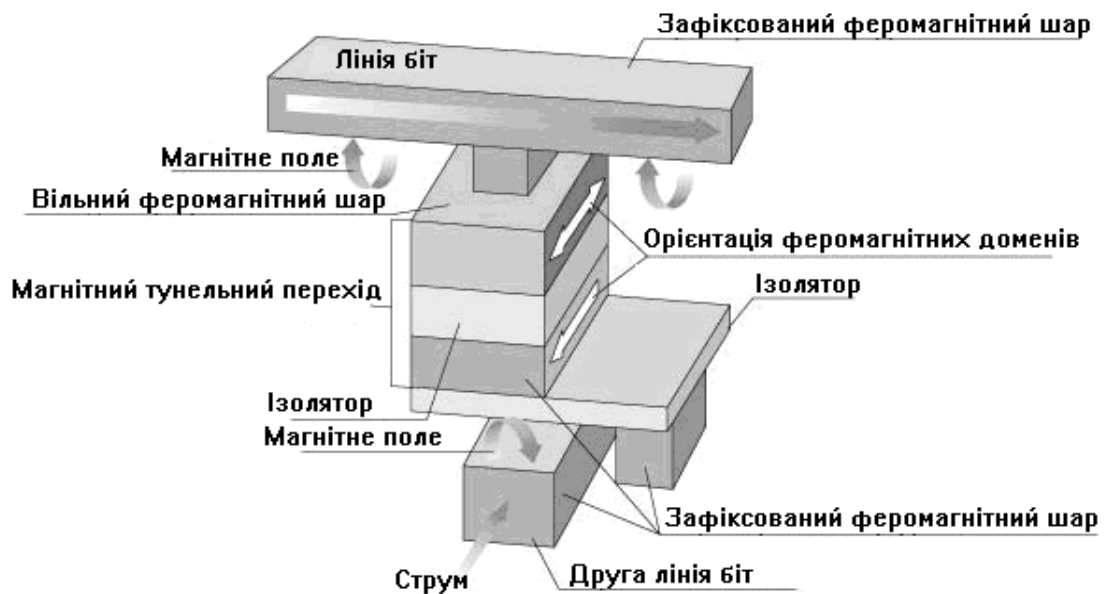


Рисунок 6 – Елемент пам'яті MRAM

Розробками у області MRAM займаються переважно Honeywell (дослідження у військовій сфері, ініційовані у зв'язку із стійкістю магніторезистивної пам'яті до електромагнітного імпульсу ядерного вибуху) і Motorola, що підшукує заміну традиційним видам незалежної пам'яті для своїх мобільних телефонів [10].

Стандартні чипи MRAM містять два перпендикулярні набори електродів, між якими "затиснуті" запам'ятовуючі комірки (рис. 6). Перепрограмування відбувається шляхом подачі напруги на два перпендикулярні електроди, на перетині яких знаходиться необхідна комірка.

Проект по вивченню магніторезистивного ефекту також здійснює ІВМ. Прикладаючи зовнішнє магнітне поле певної напруженості (меншої, ніж потрібна, щоб усунути залишкову намагніченість одного з електродів, але достатньої для перемагнічування іншого), можна змінити магнітний момент лише одного електроду.

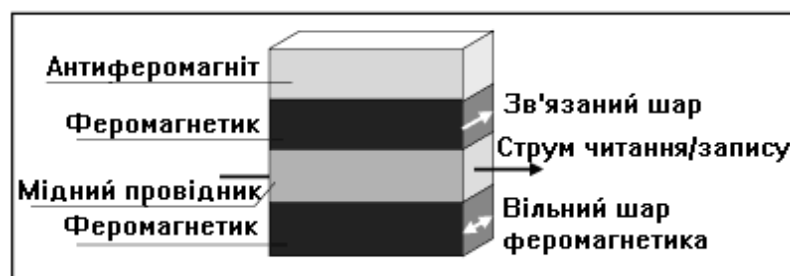


Рисунок 7 – Елемент пам'яті на магніторезистивному ефекту корпорація ІВМ

Але фахівці корпорації пішли далі: вони застосували підмагнічування одного з електродів за допомогою антиферомагнетика (рис. 7), який стійкий до дій зовнішнього магнітного поля [10]. У Almaden Research Center експериментували з різними конфігураціями MTJ і дійшли висновку, що навіть нанесення товстого шару неферомагнітного металу між електродами і тунельним шаром (напилена якнайтонша плівка алюмінію, яка окислюється під впливом плазми) не впливає на величину ефекту (спостерігалася зміна опору на 29%). Також вдалося з'ясувати, що тунельний магніторезистивний ефект не залежить від площі тунельного з'єднання.

Перевага MRAM - висока швидкість зчитування і перезапису (декілька десятків нс). Магніторезистивна пам'ять, не дивлячись на більший розмір комірки, потенційно здатна забезпечити вищу, ніж традиційна флеш-технологія, щільність комірок за рахунок відсутності на чипі генератора під заряджання, який необхідний був для створення високої напруги для перепрограмування флеш-комірок. MRAM має неймовірну зносостійкість - стендові зразки пройшли 10 млрд. робочих циклів, не виявивши ознак погіршення характеристик.

NVE Corporation використовує особливості спітроніки (spintronics), яка ґрунтується на ефектах спінів електронів, точно так, як і в оптиці експлуатується поляризація фотонів. Корпорація створила матеріал Giant Magnetoresister (GMR), який змінює свій електричний опір під впливом зовнішнього магнітного поля [10].

В ході експериментів, проведених у Франції ще в 1988 р., вдалося з'ясувати, що відсоток носіїв струму, розсіяних атомами провідного феромагнетика, залежить від орієнтації спіну електронів і напрямку намагніченості провідника. Якщо сконструювати "бутерброд" з якнайтоншого провідного немагнітного шару і двох феромагнетиків, то при їх паралельній намагніченості розсіюватися будуть електрони тільки з однією з двох можливих орієнтацій спіну. Такий стан відповідає низькому опору комірки. Але додавши феромагнетикам взаємно перпендикулярну орієнтацію векторів намагніченості, вдасться підвищити ймовірність розсіювання для всіх без виключення електронів. Опір повинен вирости в два рази.

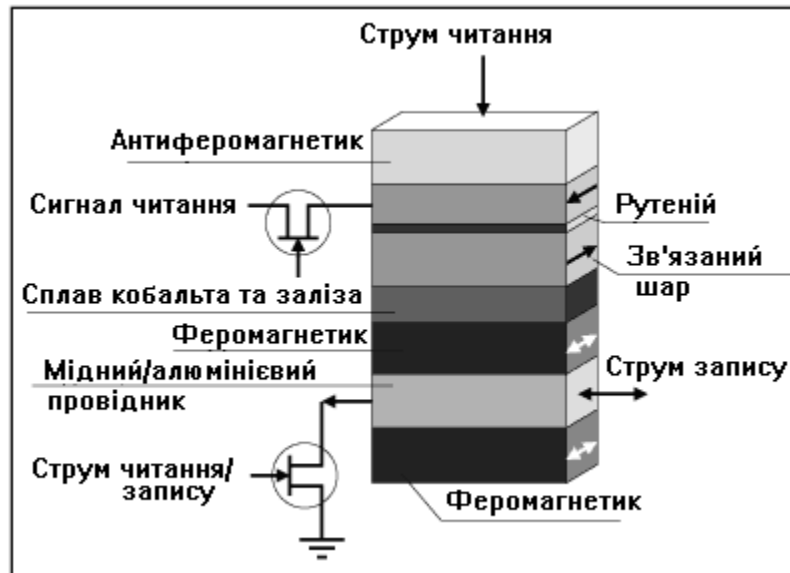


Рисунок 8 – Елемент пам'яті на магніторезистивному ефекту NVE Corporation

Фахівці NVE доводять, що конструкція осередку за версією IBM теж не дуже хороша, оскільки, починаючи з певного масштабу, поле антиферромагнетика впливатиме на обидва магнітних шару МТJ. Проблема розв'язується за допомогою штучного тришарового антиферромагнетика: два магнітних кобальтово-залізних шару і рутенієвий прошарок між ними (рис. 8). Штучний ферромагнетик відокремлений від осередку якнайтоншим тунельним бар'єром, а з іншого боку на нього нанесений шар природного антиферромагнетика.

Перевага синтетичного матеріалу - в низькій напруженості зовнішніх побічних магнітних полів. Програмується конструкція пропусканням струму у вертикальному напрямку і так само зчитується. Товщина немагнітних шарів не перевищує 1,5 нм, що дозволяє виявитися ефекту підмагнічування антиферромагнетиком, який перетворює два ферромагнетики на жорстко зв'язану структуру. Накладенням зовнішнього магнітного поля можна подолати силу підмагнічування і перемкнути комірку у ферромагнітний стан з низьким опором.

Ще один цікавий варіант – вертикальні GMR-комірки циліндрової форми (Vertical Ring GMR Cell) [10]. Циліндр утворюється з кільця м'яких і жорстких ферромагнетиків, що чергуються (рис. 9), і це означає, що можна перемагнітити м'який ферромагнетик перш, ніж змінить свій стан жорсткий. В цілому така конструкція, не дивлячись на знижений опір (порівняно із звичайною коміркою), забезпечує кращу різницю в провідності між станами з паралельно і антипаралельно намагніченими шарами. Крім того, циліндрова форма дозволила звести нанівець виникнення паразитних магнітних завихрень, що ускладнюють проектування чипів магнітної пам'яті високої щільності.

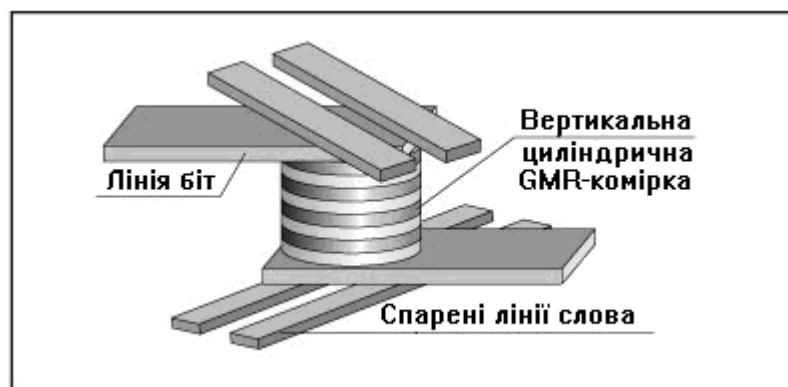


Рисунок 9 – Елемент пам'яті на вертикальній GMR-комірці циліндрової форми

Енергія теплових коливань при певному розмірі комірки викликає нестабільність її магнітного стану. Змінити намагніченість шару феромагнетика, який підмагнічується антиферомагнетиком, практично нереально в звичайних умовах. Але якщо нагрівати антиферомагнетик вище за точку Неєля, то він втратить свої магнітні властивості і переорієнтація магнітного моменту феромагнітного шару стане можливою. Потім антиферомагнетик остигне і зв'яже феромагнетик вже в новому стані, не дозволяючи йому "перемкнутися" під впливом теплових коливань. Фахівці NVE спеціально нагрівали комірки перед записом даних, що дозволило реалізувати ідею на практиці - час перемикання склав всього 3 нс.

### PMC: Programmable Metallization Cell

У технології PMC використовуються халькогенідні сплави, які використовуються в якості твердого носія для інжектіваних атомів срібла. Якщо прикласти електричне поле до комірки, що містить таку суміш, то іонізовані атоми срібла поведуться подібно до іонів в рідкому електроліті акумулятора (рис. 10). Срібло почне мігрувати від одного електроду до іншого, створивши провідні ланцюжки. Як тільки вони сформуються і замкнуть електроди, опір комірки різко впаде. Щоб зруйнувати ланцюжки (операція перепрограмування), необхідно прикласти напругу іншої полярності. Наука, що вивчає подібні речі, називається Solid State Ionics, а технологія PMC є спільна робота групи учених з Державного університету Арізони і компанії Axon Technologies [10]. Процес формування ланцюжка триває менше 10 нс (швидкість перезапису), опір змінюється в  $10^7$  разів, а максимальна кількість циклів перезапису досягає  $10^{13}$ , що перевищує по "стійкості" DRAM. Швидкодія обумовлена незвичайно високою швидкістю переміщення іонів срібла - 1 м/с. У реальному осередку іон повинен подолати відстань завдовжки всього 1 нм, що він робить менш ніж за 1 нс. Теоретично осередок PMC можна масштабувати аж до 50 нм. Робоча напруга перезапису

залежно від використаних матеріалів змінюється від 0,18 до 3,2 В при струмах від 1 до 10 мкА.

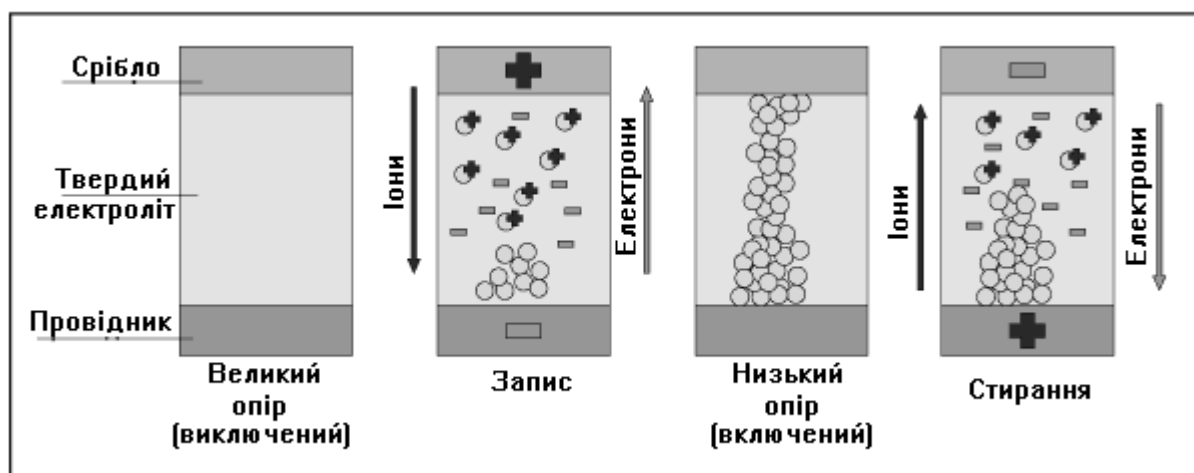


Рисунок 10 – Особливості роботи РМС комірки пам'яті

Особливістю осередку є її саморегуляція під час запису: іонні ланцюжки починають шикуватися, як тільки напруга в ній перевищить певний поріг, причому процес носить лавиноподібний характер. Але коли провідні ланцюжки сформувалися, напруга миттєво падає, оскільки знижується опір осередку.

Експериментуючи з одержаними пристроями, вчені дійшли висновку, що технологія РМС буквально створена для реалізації складних багаторівневих осередків (MLC), які здатні запам'ятовувати відразу декілька біт. Адже кінцевий опір осередку залежить від сили струму, прикладеної під час програмування. Тому, змінюючи струм запису, можна занести в осередок до 8 різних значень. Конструкція осередку РМС така компактна, що її площа не перевищує чотирьох площ мінімального елемента (minimum feature size) при відтворенні на літографічному устаткуванні. Існує реальна можливість створення осередків розміром всього в дві площі мінімального елемента. При 90-нанометровому процесі і двох бітах на осередок питома ємність чипа РМС складе 6,2 Gb на один квадратний сантиметр [10].

### Нанокристалічна флеш-пам'ять

Ця пам'ять по своїй архітектурі не відрізняється від звичайної флеш-пам'яті. Єдине, що виділяє її серед подібних технологій, - використання мікроскопічних (5-10 нм) кристалів кремнію в якості накопичувача електронів (плаваючого затвора). Шар нанокристалів формується між двома шарами оксиду кремнію, а потім на верхній шар оксиду наносяться транзистори, які керують комірками.

Перевага нанокристалів - в їх відособленості, що дозволяє позбавитись проблеми локальних дефектів в шарі оксиду кремнію. Потенційний рівень енергії електронів,

захоплених нанокристалом, робить практично неможливим витік заряду з плаваючого затвору, що відкриває шлях для подальшого зниження товщини ізолюючого шару між плаваючим затвором, каналом транзистора і стоком/витоком. При такому тонкому ізоляторі замість енергоємного СНЕ-процесу для транспортування носіїв заряду на плаваючу базу можна скористатися квантовим тунельним ефектом. Це дозволяє зменшити розмір комірки і понизити напругу при програмуванні до 3-4 В. У свою чергу, така зміна напруги і відмова від методу інжектування гарячих електронів зменшують "знос" комірки, яка тепер витримує мільйони циклів перезапису (замість тисяч) [10]. Новий тип пам'яті має відмінну стійкість до радіації. На сьогодні технологія нанокристалічної флеш-пам'яті є найбільш перспективною для отримання максимальної щільності запису даних.

Вивчивши нанокристали, учені дійшли висновку про можливість локалізації в кристалі одного-єдиного електрона. Малі розміри кристала не дозволяють поляризаційним полям екранувати поле єдиного носія заряду. Щоб помістити додатковий електрон в нанокристал, необхідно подолати силу кулонівського відштовхування, яка визначає напругу запису. В майбутньому така пам'ять працюватиме за принципом "1 біт - 1 електрон". Регулюючи напругу запису, можна змінювати кількість електронів, які "поміщаються" в нанокристал. При таких малих масштабах для того, щоб єдиний електрон (quantum dot) міг впливати на провідність каналу транзистора, його, канал, необхідно звужити до відповідних розмірів. Перший пристрій мав довжину каналу 10 нм, а плаваюча база мала розмір 7 нм [10].

### Оптичні запам'ятовуючі диски

Будь-який оптичний диск містить інформацію у вигляді темних і світлих ділянок на дзеркальній поверхні, захищеній шаром полікарбонату. Нанести їх можна різними способами: надрукувати за допомогою фотолітографії, як в штампованих дисках, випалити лазером, як в DVD+/-R або CD-R дисках, або змінити прозорість самого полікарбонату, як в DVD+/-RW або CD-RW. Щільність запису на диск визначається мінімальним розміром точки. Оптичні диски стійкі до фізичних дій і не схильні до впливу магнітних полів. Завдяки прозорості захисного шару дані успішно зчитуються навіть при значних пошкодженнях поверхні, і інформація втрачається лише при руйнуванні амальгами. Такі носії легко виготовляються і коштують дешево.

Підвищення щільності запису інформації в оптичних запам'ятовуючих пристроях досягається в основному за рахунок зменшення довжини хвилі лазерного випромінювання,

підвищення розрізняючої здібності оптичної системи, використання ефективніших систем представлення інформації.

Розроблен метод фокусування зчитуючого променя лінзою із затемненою центральною частиною фокусуєчою лінзи [11]. Затемнення центральної частини лінзи приводить до значного звуження ширини центральної плями сфокусованого променя, що дозволяє збільшити розрізняючу здатність оптичної системи. Тому такий метод читання і запису одержав назву методу супердозволу (MSP). Разом з тим, аподизація центральної частини лінзи приводить до виникнення кілець Ньютонів в сфокусованому промені. Позбавлення сигналу від кілець проводиться за допомогою вирівнюючих ланок радіотехнічними методами. Використання MSP дозволяє зменшити величину піт і відстань між доріжками на десятки відсотків по відношенню до звичайних методів запису при збереженні якості зчитаного сигналу. Розроблений метод знайшов також застосування і в магнітооптичних методах запису .

Істотне збільшення щільності запису інформації може забезпечити новий метод представлення інформації на носії [11]. У загальноприйнятих методах кодування сигналу всі піти і відстані між ними мають декілька фіксованих розмірів (кратних мінімальному кроку  $l$ ). Кожний піт і відстань між ними можуть мінятися від мінімального ( $L_{min}$ ) до максимального ( $L_{max}$ ) значення. При цьому їх місцеположення на диску залежить від конкретного запису, а інформаційне значення визначається тільки завдовжки піта. Новий метод кодування інформації - метод незалежного запису країв - заснований на закріпленні за кожним піт фіксованого місця на диску (рис. 11). Кожен піт може мати  $l$  фіксованих точок початку і  $l$  фіксованих точок кінця піта. Загальна кількість станів піта рівна  $l^2$ . При цьому дискретність кроку зміни початку піта і кінця піта не прив'язуються до розміру зчитуючого променя. До цього розміру прив'язується тільки мінімально можлива відстань між початком і кінцем піта і відстань між ними. Такий підхід максимально враховує особливості оптичного методу зчитування інформації і при зменшенні кроку  $l$ , і відповідно збільшенні  $l$ , дозволяє істотно збільшити щільність запису інформації. Обмеження на щільність запису при використанні цього методу накладається: 1) досяжною точністю нанесення країв піта на диск, 2) шумами сигналу, 3) можливостями систем стеження за доріжкою і фокусування променя. Щільності запису досягає 0,26 мкм/біт при довжині хвилі 780 нм і числовій апертурі лінзи 0,45, що в три рази вище, ніж на звичайних компакт-дисках.



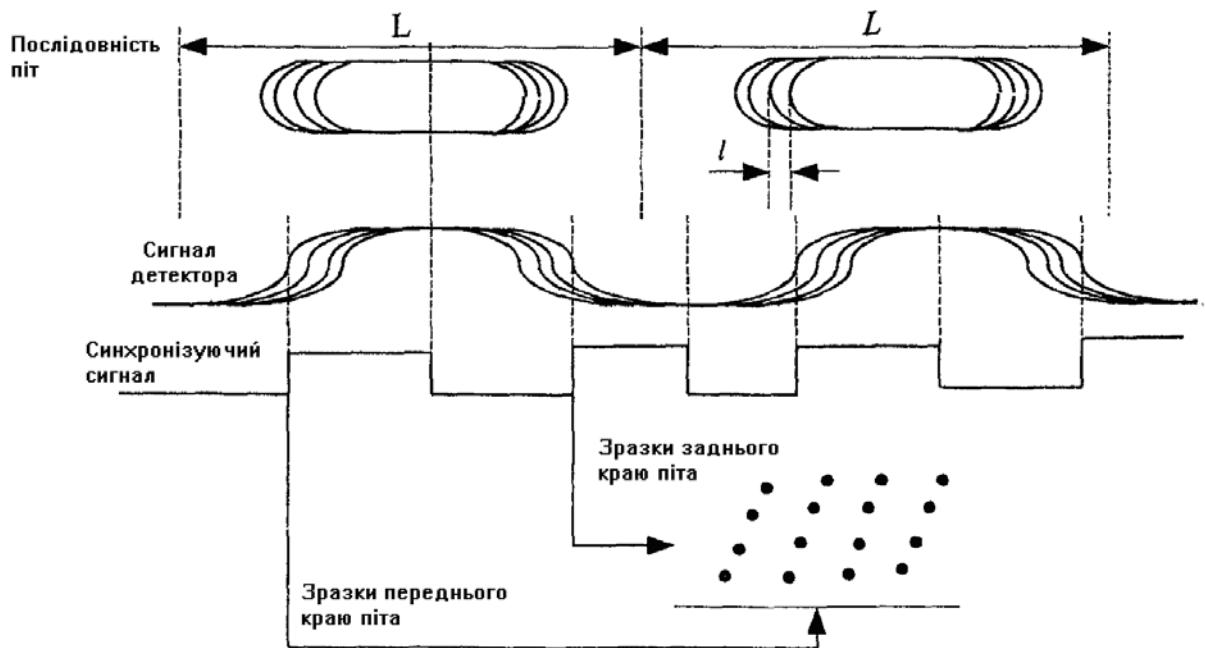


Рисунок 11.– Принципова схема методу незалежного запису країв піта при  $n = 4$

Щільність запису інформації стандартними оптичними методами нанесення інформації на поверхню носія лазерним променем, сфокусованим далеко розташованою лінзою, може бути поліпшена шляхом подальшого зменшення довжини хвилі лазерного випромінювання (переходом до блакитних лазерів з довжиною хвилі 400 нм) і подальшим збільшенням числової апертури лінзи. Перехід до лінз з числовими апертурами  $A > 0,8$  потребує зміни методу детектування сигналу і розробки надточних систем стеження за доріжкою запису і фокусуванням променя. Рішення проблеми лазерних джерел блакитного світла і систем стеження за доріжкою дозволить збільшити ємність компакт-диску ще приблизно в п'ять разів. Таким чином гранично досяжна ємність стандартних компакт-дисків буде приблизно 15 Гбайт.

Зростання щільності запису інформації при використанні стандартних оптичних методів стримується подоланням дифракційної межі при фокусуванні лазерного променя в процесі запису або зчитування інформації. Подальше збільшення ємності компакт-диска можливе тільки нетрадиційними методами. Найперспективнішими з них є зондові і ближньопольові методи запису [11].

В даний час для запису інформації пропонується використовувати методи ближньозондової мікроскопії, які дозволяють досягти щільності запису 30 Гбіт/см<sup>2</sup>. Для запису інформації можуть застосовуватися методи атомної силової мікроскопії, тунельної мікроскопії. Для того, щоб ці методи мали реальну можливість для застосування в інформаційних технологіях, вони повинні володіти певними властивостями: 1) забезпечувати швидкі запис і зчитування інформації (швидкість не менше 2 Мбайт/с), 2) забезпечувати

високу надійність зчитування і запису, 3) забезпечувати зчитування з високим відношенням сигнал/шум, 4) володіти простотою запису і зчитування інформації.

Не дивлячись на ті величезні можливості, які обіцяє застосування зондової мікроскопії у області оптичних методів запису і зчитування інформації, і ті величезні багаторічні зусилля по впровадженню зондової мікроскопії в інформаційну індустрію, існує ряд принципових особливостей, характерних для цих методів, які затримують їх широке впровадження: 1) мала швидкість запису ( $< 50$  Кбіт/с) і зчитування інформації ( $< 500$  Кбіт/с), 2) швидкий знос зонда, 3) труднощі позиціювання з точністю до одиниць нанометрів при відстанях в декілька десятків сантиметрів.

Запис і зчитування інформації методом атомної силової мікроскопії проводиться в контактному режимі, коли мікрозонд знаходиться в механічному контакті з поверхнею, на якій відбувається запис інформації. При цьому швидкість запису і зчитування обмежується фізичним зносом зонда і поверхні, резонансними частотами зонда, температурними режимами. При використанні для запису інформації полімерної плівки, розігрітої сфокусованим променем лазера, вдалося записувати і зчитувати піти з мінімальними розмірами  $100$  нм і з максимальною частотою передачі даних  $100$  кГц. Параметри термомеханічних методів запису інформації визначаються розмірами вістря зонда, силою тиску зонда на поверхню, потужністю лазера і точністю поєднання центру лазерного променя з положенням вістря зонда. Остання умова вимагає того, щоб концентрація лазерного променя у фокусі була зосереджена в об'ємі  $1$  мкм<sup>3</sup>, який би укладав в себе і вістря зонда. Це істотний недолік методу. Крім того, для уникнення сильного зносу зонда в цьому методі потрібний, щоб його тиск на поверхню не перевищував  $1$  мкН.

На практиці методом атомної силової мікроскопії досягнуті максимальні швидкості зчитування і запису  $500$  Кбіт/с, що явно не задовольняє сучасним вимогам. Для практичного застосування цих методів в інформаційних технологіях необхідний пошук принципово нових технічних рішень.

Запис і зчитування інформації методами, які використовуються в тунельному мікроскопі, подібні методам реєстрації інформації в атомному тунельному мікроскопі, який працює в неконтактному режимі. Між поверхнею зонда і диска створюється постійна напруга. Зонд наближають до досліджуваної поверхні до виникнення тунельного струму. Наближаючи або видаляючи зонд можна регулювати рівень тунельного струму. Для дослідження поверхні зонд сканує над нею в режимі постійного струму, а датчики положення зонда знімають рельєф дослідженої поверхні. При цьому немає необхідності у вібрації зонда, а область струму обмежується тільки самим кінчиком зонда. В процесі запису інформації відбувається локальне розігрівання поверхні реєструючого середовища носія

інформації. Найбільш перспективними матеріалами для запису інформації є магнітооптичні середовища і середовища з фазовими переходами "скло  $\rightleftharpoons$  кристал".

Як показали дослідження, термічний і термомагнітний методи запису мають високий степінь надійності і, отже, можуть використовуватися при запису інформації. Проте запис, що використовує розігрівання струмом, включає дуже повільні процеси і, отже, швидкість запису буде низька ( $f < 50$  кГц). До того ж термічний запис створює рельєф з нерівностями, розміри яких порівнянні з відстанню від зонда до поверхні, що створює істотні труднощі в швидкому зчитуванні інформації і приводить до великої ймовірності механічного контакту між зондом і підкладкою. Наявність напруги між ними (можливість короткого замикання при випадкових контактах зонда з поверхнею) і велика відносна швидкість руху приводять до швидкого фізичного зносу зонда і великої ймовірності псування інформації при її зчитуванні. Крім того, при заданій нарузі між зондом і поверхнею, тунельний струм має експоненціальну залежність як функція відстані між ними. Отже, тунельний струм дуже чутливий до цієї відстані і малі його зміни приведуть до значної зміни струму. При зчитуванні сигналу це може привести до високого рівня шумів.

При запису інформації зондовими методами немає принципових обмежень на поверхневу щільність запису окрім розмірів атомів і термодинамічної та динамічної стабільності мікрорельєфу поверхні. Розроблено ряд технологій для запису інформації зондовими методами. Але не дивлячись на це, поки всі вони по тому або іншому параметру не задовольняють існуючим технічним вимогам до методів запису і зчитування інформації. Основними недоліками методу є: 1) невисока швидкість зчитування, обумовлена власними механічними коливаннями зонда, механічними пошкодженнями, що виникають при швидкому ковзанні зонда по поверхні, труднощами швидкого позиціонування зонда при русі над поверхнею з виступами, 2) невисока швидкість запису, обумовлена, в основному, повільним розігріванням поверхні диска і повільним охолодженням зонда, 3) швидкий фізичний знос зонда через постійні або випадкові його контакти з підкладкою.

Метод ближньопольової оптичної мікроскопії є одним з найперспективніших інструментів при створенні носіїв інформації з щільністю запису інформації більше  $10$  Гбайт/см<sup>2</sup> [11]. Основна ідея цього методу полягає в створенні мініатюрного зонда (витягнуте металізоване оптоволокно з наноапертурою на кінчику вістря), вістря якого набагато менше  $\lambda/2$  і який міг би концентрувати і передавати на датчик електромагнітну енергію з околиці вістря і не реагувати на поля з інших областей поверхні. Вістря зонда підноситься до досліджуваної поверхні на малу відстань (менше розміру вістря зонда) і утримується на постійній відстані. Постійність відстані між зондом і поверхнею може підтримуватися як оптичними методами, так і методами атомної силової і тунельної

мікроскопії (АСМ- і ТМ – методи відповідно). При цьому, для розв'язки процесів контролю положення зонда і оптичного процесу запису інформації, для контролю положення зонда краще використовувати не оптичні АСМ– і ТМ–методи. Область між зондом і поверхнею збуджується когерентним лазерним променем. Унаслідок зміни електромагнітних властивостей досліджуваної поверхні змінюються параметри збуджуваній на апертурі діафрагми електромагнітного поля. Із-за малості апертури діафрагми і відстані від кінчика зонда до сканованої поверхні величину полів на апертурі визначає мала ділянка сканованої поверхні. Отже, розрізняюча здатність скануючих зондових ближньопольових мікроскопів визначається величиною апертури діафрагми і відстанню до досліджуваної поверхні. При відстанях менших діаметру апертури розрізняюча здатність такого мікроскопа приблизно рівна лінійному розміру апертури. Унаслідок малості діафрагми (в порівнянні з довжиною хвилі) в ближньопольових методах тільки дуже мала частина енергії випромінюється в зовнішній простір (або проникає і розповсюджується в оптоволокну зонда) і може бути згодом виміряна фотодетектором. Із-за малості сигналу і із-за розповсюдження електромагнітного сигналу на великі відстані і появи внаслідок цього фонових завад існують проблеми з отриманням якісного сигналу фотодетектора.

Метод ближньопольової мікроскопії має ряд недоліків, що ускладнює їх застосування для запису інформації. Оскільки електромагнітна взаємодія за своєю природою є далекодіючим, то віддалені від апертури джерела, вносячи завади, погіршують розрізняючу здатність цього методу. Крім того відомо, що величина електромагнітного поля різко збільшується в місцях гострих виступів (унаслідок сингулярної поведінки на гострому краю). Тому малі об'єкти з гострими краями можуть впливати на сигнал фотодетектора сильніше, ніж великий об'єкт, але з плавно змінною межею. Ще одним істотним недоліком цього методу є мала величина передавальної функції об'єктиву ближньопольового мікроскопа. Мала передавальна функція приводить до слабкого корисного сигналу, а значить, до слабкоконтрастного зображення з великим відношенням сигнал/шум. Крім того, мала передавальна функція вимагає джерела світла великої потужності для досягнення необхідних теплових режимів на зразку.

В даний час існує два основних напрями розробки цього методу: 1) запис під розплавленням підкладки з подальшим фазовим переходом "скло  $\rightleftharpoons$  кристал"; 2) магнітооптичний підхід, при якому метод скануючої ближньопольової мікроскопії (СБОМ) використовується для розігрівання магнітної підкладки до температур, близьких до температури Кюрі, і для зчитування записаного сигналу магнітооптичними (МО) методами.

При запису інформації з використанням фазового переходу "скло  $\leftrightarrow$  кристал" використовуються тонкі аморфні плівки (наприклад, аморфна плівка Ge<sub>2</sub> 802X65) товщиною десятки нанометрів [11]. Реєструючий шар повинен бути захищений зверху від механічної і хімічної дії дуже тонкої (~ 10 нм), але механічно міцної і хімічно стійкою плівкою (наприклад, плівка ZnS SiO<sub>2</sub> товщиною 20 нм). Для додання всій структурі певних механічних і теплових властивостей її утворюють з декількох підшарів (як підшар використовують плівку ZnS-SiO<sub>2</sub> товщиною 150 нм). Дослідження структури поверхні з нанесеними на неї пітами показали, що сигнал від піта обумовлений не тільки зміною властивостей речовини підкладки, але і зміною форми поверхні. Хоча зміна форми поверхні і збільшує амплітуду сигналу, для зондових методів запису вона є негативним чинником, оскільки істотно ускладнює швидке сканування зонда щодо поверхні в режимі зчитування інформації. Отже, для розвитку цього методу потрібні подальші пошуки нових матеріалів і технологій для усунення зміни рельєфу поверхні при нанесенні інформації ближньопольовими методами із зміною фази матеріалу реєструючого середовища.

Реєстрація інформації МО-методами дуже чутлива до передавальної функції мікроскопа із-за малих кутів ( $< 1^0$ ) повороту площини поляризації, викликаних ефектами Кера або Фарадея. Внаслідок цього і малій передавальній функції ближньопольових мікроскопів для МО-методів дуже важлива оптимальна конструкція установки.

Вирішити проблему боротьби з утворенням рельєфної поверхні можна переходом від фазового методу запису інформації до магнітооптичних методів. Тоді, при плоскій поверхні запису, проблему швидкого сканування поверхні можна вирішити, використовуючи для сканування плаваючу головку по аналогії з технологіями, розробленими для магнітних методів запису.

Ідеї магнітооптичного запису були покладені в основу сучасних розробок фірми Terastore [11]. Оптична плаваюча головка, розроблена цією фірмою, утворює платформу для монтування твердотільної імерсійної лінзи і мініатюрного соленоїда. Завдяки аеродинамічним властивостям плаваючої головки, вона під час обертання диска розташовується на відстанях в десяті долі довжини хвилі від його поверхні. Безперервний лазерний промінь з довжиною хвилі 0,685 мкм розігріває поверхню диска до температури Кюрі. Для досягнення однотактового режиму перезапису інформації керування процесом запису здійснюється за допомогою перемикачів напруги струму соленоїда. Різнопольні струми соленоїда створюють на поверхні диска магнітне поле з протилежною нормальною компонентою. Оскільки розмір розігрітої частини диска рівний розміру лазерного променя, то на поверхні диску утворюються мініатюрні домени – біти записаної інформації. Зчитування інформації проводиться тією ж оптичною головкою магнітооптичними методами

при значно меншій потужності лазерного променя. В результаті розвитку цієї технології фірма Terastore оголосила про виробництво односторонніх дисководів для знімних перезаписуємих магнітооптичних дисків і самих дисків ємністю 10 і 20 Гбайт.

Таблиця 2 – Технічні характеристики магнітооптичних дисків фірми Terastore

Ємність	10 Гбайт	20 Гбайт
Діаметр	5,25 дюйм	5,25 дюйм
Час доступу	< 18мс	<18мс
Максимальна швидкість передачі даних: зовнішня внутрішня	> 6 Мбайт/с 40 Мбайт/с	> 11 Мбайт/с 40 Мбайт/с
Контролер	Ultra SCSI	Ultra SCSI

Використовувані оптичні носії - CD і DVD - базуються на червоних лазерах з довжиною хвилі 789 і 650 нм відповідно. Щоб збільшити ємність диска але зберегти його невеликий розмір, необхідно застосовувати короткохвильові лазери. Нові стандарти - Blu-ray і HD DVD – передбачають перехід на випромінювання з довжиною хвилі 405 нм, що знаходиться в блакитному секторі спектру.

Таблиця 3. – Параметри різних стандартів CD і DVD

Параметри	DVD	HD-DVD	BD	CD	FMD
Ємність на шар, GB	4,7	15	25	0,7	4,2
Товщина диску, мм	0,6 +0,6	0,6 +0,6	1,1 + 0,1	0,6+0,11	0,6+2,75
Кількість шарів (на кожній стороні)	2	2	2	1	12
Довжина хвилі лазера, нм	650	405	405	780	532
Цифрова апертура	0,6	0,65	0,85	0,45	
Необхідність в картриджі	Ні	Ні	Не завжди	Ні	Ні
Необхідність в контролі нахилу диску	Ні	Так	Не завжди	Ні	Ні

Специфікація HD DVD-ROM у версії 1.0 з'явилась в червні 2004 року [12]. Диски HD DVD-ROM мають ємність 15 GB на шар, таким чином, односторонній двошаровий носій здатний вміщати 30 GB. Такі ж показники мають заготовки HD DVD-R і HD DVD-R DL. Зате перезаписуємі HD DVD-RW дозволяють зберігати 20 GB на одній стороні. Розробку сімейства специфікацій HD DVD ведуть спільно NEC і Toshiba. Його найважливішою перевагою є те, що в дисках використовується захисний шар товщиною 0,6 мм, такий же, як і в звичайних DVD. Завдяки цьому оптична система головки HD DVD майже не відрізняється від DVD, тобто простіше забезпечити сумісність нових приводів з носіями обох типів. За планами NEC і Toshiba перші комерційні продукти будуть випущені в кінці 2005 року [12, 13].

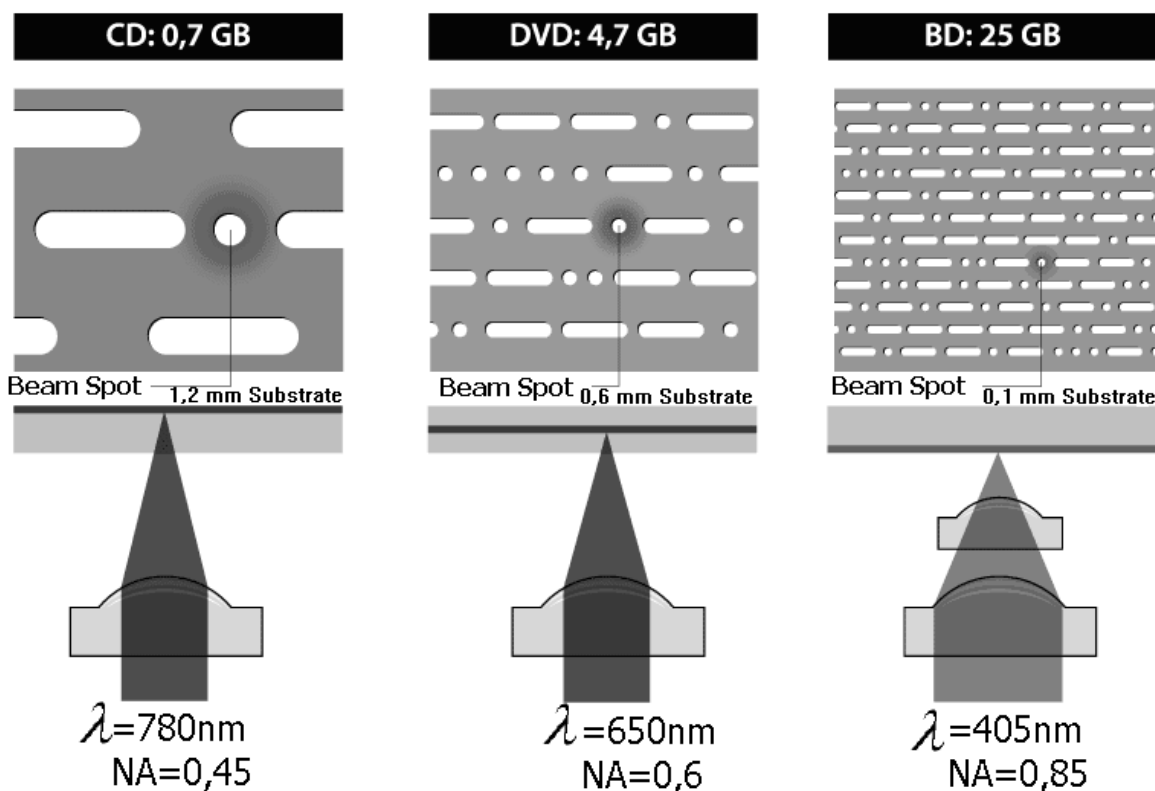


Рисунок 12. – З появою чергового покоління оптичних носіїв довжина хвилі стає коротшою, збільшується числова апертура (NA) і зменшується товщина захисного покриття

Оригінальне рішення недавно запропонувала Toshiba сумісно з MemoryTech. Воно пропонує розміщати на двох шарах однієї сторони диска різних версій фільму: на шарі, розташованому ближче до поверхні, – DVD-версії, а на другому – HD DVD. Ця технологія, на думку розробників, повинна спростити перехід з нинішньої версії DVD на наступну. HD DVD підтримує цілий ряд голлівудських студій, включаючи Paramount Pictures, Universal Pictures, New Line Cinema і Warner Brosers Studios.

Прихильників формату Blu-ray Disc (BD) значно більше. У їх числі такі крупні фірми, як Dell, Hitachi, HP, LG, JVC, Matsushita, Mitsubishi, Pioneer, Philips, Samsung, Sharp, Sony, Thomson, TDK, що утворили раду директорів Blu-ray Disc Association (BDA). Згідно офіційному сайту BDA [14], асоціацією була затверджена специфікація BD-ROM у версії 1.0. Відповідно до цього документа ємність одного шару складає 25 GB, а двох - 50 GB, що значно більше, ніж у носіїв HD DVD. Друга важлива відмінність BD від попередників полягає в тому, що захисний шар високоємких дисків, під яким ховається реєструюча плівка, значно тонше - всього 0,1 мм. Через це оптична головка приводів Blu-ray влаштована складніше, адже для забезпечення сумісності з DVD і CD доводиться вдаватися до хитрощів по зміні фокусної відстані і довжини хвилі. Наприклад, Sony створила оригінальний лазер, здатний випромінювати на трьох довжинах хвиль. В дослідницькій лабораторії Matsushita Electric Industrial була сконструйована оптична головка на базі дифракційного елементу, яка

дозволяє розщепити початковий сигнал на три складові, причому підсумкової потужності цілком достатньо для запису BD і DVD. Ще одне цікаве рішення запропонували фахівці LG Electronics. Їх оптичний тракт заснований на єдиній асферичній об'єктній лінзі і новому поляризаційному голографічному пристрої [12].

До переваг BD, окрім великої ємності, можна віднести і перспективність цієї розробки. Так, за неофіційними даними, до 2007 р. Sony готується представити чотиришарові диски Blu-ray, а згодом ще раз подвоїти кількість шарів. Із-за невеликої товщини захисного шару розробники на перших порах пропонували укладати диски BD в картриджі, що не дозволило б зробити їх такими ж дешевими, як DVD. Але з появою у рядях прихильників Blu-ray фірми TDK ситуація змінилася, оскільки компанія має в своєму розпорядженні технологію, що дає можливість надійно захистити носій від пошкоджень без використання картриджів [12].

Компанія Iomega може стати третьою на ринку оптичних носіїв. Iomega одержала патент № 6879556 «Методика і апаратні рішення для оптичних накопичувачів» (Method and Apparatus for Optical Data Storage), який описує новий підхід до зберігання інформації на оптичних дисках [15]. Ключова ідея розробленої фахівцями Iomega технології AO-DVD (Articulated Optical Digital Versatile Disc) полягає у використанні багат шарових структур відбиваючи елементи в яких розташовані під різними кутами до поверхні диска. Основна складність тут полягає в тому, щоб розрахувати, крізь яку, послідовність поверхонь, що мають різний кут нахилу, пройшов лазерний промінь. Проте у разі успішного рішення згаданої задачі щільність запису інформації на оптичному диску вдасться збільшити багато разів. Як стверджує Iomega, в перспективі можна говорити про 40-100-кратне зростання ємності порівняно з нинішніми DVD - тобто приблизно до 800GB. Причому цією справою не обмежується - додатково відкривається можливість підвищити швидкість передачі даних в 5-30 разів. Дуже важливий і ще один факт: згідно заявам представників компанії значного зростання витрат при переході на нову технологію не буде.

Один з варіантів нової технології, можливість практичного впровадження якого зараз оцінюють фахівці фірми Iomega, одержав назву NG-DVD (Nano-Grating DVD). Він передбачає використання структури, яка нагадує кристалічну решітку, у вузлах якої знаходяться відбиваючи елементи-комірки. Для запису і зчитування інформації передбачається задіяти декілька механізмів, включаючи віддзеркалення, поляризацію, зміну фази променя.

У Blue-Ray DVD є ще один конкурент: багат шарові флуоресцентні диски для телебачення високої чіткості від компанії C3D Inc [13].

Компанією Constellation 3D (C3D) був продемонстрований новий формат – FMD (Fluorescent Multilayer Disk), який вже скоро може стати новим лідером [16]. Першим



поколінням дискових продуктів компанії C3D стане сімейство 120 мм багатошарових FM - дисків з ємністю до 140 Гбайт і із швидкістю читання до 1 Гбіта в секунду. FM диск прозорий, дана технологія не має потреби у присутності відбиваючого шару.

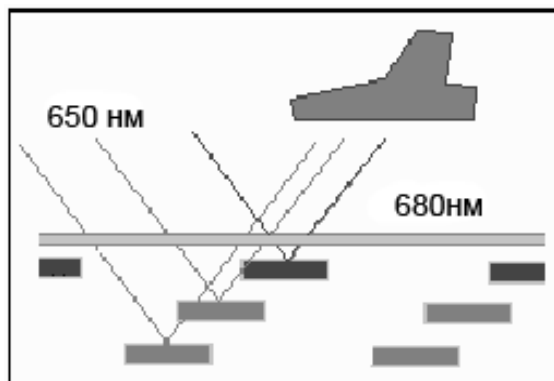


Рисунок 13. – Принцип роботи FMD диску

У носіях FMD не використовується відбитий промінь лазера, оскільки при дії лазерного променя на інформаційний шар останній сам починає випромінювати. Принцип дії флуоресцентних дисків заснований на явищі фотохромізму. Кілька років тому російські хіміки відкрили стійкий органічний матеріал "стабільний фотохром", який під впливом лазерного променя, придбає флуоресцентні властивості (флуоресцентне світіння). Інформаційний елемент FM-диска (фотохром) може міняти свої фізичні властивості (колір або наявність флуоресценції) під впливом лазера певної потужності і довжини хвилі. Спочатку фотохром не володіє флуоресцентними властивостями. При дії лазера великої потужності, ініціюється фотохімічна реакція, в результаті якої і починають виявлятися флуоресцентні властивості.

При зчитуванні дана речовина знову ж таки збуджується, але за допомогою лазера меншої потужності, і починає флуоресціювати. Це світіння уловлюється фотоприймачем і приймається як значення "1". Збуджений фотохром випромінює світло, зсуваючи спектр падаючого на нього випромінювання у бік червоного кольору на певну величину (в межах 30-50 нм), що дозволяє легко розрізнити сигнал лазера і світло, яке випромінюється матеріалом диска. Дана технологія дозволяє обійти проблему множинної інтерференції між шарами, яка може привести до втрати променя в багатошаровому диску, оскільки випромінює фотохромом світло не когерентне і добре контрастує з відгалуженим лазером, вільно проходить крізь шари, і легко визначається фотодатчиком.

У разі флуоресцентних дисків таке якісне погіршення сигналу при наростанні числа шарів відбувається набагато повільніше. За заявою розробників FMD-ROM, навіть при кількості шарів більше сотні не відбуватиметься сильного спотворення корисного сигналу, оскільки всі шари диска прозорі і однорідні.

Диск складається з декількох пластикових (полікарбонатних) шарів, сполучених між собою. Шар містить поверхневі структури ("піти"), які заповнюються флуоресцентним матеріалом. При зчитуванні лазер фокусується на певному шарі і світіння уловлюється фотодетектором. Розробники заявляють, що при використанні синього лазера (480 нм) можливо збільшення щільності запису до десятка Тбайт на один FM диск.



Рисунок 14 – Конструкція FMD диску

Інша цікава особливість даної технології полягає в можливості паралельного зчитування. Якщо записувати послідовність біт не уздовж доріжки, а углиб по шарах, то можна значно підвищити швидкість вибірки даних. Таким чином, з'являються три способи читання даних: послідовний, послідовно-паралельний і паралельний.

Процес читання відбувається за допомогою фоточутливого елемента, який представляє масив CDD камер. Даний прилад здатний зчитувати малопотужне світіння з частотою в декілька десятків МГц. При цьому швидкість зчитування досягає 1 Гбіт/с. Механічна швидкість роботи приводу при цьому в 450 разів менше ніж у DVD.

Розробники FMD технології пропонують 2 принципи запису. Перший принцип (термічний) припускає використання матеріалу, що спочатку володіє флуоресцентною властивістю (логічна одиниця). При запису, ділянки, на які здійснюється термічна дія за допомогою лазера, втрачають цю властивість (логічний нуль). Другий принцип (хімічний) припускає використання матеріалу не володіючого флуоресцентною властивістю. При дії лазера відбувається фотохімічна реакція, в результаті якої матеріал наділяється флуоресцентною властивістю. Для збудження даної реакції досить малопотужного лазера, або звичайного світлодіоду (або світлодіодної матриці). При використанні світлодіодної матриці можливий одночасний запис цілого масиву інформації, що прискорює процес запису.

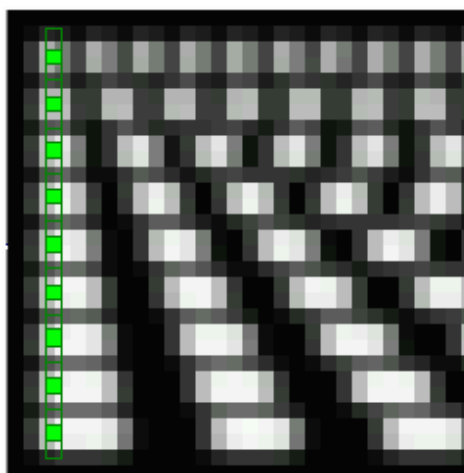


Рисунок 15 – Паралельне читання. Збільшення зображення ділянки FMD, яке отримане CDD камерами

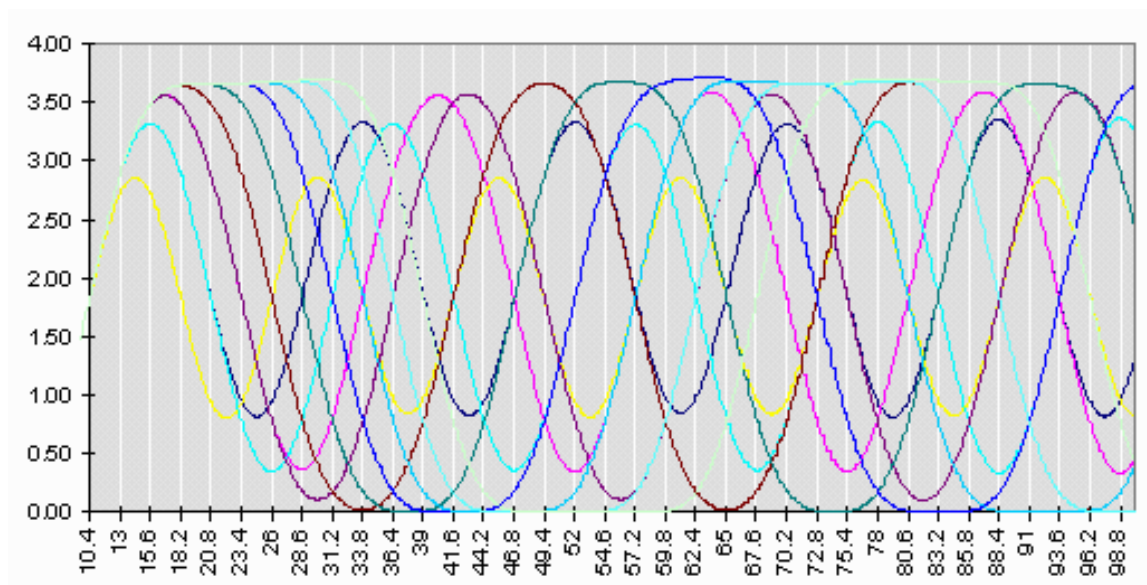


Рисунок 16. – Сигнали, які отримані з кожного елемента масиву CDD

Аналогічна перезаписуєма пам'ять гігантської ємності з об'ємною щільністю запису  $37\text{Tбайт/см}^3$  розроблена в Кіотському університеті (Японія) [17]. Інформація записується в масі спеціального «запам'ятовуючого скла», з присадкою рідко земельного елементу самарія, об'ємно розподіленого плямами діаметром  $200\text{nm}$  з інтервалом  $100\text{nm}$ . Запис виконується фемтосекундним лазером з довжиною хвилі  $800\text{nm}$ , а стирання - лазером зеленого випромінювання з довжиною хвилі не більше  $600\text{nm}$ . При опромінюванні одиничним фемтосекундним імпульсом самарій з прозорого тривалентного переходить в двовалентний стан з випромінюванням хвилі  $680\text{nm}$ .

Техніка багатощарового оптичного запису, при якому щільність запису в порівнянні з DVD в 10 разів більша запропонована дослідниками з Університету Сидзуока (Японія) [18]. В якості носія запису використовується полімерний матеріал на основі уретану. На скляній

підкладці по черзі сформовано 10 шарів плівок з цього матеріалу. Запис виконується опромінюванням фемтосекундним лазером; при опромінюванні на відстані фокусної плями відбувається фотохімічна реакція, в результаті змінюється показник переломлення. Інформація записується на одному з десяти шарів за рахунок регулювання фокусу лазерного променя. При відтворенні носій запису опромінюється лазером червоного світла з коротшою довжиною хвилі, ніж у фемтосекундного лазера, і виділяється випромінювання, яке відбите шаром запису. При використанні трьох випромінювачів з різною поляризацією на одній і тій же ділянці носія запису можна з накладенням записати три різні інформаційних шара. У такому разі щільність запису може бути в 30 разів вище, ніж у диска DVD.

### Голографічна пам'ять

Технологія оптичного запису, відома як голографія, дозволяє забезпечити дуже високу щільність запису при збереженні максимальної швидкості доступу до даних. Це досягається за рахунок того, що голографічний образ (голограма) кодується в один великий блок даних, який записується всього за одне звернення. А коли відбувається читання, цей блок цілком витягується з пам'яті. Для читання або запису блоків голографічних даних ("сторінок"), які зберігаються на світлочутливому матеріалі (за основний матеріал прийнятий ніобіт літію  $\text{LiNbO}_3$ ), використовуються лазери [19, 20, 21]. Теоретично, тисячі таких цифрових сторінок, кожна з яких містить до мільйона біт, може помістити в пристрій розміром з шматочок цукру. Причому теоретично очікується щільність даних в 1ТБ на кубічний сантиметр ( $\text{TB}/\text{cm}^3$ ). Практично ж дослідники очікують досягнення щільності близько  $10\text{GB}/\text{cm}^3$ . При такій щільності запису оптичний шар, що має товщину біля 1см, дозволить зберігати біля 1ТБ даних. А якщо врахувати, що запам'ятовуюча система не має рухомих частин, і доступ до сторінок даних здійснюється паралельно, можна очікувати, що пристрій характеризуватиметься щільністю в  $1\text{GB}/\text{cm}^3$  і навіть вище [13, 22].

Надзвичайні можливості голографічної пам'яті зацікавили учених багатьох університетів і промислових дослідницьких лабораторій. Цей інтерес вже досить давно вилився в дві науково-дослідні програми. Одна з них - програма PRISM (Photorefractive Information Storage Material), метою якої є пошук відповідних світлочутливих матеріалів для зберігання голограм і дослідження їх запам'ятовуючих властивостей. Друга науково-дослідна програма - HDSS (Holographic Data Storage System) [22, 23]. HDSS орієнтована на розробку апаратних засобів, необхідних для практичної реалізації голографічних запам'ятовуючих систем.

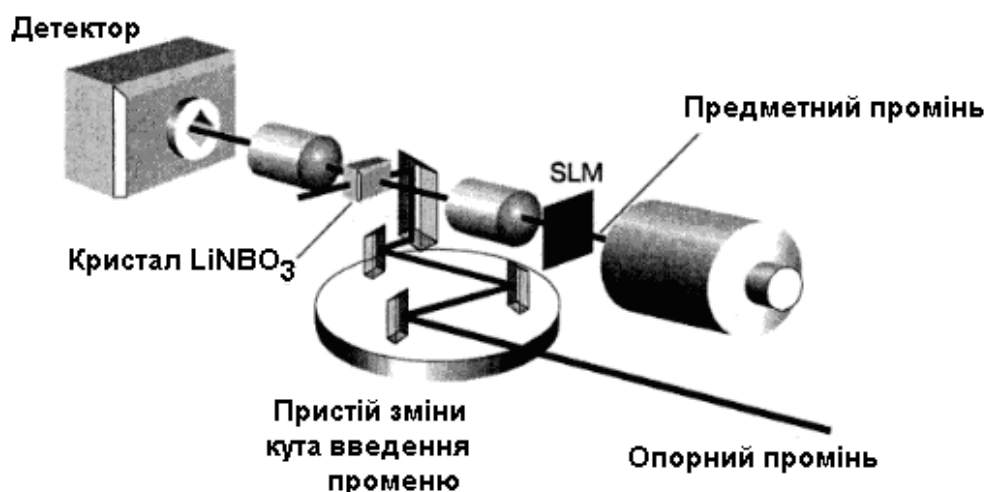


Рисунок 17 - Типова установка запису/читання

Розглянемо установку системи голографічної пам'яті, зібрану дослідницькою групою з Almaden Research Center [22].

На початковому етапі в цьому пристрої відбувається розділення променя синьо-зеленого аргонowego лазера на дві складові - опорний і предметний промені (останній є носієм самих даних). Предметний промінь піддається розфокусуванню, щоб він міг повністю освітлювати просторовий світловий модулятор (SLM - Spatial Light Modulator), який є рідинокристалічною (LCD) панеллю, на якій сторінка даних відображається у вигляді матриці, що складається з світлих і темних пікселів (рис.17).

Обидва промені прямують всередину світлочутливого кристала, де і відбувається їх взаємодія. В результаті цієї взаємодії утворюється інтерференційна картина, яка і є основою голограми і запам'ятовується у вигляді набору варіацій показника заломлення або коефіцієнта віддзеркалення усередині цього кристала. При читанні даних кристал освітлюється опорним променем, який, взаємодіючи з інтерференційною картиною, яка зберігається в кристалі, відтворює записану сторінку у вигляді образу з світлих і темних пікселів (голограма перетворить опорну хвилю в копію предметної). Потім цей образ прямує в матричний детектор, основою для якого служить прилад із зарядовим зв'язком (CCD - Charge-Coupled Device або ПЗЗ), захоплюючий всю сторінку даних. При читанні даних опорний промінь повинен падати на кристал під тим же самим кутом, при якому вироблявся запис цих даних, і допускається зміна цього кута не більше ніж на градус. Це дозволяє одержати високу щільність даних: змінюючи кут опорного променя або його частоту, можна записати додаткові сторінки даних в тому ж самому кристалі. Конструкція накопичувача на голографічних дисках приведена на рис. 18 [23]. Його робоча поверхня сформована з якнайтоншої полімерної плівки товщиною 100 мікрон. Решта елементів не зменшилася: за

допомогою LCD-панелі формуються сторінки даних, фотосенсор їх реєструє, а лазер генерує пучок когерентного світла.

Змінюючи кут при запису, можна зберегти в одному фоточутливому носії безліч окремих сторінок даних.

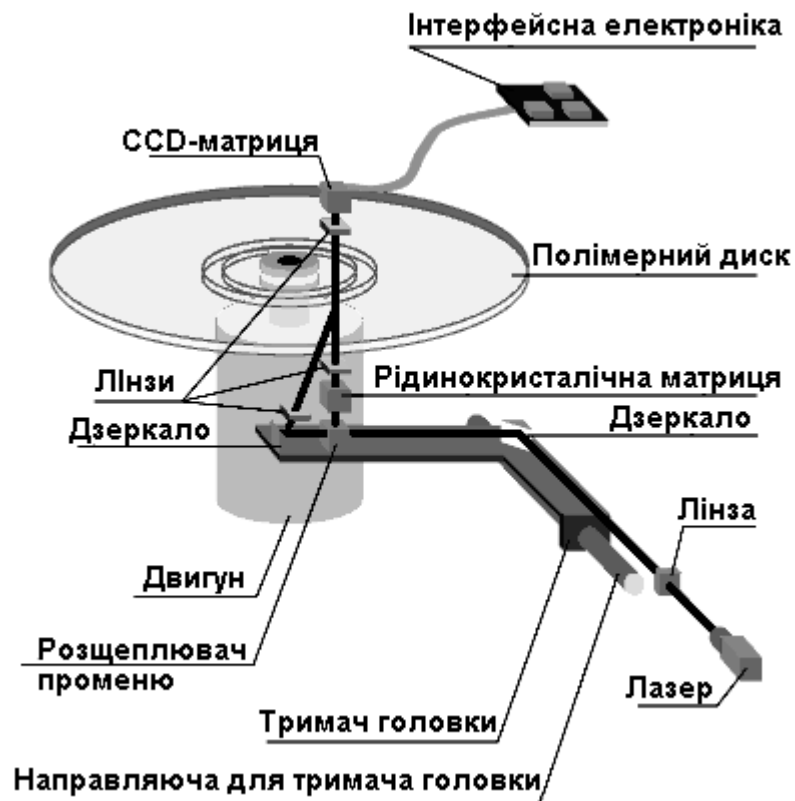


Рисунок 18. – Накопичувач на голографічних дисках

Використовуєма в тривимірній голографії процедура розташування декількох сторінок з даними в один і той же об'єм називається мультиплексуванням. Традиційно використовуються наступні методи мультиплексування: по куту падіння опорного пучка, по довжині хвилі і по фазі, але, на жаль, вони вимагають складних оптичних систем і товстих (товщиною в декілька міліметрів) носіїв, що робить їх непридатними для комерційного застосування у сфері обробки інформації. Проте зовсім недавно Bell Labs були винайдені три нові методи мультиплексування: зсувне, апертурне і кореляційне, засновані на використанні зміни положення носія щодо світлових пучків [22]. При цьому зсувне і апертурне мультиплексування використовують сферичний опорний пучок, а кореляційне - пучок ще складнішої форми. Крім того, оскільки при кореляційному і зсувному мультиплексуванні задіяні механічні рухомі елементи, час доступу при їх застосуванні буде приблизно таким же, як і у звичайних оптичних дисків. Bell Labs вдалося побудувати експериментальний носій на основі ніобіта літію з щільністю запису біля 226GB на квадратний дюйм, який використовує техніку кореляційного мультиплексування.

Іншою складністю, що виникла на шляху створення пристроїв голографічної пам'яті, став пошук відповідного матеріалу для носія. Кристал ніобіта літію (з домішкою заліза) володіє неприємною властивістю - чим більше голограм в ньому записано, тим слабкіше кожна з них дає відгук. Залежність ослаблення – квадратична. 1000 голограм дають зниження ефективності дифракції до 0,0001% від початкової [23]. Тут вже починають виявлятися електронні завади в устаткуванні, теплові шуми, чутливість сенсорів. Якщо фотографіям невеликі спотворення не так страшні, то для цифрових даних поява помилок при зчитуванні - набагато серйозніше. Тому був розроблений новий клас фотополімерних матеріалів. Створені матеріали мають триваліший життєвий цикл (у плані зберігання записаної на них інформації) і стійкі до дії температур, а також відрізняються поліпшеними оптичними характеристиками, загалом, підходять для одноразового запису даних (WORM) [24].

Для голографічної пам'яті не годяться світлодіоди на базі напівпровідникових лазерів, які використовуються в традиційних оптичних пристроях, оскільки вони мають недостатню потужність, дають пучок з високою розбіжністю і одержати дуже складно випромінювання в середньому діапазоні видимої області спектру. Потрібен потужний лазер, який дає якомога більш паралельний пучок. До недавнього часу не було жодного світлового модулятора, який можна було б застосовувати в системах голографічної пам'яті. Проте часи міняються, і сьогодні вже стали доступними недорогі твердотільні лазери, з'явилася мікроелектромеханічна технологія (MEM - Micro-Electrical Mechanical, пристрої на її основі – масиви мікродзеркал розміром близько 17 мікрон), яка підходить на роль SLM.

Одна з найбільш значних проблем голографічної пам'яті полягає в обмеженому "терміні служби" носіїв. Виявляється, що не тільки запис додаткових сторінок впливає на фотовластивості кристалів, але і зчитування теж, хоч і в меншій мірі. Освітлюючи носій опорним променем з метою відновити зображення певної сторінки даних, тим самим частково стираємо її. З кожним циклом голограма "блідніше", а частота виникнення помилок поступово наближається до критичного рівня, за межами якого алгоритми корекції стають безсилі. Уникнути ослаблення сигналу можна декількома способами. Найбільш простим є термічний - досить нагрівати носій до 120<sup>0</sup>С відразу після запису, і іони, що зрушилися з своїх позицій, привернуті електричним полем, концентруватимуться навколо областей скупчення електронів. Після того, як кристал остигне, іони вже не зможуть зрушитися з місця, якби намертво вплавилися в кристалічну решітку.

Тривалість процесу нагріву і охолодження робить методологію непридатною для створення швидкодіючих приводів. Більш придатним виглядає варіант електричної фіксації - шляхом додавання електричного поля з напруженістю, що перевищує коерцитивні сили

матеріалу. В результаті навколо скупчень електронів утворюються стабільні домени. Проблема полягає тільки у розмірі цих доменів: по існуючій методиці в звичайних матеріалах вони виходять занадто великими, що означає зниження максимальної ємності (кількості помітних елементів) кожної сторінки.

Ще один варіант фіксації називається "gating-процесом": при запису кристал освітлюють додатковим випромінюванням на частоті, яка відрізняється від частоти предметного і опорного променів. При цьому не обов'язково gating-освітлення повинне бути когерентним - його цілком може генерувати звичайний діод. Так, кристал ніобіта літію освітлюють променем лазера з довжиною хвилі 488 нм, тоді як голограма записується променем з довжиною хвилі 852 нм. Перевага трьохпроменевого методу відображає так зване gating-співвідношення, яке показує зміну fotocутливості кристала у присутності gating-випромінювання. В кращому разі співвідношення може досягати значень 5000/1. Таким чином, якщо при звичайному процесі запис здійснюється високоенергетичними фотонами зелено-блакитної області спектру, то за наявності зелено-блакитного gating-освітлення для цього вже досить енергії інфрачервоного лазера [23]. Тепер запис однієї голограми вже не впливає на зображення інших. Звичайно, навіть саме по собі зелено-блакитне освітлення здатне стирати дані, але це відбувається тільки при тривалій експозиції. Додаткове джерело використовують тільки під час запису. Кількість циклів зчитування створеної у такий спосіб голограми збільшується в 4 рази.

Інженери не змогли добитися високої щільності запису голографічним методом на полімерному диску унаслідок занадто тонкого шару полімерної плівки. Виявляється, поки ніхто ще не зміг винайти спосіб виготовлення товстих полімерних покриттів! Таке важливе збільшення ємності голографічного диска, що представлялося елементарним з погляду теорії, не реалізується на практиці. Крім того, полімери після декількох циклів запису/зчитування "усихають"! Мало того, що це знижує максимальну ємність, так і вже записані сторінки втрачають свою первинну чіткість, зростає кількість помилок, виявляються перехресні наведення між голографічними [25, 26].

Проте зовсім недавно з'явилася надія на швидке втілення переваг голографії. Компанія Aprilis, що брала участь в програмі PRISM і добилася значних успіхів на момент її завершення, анонсувала привід, який працює з голографічними дисками. Основна особливість – оригінальний полімер CROP (Cationic Ring Opening Polymerization), не страждаючий від стиснення після робочого циклу [24, 27]. Американська компанія Aprilis проводять експерименти по використанню в якості голографічного покриття силікону з додаванням епоксидних смол. Цей матеріал, на думку розробників з Aprilis, поєднує чутливість полімерів з більшою стійкістю і, до того ж, не міняє свого об'єму при запису



голограм. Завдяки застосуванню епо-силікону компанія сподівається вже в 2005 році створити голографічний носій інформації з об'ємом пам'яті в 200 гігабайт і швидкістю передачі даних до 75 мегабайт в секунду.

InPhase Technologies, також збирається представити свій варіант технології. Розробники голографічного носія «Tapestry» вирішили скористатися багатьма розробками, які доступні на ринку [28].

Зараз, за твердженням компанії, на роль джерел випромінювання цілком підходять червоні (довжина хвилі 680 нм) і сині (405 нм) лазери, які використовуються в пристроях на базі DVD з малими розмірами, надійні і недорогі. Для створення недорогих і ефективних детекторів, необхідних для читання інформації InPhase вирішила задіяти КМОН – матриці, які використовуються в деяких моделях цифрових фотокамер. Ще однією складністю були просторові світлові модулятори, що формують голографічну картину при записі даних, - вони не забезпечували достатньої швидкодії і контрастності. InPhase знайшла досить просте рішення у вигляді масивів мікродзеркал і фероелектричних модуляторів, які застосовуються в цифрових проекторах і телевізорах.

Одна з головних проблем в розробці голографічних запам'ятовуючих пристроїв полягала в отриманні матеріалів для носіїв, які, по-перше, повинні володіти широким динамічним діапазоном, по-друге, високою чутливістю, по-третє, просторовою стабільністю, по-четверте, оптичною однорідністю, а також бути стійкими до термічних і інших дій. InPhase в даному випадку вирішила використовувати двокомпонентну полімерну систему. Один з її компонентів формує матрицю, де розчинений другий компонент володіючий світлочутливими властивостями. При запису інформації останній під впливом світла полімеризується, із-за чого виникає градієнт концентрації не полімеризованого компонента, і починається його дифузія. Результатом всього цього процесу є утворення структури із змінним індексом відбиття, коливання якого несуть в собі записану інформацію [28].

Нова технологія, розроблена японською компанією Nippon Telegraph and Telephone (NTT), цікава, напевно, перш за все тим, що орієнтована на масового споживача. Представлені недавно NTT результати останніх розробок у області голографічних запам'ятовуючих пристроїв виявилися дуже цікавими: інженери компанії змогли створити мініатюрні постійні носії і пристрій читання інформації з них [29]. Технологія від NTT, що одержала назву Info-MICA, базується на тонкоплівочній голографії (коли товщина голограми менше довжини хвилі використовуваного світла), що допомагає уникнути небажаних дифракційних ефектів.

Носій Info-MICA містить певну кількість робочих шарів матеріалу з високим коефіцієнтом заломлення, між якими знаходяться прошарки речовини з низькою

заломлюючою здатністю. Інформація в робочих шарах представляється послідовностями поглиблень і опуклостей, а голографічна картина для кожного з них заздалегідь моделюється на комп'ютері. Виготовляються носії із звичайних пластиків методом штампування з матриці, тобто так само, як оптичні диски. У зчитуючому пристрої пучок від світлодіодного лазера за допомогою циліндрової лінзи фокусується на торці робочого шару, причому для позиціонування променя з необхідною точністю (близько 1,5 мкм) застосовується електромагнітний привід. Завдяки різниці коефіцієнтів заломлення між робочим і допоміжним шарами перший виконує роль своєрідного оптичного хвилеводу. В результаті світло проходить крізь робочий шар наскрізь, розсіваючись на поглибленнях і опуклостях і відтворюючи в паралельній площині записану голограму, яку залишається тільки зчитати і розшифрувати.

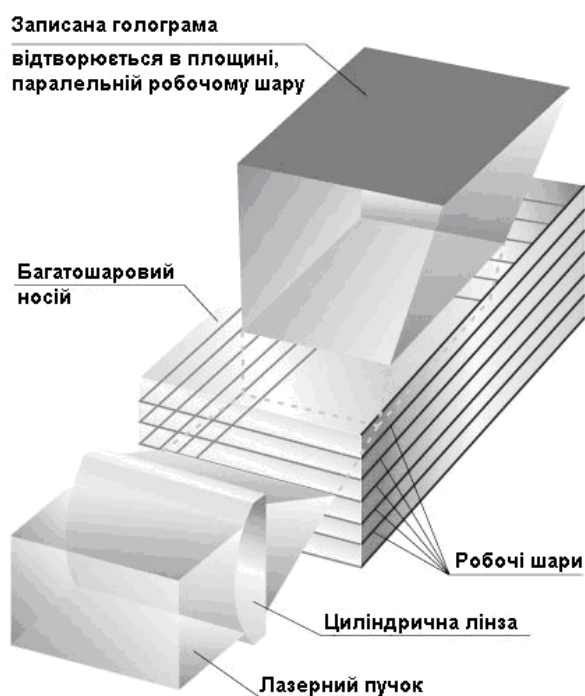


Рисунок 19. – Принцип роботи зчитуючого пристрою Info-MICA

Носії, розроблені ученими NTT, мають розміри 25x25x2 мм, складаються із ста робочих шарів і здатні вміщати близько 1 GB інформації, тобто щільність її запису складає 1,7 Gb на квадратний дюйм в одному шарі. Таким чином, "картка" Info-MICA, аналогічна за своїми розмірами флеш-карті Secure Digital (24x32x2,1 мм), володіла б ємністю близько 25 GB. Проте в найближчих планах NTT поки числиться тільки збільшення ємності своїх носіїв до 10 GB [29].

Недавно дослідницька група компанії *IBM*, що спеціалізується на вивченні питань голографічного запису, оголосила про створення декількох випробувальних платформ з різних світлочувливих матеріалів. По попередніх повідомленнях ученим вдалося добитися

щільності збереження даних - до 390 біт на квадратний мікрон, тоді як аналогічний показник для звичайних *DVD* не перевищує 5 біт на квадратний мікрон [24]. Окрім неорганічних хімічних з'єднань (ніобіта літію і інших), фахівці припускають використовувати для реалізації голографічних технологій і світлочутливі полімери, які наноситимуться на поверхню звичайного компакт-диску. Згідно попереднім розрахункам, для надійного зберігання голограм досить нанесення спеціального полімерного покриття завтовшки декілька сотень мікрон - але цього результату ще належить добитися технологічно, зберігши при цьому прийнятну вартість виробництва, інакше нові, «голографічні» *DVD* навряд чи стануть мати масовий попит.

Японська корпорація Optoware розробила накопичувач, який працює з 12–сантиметровими дисками ємністю до 200 Гб. У цьому пристрої використовується так звана поляризована колінеарна голографія, що дозволило відмовитися від традиційної двохпроменевої схеми [13]. Інженери компанії придумали оригінальний пристрій - розщеплювач поляризованого пучка (PBS), який дозволяє об'єднувати сигнальний і опорний промені так, щоб вони проходили крізь одну лінзу. Перед лінзою встановлений оптичний обертач, який дозволяє управляти кутом поляризації світла. Сигнальний і опорний промені від зеленого лазера, площини поляризації яких зміщені на  $90^0$ , змішуються на PBS і прямують на обертач. В результаті між лівою частиною сигнального і правою частиною опорного променів виникає інтерференція, яка і формує інтерференційну картину на світлочутливому шарі диска. Спрощення оптичної системи дозволило побудувати привід по тій же схемі, що і звичайний CD-ROM. Для керування сервоприводом і для читання звичайних CD і DVD використовується додатковий червоний лазер [13, 20].

Компанія Polight Technologies з Кембриджа збирається покривати свої нові диски склоподібною речовиною під назвою подвійний холонід. Першу партію голографічних носіїв інформації, ємністю 500 гігабайт кожен, англійці планували випустити на ринок вже в 2004-му році [24].

Японська фірма Fudgi розробляє перезаписуємий носій з ємністю, еквівалентною 200 цифровим відеодискам. Активним полімерним середовищем є складний полієфір з азобензольними ланцюжками. Записана інформація фіксується і відображається конфігурацією молекул цього полімеру. Відмітною особливістю матеріалу є його здібність до спонтанного зростання при температурах 40-50  $^0\text{C}$ . Після припинення опромінювання записуючим випромінюванням молекули полімеру продовжують рости до деякого стану. Шляхом регулювання тривалості опромінювання можна управляти конфігурацією молекул полімеру і збільшувати інтенсивність записаних сигналів [31].

Переваг технології голографічної пам'яті більш ніж достатньо: крім того, що інформація зберігається і зчитується паралельно, можна досягти дуже високої швидкості передачі даних і, в окремих випадках, високої швидкості довільного доступу. А найголовніше - практично відсутні механічні компоненти, властиві нинішнім пристроям зберігання інформації. Це гарантує не тільки швидкий доступ (миттєвий) до даних, меншу ймовірність збоїв, але і менше споживання електроенергії. Одне з найбільш вражаючих уяву застосувань голографічної технології – асоціативний пошук. Якщо освітлювати кристал не опорним, а предметним променем, то одержимо "зображення" початкового опорного променя. Тобто буде відтворений оригінальний кут його входження. Чим точніше зображення, що проектується на кристал, відповідає записаному, тим яскравіше буде вихідний промінь. Більш того, виявляться і всі опорні промені, пов'язані з схожими сторінками, а інтенсивність кожного з них визначатиметься ступенем їх схожості з пред'явленим зразком. Реєструючи відхилення за допомогою фотосенсора, можна проводити пошук, порівнюючи вибране зображення із записаними.

### *Альтернативні технології зберігання даних*

Які технології можуть стати основою для створення пристроїв пам'яті в майбутньому? Різні варіанти відповіді на це питання регулярно пропонують компанії і дослідницькі організації.

ДНК є найбільш складною з відомих людині природних впорядкованих структур такого розміру. Бажання використовувати її в якості носія інформації очевидно. Всього 1 грам ДНК – молекул в змозі зберігати більше 100 ТБ інформації, і вчені-біологи вже знають, як підступитися до проблеми: запис можна виконувати стандартними методами генної інженерії, а для зчитування давно випускаються комерційні пристрої. Залишається лише одна проблема - швидкодія. Маніпуляції з біологічним матеріалом проводяться у великих контейнерах, наповнених рідиною (5 грамів ДНК на літр води). Тут не доводиться говорити про високу швидкість. Операція розпізнавання комбінацій генів за допомогою приладів на зразок чипів 4000A компаній Axon Instruments, які використовуються в рамках проектів розшифровки генома людини, з погляду сучасної обчислювальної техніки виконується неймовірно повільно - рахунок йде на хвилини. У якійсь мірі подолати даний недолік може динамічний кеш, організований на швидкісних пристроях. Альтернативний варіант передбачає використання синтетичних молекул ДНК і оптичного детектора. Саме на ньому зупинилася компанія Nanotronics, яка за замовленням Rome Air Force Research Lab веде розробку нової технології [32]. Nanotronics добилася певних успіхів в маніпулюванні ДНК. Процес, завдяки якому вдається впорядковано розміщувати мільйони молекул на великому

просторі, називається "рідинна самозборка" (fluidic self-assembly). Як відомо, ланцюжок ДНК складається з окремих фрагментів, що позначаються першими буквами їх назв: С, G, А, Т. При цьому порядок їх з'єднання строго визначений - С з'єднується з G, а Т з А. На базову пластину з необхідним розподілом фрагментів можна "осадити" з розчину доповнюючі їх ланцюжки в необхідному порядку. Приєднавши до ДНК який-небудь елемент, будь то транзистор або флуоресцентна молекула, забезпечується їх безпомилкова доставка до місця призначення. Щоб процес протікав швидше (у прямому розумінні цього слова), дослідники вдаються до допомоги електричного поля або теплової конвекції.

Єдиний на сьогодні продукт компанії Nanotronics (Nanogen) - NanoChip. Завдання формування базової конфігурації фрагментів ДНК розв'язується матрицею електродів. Синтетично створені фрагменти володіють електричним зарядом, тому вони осідають на включених електродах. По черзі включаючи і виключаючи електроди, можна впорядковано розмістити на чипі будь-яку кількість різних фрагментів [32]. В ході експериментів з'ясувалося, що утворені біологічні структури достатньо стійки, щоб витримати повне осушення контейнера після завершення процесу. Це відкриває дорогу для формування звичайних дисків і пластин, годних для зчитування в приводах на зразок CD-ROM або карт – рідерах. Прикріплюючи до кожного варіанту ланцюжка молекули, що флуоресціюють на різних частотах, можна закодувати значно більший об'єм інформації, ніж просто 0 або 1. Виходить плоский біоаналог багатосарових флуоресцентних дисків Constellation3D. Крім того, ДНК проявляє стабільність не тільки в різному середовищі, але і в часі.

Фактично процес виготовлення диска проходить в три етапи. На першому з'єднуються в ході хімічної реакції ДНК – шаблони майбутніх модулів пам'яті. Потім до них приєднуються фрагменти, які є акцепторами і донорами. Порядок з'єднання визначається шаблоном завдяки вибірковій здібності різних ділянок ДНК до гібридизації. Всі акцептори включають речовину ("quencher", або "гаситель"), яка запобігає флуоресценції модуля. Потім модулі хімічним способом прикріплюються до підкладки-основи диска. В процесі запису ультрафіолетовий лазер вибірково впливає на речовину – "гаситель", і модулі, в яких вона була нейтралізована, стають активними. Виходить ДНК представляє WORM-диск. Все описане вище - це лише загальні принципи майбутнього пристрою.

У 1999 р. компанія Keele High Density в Англії опублікувала цікавий прес-реліз. У документі мовилося про унікальну технологію зберігання даних. Серед параметрів приведених в релізі особливо відмичалися наступні: щільність запису - 270 GB/cm<sup>2</sup>, можливість розміщення 10,8 ТБ інформації на носії розміром з кредитну картку вартістю \$50, збільшення пропускної спроможності в 8 разів [32]. Реліз доповнений матеріалом, озаглавленим "Technical Paper By Professor E. W. Williams". У цій статті мовиться про

"гібридну магніто – опто – силіконову пам'ять з використанням RLL-коду для стиснення даних". Висока ємність пропонованої технології пояснюється реалізацією вертикальної намагніченості в якнайтонших тербій – залізо – кобальтових плівках, напилених на кристал кремнію. Саме ці рідкоземельні плівки дозволяють поліпшити оптичний сигнал, який зчитується з поверхні носія. По своїх характеристиках він перевищує відгук звичайних магніто - оптичних середовищ в 20 разів. Запис ведеться шляхом нагріву і перемагнічування – традиційний спосіб для МО-технології.

Неймовірна швидкість передачі даних - слідство унікального алгоритму стиснення, який базується на методиці DAISY CHAIN. Пригадаємо принцип роботи коду RLL (Run-Length Limited) [33]. Код дозволяє встановити обмеження на частоту проходження "1" при запису інформації, тобто визначити максимальну і мінімальну кількість нулів між одиницями. З одного боку, це виключає можливість інтерференції, з іншою - не дає зчитуючому пристрою втратити синхронізацію. Пропонується розбити інформацію на слова і зберігати повністю лише перше - все наступне виходитимуть шляхом "віднімання" з нього. Оригінальний приклад Уільямса [32]:

```

M1 0100
M2 1000
M3 001000
M4 000100
M5 0001000

```

*Використовується RLL-код з параметрами (2, 7),  
де 2 – мінімальне, а 7 – максимальна кількість  
поділяючих одиниць нулів.*

```

-----
M1 0100
M2-M1 0 - - - 0
M3-M2 00 - - - -
M4-M3 0 - - - - 0
M5-M4 - - - - - 0

```

Якщо придивитися, то ланцюжок виглядає як список відмінностей одного слова від попереднього. За розрахунками, приведеними в документі, для слів фіксованої довжини (16 біт) досягається п'ятикратне стиснення, а для слів змінної довжини - восьмикратне. Не дивлячись на фінансову підтримку від фонду Cavendish Management Resources і авторитет професора Уільямса, ні через два, ні через три роки громадськість так і не дочекалася нічого.

У 1999 р. з'явився Джеймс Ла Клейр (James La Clair) з своїми флуоресціюючими молекулами SENSI. SENSI – це молекула, яка у присутності азоту здатна перевипромінювати одержану енергію, тобто флуоресціювати. Проте коли замість азоту в її склад входить вуглекислий газ – виникнення свічення стає неможливим. Щоб збудити флуоресценцію, Клейр використовував лазер, реєстрація проводилася за допомогою лавинного детектора (single photon counting silicon avalanche detector) [32]. Відмінність від інших аналогічних методик полягає в компактності елементарної запам'ятовуючої комірки – всього одна

молекула, тоді як конкуренти пропонують варіанти, засновані на складних молекулярних комплексах. Не дивлячись на позитивні відгуки деяких учених, що підтвердили високий потенціал розробки, результатів поки не видно. З 1999 р. практично не зустрічається ні єдиної згадки про таку перспективну технологію.

Група дослідників центру "W.M. Keck Center for Molecular Electronic" під керівництвом професора Роберта Р. Бірґа (Robert R. Birge) вже відносно давно одержала прототип підсистеми пам'яті, яка використовує для запам'ятовування цифрові біти молекули [22]. Це - молекули протеїну, які називаються бактеріородопсин (bacteriorhodopsin). Він має пурпурний колір, поглинає світло і присутній в мембрані мікроорганізму (називається *halobacterium halobium*). Цей мікроорганізм "проживає" в соляних болотах, де температура може досягати +150 °C. Коли рівень змісту кисню в навколишньому середовищі настільки низок, що для отримання енергії неможливо використовувати дихання (окислення), мікроорганізм для фотосинтезу використовує протеїн. Бактеріородопсин був вибрав тому, що фотоцикл (послідовність структурних змін, які молекула зазнає при реакції з світлом) робить цю молекулу ідеальним логічним запам'ятовуючим елементом типу "&" або типу перемикача з одного стану в інший (тригер). Як показали дослідження Бірґа, bR-стан (логічне значення біта "0") і Q-стан (логічне значення біта "1") є проміжними станами молекули і можуть залишатися стабільними протягом багатьох років. Ця властивість забезпечує дивовижну стабільність протеїну було придбано еволюційним шляхом в боротьбі за виживання в суворих умовах соляних боліт. За оцінками Бірґа, дані, записані на бактеріородопсином запам'ятовуючому пристрої повинні зберігатися приблизно п'ять років. Іншою важливою особливістю бактеріородопсина є те, що ці два стани мають спектри поглинання, які помітно відрізняються. Це дозволяє легко визначити поточний стан молекули за допомогою лазера, налаштованого на відповідну частоту. Був побудований прототип системи пам'яті, в якому бактеріородопсин запам'ятовує дані в тривимірній матриці. Така матриця представляє кювету (прозора судина), яка заповнена поліакридним гелем, в який поміщений протеїн. Кювета має форму розміром 1x1x2 дюйма. Протеїн, який знаходиться в bR-стані, фіксується в просторі при полімеризації гелю. Кювету оточує батарея лазерів і детекторна матриця, побудована на базі приладу, який використовує принцип зарядової інжекції (CID - Charge Injection Device) для запису і читання даних.

При записі даних спочатку треба запалити жовтий "сторінковий" лазер - для переводу молекул в Q-стан. Просторовий світловий модулятор (SLM) представляє собою LCD - матрицю, яка створює маску на шляху променя, викликає виникнення активної (збудженої) площини в матеріалі усередині кювети. Ця енергоактивна площина являє собою сторінку даних, яка може вмішати масив 4096x4096 bit. Перед поверненням протеїну в стан спокою (у

ньому він може перебувати досить тривалий час, зберігаючи інформацію) запалюється червоний, записуючий лазер, розташований під прямим кутом стосовно жовтого. Інший SLM відображає двійкові дані й, таким чином, створює на шляху променів відповідну маску, тому опроміненню піддаються тільки певні плями (крапки) сторінки. Молекули в цих місцях перейдуть в Q-стан і будуть представляти двійкову одиницю. Частини сторінки, що залишилися повертаються в первісний bR-стан і будуть представляти двійкові нулі. Для того щоб зчитати дані треба знову запалити сторінковий лазер, який переводить читаєму сторінку в Q-стан. Це робиться для того, щоб надалі, за допомогою розходження в спектрах поглинання, ідентифікувати двійкові нулі й одиниці. Через 2ms після цього сторінка "занурюється" у низькоінтенсивний світловий потік червоного лазера. Низька інтенсивність потрібна для того, щоб попередити "перестрибування" молекул в Q-стан.

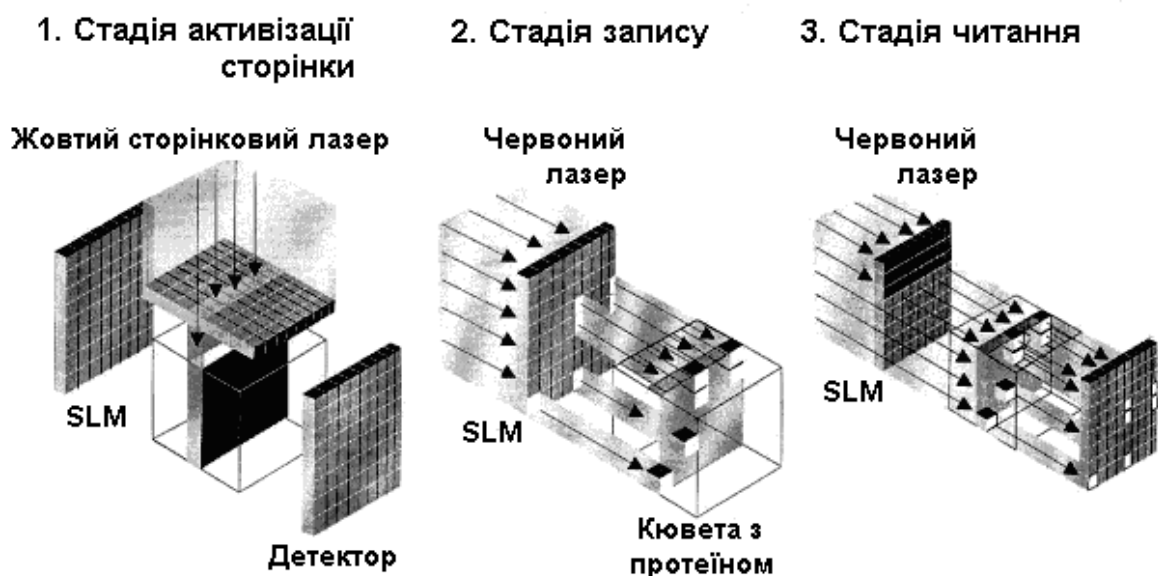


Рисунок 20. – Запис /читання підсистеми пам'яті, яка використовує для запам'ятовування цифрові біти молекул.

Молекули, які представляють двійковий нуль, поглинають червоне світло, а двійкову одиницю пропускають промінь повз себе. Це створює малюнок зі світлих і темних плям на LCD-матриці, яка захоплює сторінку цифрової інформації. Для стирання даних досить короткого імпульсу синього лазера, щоб повернути молекули з Q-стану у вихідний bR-стан. Синє світло не обов'язково повинно йти від лазера: так можна стерти всю кювету за допомогою звичайної ультрафіолетової лампи. Для забезпечення цілісності даних при вибіркового стиранні сторінок застосовується кешування декількох суміжних сторінок. При операціях запису також використовуються два додаткових біти парності, щоб захиститися від помилок. Сторінка даних може бути зчитана без руйнування до 5000 разів. Кожна сторінка відслідковується лічильником, і якщо відбувається 1024 читання, то сторінка "освіжається"



(регенерується) за допомогою нової операції запису. З огляду на те, що молекула міняє свої стани в межах 1ms, сумарний час для виконання операції читання або запису становить близько 10ms. Однак, за аналогією із системою голографічної пам'яті, цей пристрій здійснює паралельний доступ у циклі запису, що дозволяє розраховувати на швидкість до 10MBps. Передбачається, що якщо об'єднати по вісім запам'ятовуючих бітових комірок у байт із паралельним доступом, то можна досягти швидкості 80MBps, але для такого способу необхідна відповідна схемотехнічна реалізація підсистеми пам'яті. Теоретично, кювету, про яку йшла мова, може вмістити 1ТВ даних. Обмеження на ємність зв'язані, в основному, із проблемами лінзової системи і якістю протеїну. Конструкція молекулярної пам'яті, безумовно, має переваги. По-перше, вона заснована на протеїні, який виробляється у великій кількості й за недорогою ціною, чому сприяють досягнення генної інженерії. По-друге, система може функціонувати в більшому діапазоні температур ніж напівпровідникова пам'ять. По-третє, дані зберігаються постійно - навіть якщо виключити живлення системи пам'яті і це не приведе до втрати інформації. Кубики з даними мають маленькі розміри але містять гігабайти інформації, їх можна поміщати в архів для зберігання копій. Так як кубики не містять рухомих частин, то це зручніше ніж використовувати портативні жорсткі диски або картриджі з магнітною стрічкою.

Американська IBM, німецька Infineon Technologies і тайванська Macronix анонсували спільну дослідницьку ініціативу, метою якої буде оцінка перспектив технології фазової пам'яті (PCM - Phase Change Memory) [34].

Основна ідея фазової пам'яті полягає в тому, щоб використати для зберігання інформації два фазових стани речовини: кристалічний –"1", і аморфний –"0". Переводити речовину з одного стану в інший дослідники мають намір за допомогою імпульсів електричного струму.

У випадку фазової пам'яті характеристикою комірки, на підставі якої зчитуються дані, служить її електричний опір. Такий підхід набагато надійніший, оскільки він не загрожує вибитком заряду.

Іншою перевагою PCM є можливість досягнення більшої, ніж у флеш-пам'яті, швидкодії. Вона надається завдяки одному із принципових відмінностей між двома згаданими технологіями: перед тим як записати інформацію в комірку, у випадку флеш-пам'яті її необхідно очистити, а у випадку фазової пам'яті - непотрібно. Час запису даних у пристроях PCM, відповідно до попередніх оцінок, не перевищить 50 нс. На думку учасників анонсованого проекту, комерційні продукти на основі PCM можуть з'явитися на ринку вже протягом найближчих 3-5 років.

Компанія IBM продемонструвала нову технологію зберігання інформації Millipede, яка дозволить досягти щільності запису порядку трильйона біт на квадратний дюйм - в 20 разів більше, ніж у самого сучасного магнітного накопичувача [35]. Ключовим елементом нової технології є масив V-образних кремнієвих кронштейнів довжиною 70 і товщиною 0,5 мкм. На кінці кожного з них знаходиться мініатюрна 2-мікронна голка. У продемонстрованому IBM дослідному зразку Millipede застосовувався масив 32 x 32 з фізичними розмірами 3 x 3 мм.

Запис даних здійснюється на носій, який представляє собою дуже тонкий шар полімерного матеріалу на кремнієвій підкладці, методом, що умовно можна було б назвати "випалювання". Наконечник кожного V-образного кронштейна з розміщеної на ньому голкою одночасно є зоною підвищеного опору. При проходженні через нього імпульсу електричного струму відбувається розігрів голки до температури, яка перевищує температуру кристалізації полімеру  $T_C$  (для матеріалу, який застосовується в Millipede, необхідне нагрівання до  $400^{\circ}\text{C}$ ), і вона "виплавляє" у канавку діаметром близько 10 нм, яка і є бітом. Коли струм переривається, голка остигає, а полімер стає затверділим. Зчитування даних здійснюється шляхом виміру опору "робочої частини" кронштейна. У цьому випадку голка розігрівається тільки до  $300^{\circ}\text{C}$ , при якій полімер ще не розм'якшується. Відбувається "сканування" поверхні носія, і при попаданні голки в канавку інтенсивність тепловідводу від неї різко збільшується, температура зменшується, опір змінюється стрибкоподібно, за рахунок чого й фіксується біт інформації. Принципова відмінність Millipede від перфокарт полягає в можливості багаторазового запису, що забезпечується особливостями в'язкопружних властивостей полімерних систем.

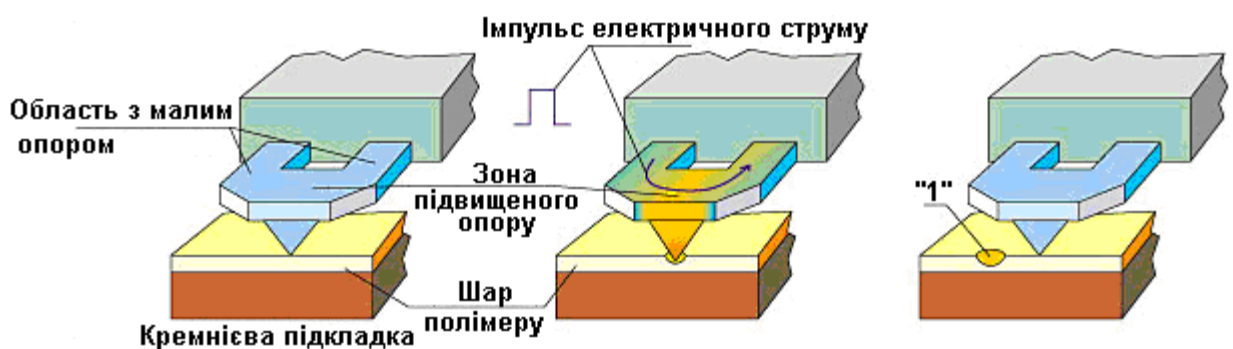


Рисунок 21. – Запис інформації на носій Millipede.

У області канавки полімер знаходиться в напруженому, так званому метастабільному, стані, з якого його можна вивести розігрівом до температури, яка перевищує  $T_C$ . Після "проходу" гарячої голки над канавкою вона "розпрямляється", тобто відбувається стирання даних. За заявою IBM, на сьогодні її фахівцям вдалося досягти довговічності носія більше

100 тис. циклів запису/перезапису Керування масивом голчатих кронштейнів в Millipede здійснюється за допомогою електронних кіл з часовим мультиплексуванням подібно тому, як це робиться в мікросхемах DRAM. Переміщення носія уздовж масиву і його точне позиціонування забезпечуються електромагнітним приводом, який дозволяє одній голці покривати площу розміром 100 x 100 мкм. На даний момент швидкодія складає декілька кілобіт в секунду на одну голку, проте надалі учені розраховують довести його 1–2 Mbps [35]. Енергоспоживання запам'ятовуючих пристроїв на базі Millipede буде близько 100 мВт. У першому зразку щільність запису даних дорівнювала 200 Gb на квадратним дюйм, а потенційна ємність носіїв - 0,5 GB.

За базисну модель організації всіх видів пам'яті можуть бути використані стандарти організації пам'яті некогерентних процесорів [36] і образних комп'ютерів [37].

### **Висновки**

Подальшим етапом інтенсифікації використання сучасної бази знань людства, а також методологічної інтенсифікації її розвитку і вдосконалення стає введенням до геоінформаційно-енергетичних мереж інтелекту від світового океану і всієї біосфери земної кулі, маючи на увазі безконечну множину станів їх структуризації, як пам'ять інформації від початку існування всесвіту без якої зокрема ніколи не зміг би зародитись та існувати інтелект живої мережі.

З мірою накопичення знань стосовно всіх фундаментальних напрямків у розвитку науки стала очевидною неможливість і навидь абсурдність спрощених поглядів на природу людського мислення і його інтелекту та усвідомлення. Це стосується в першу чергу інформаційно-енергетичного самозабезпечення, функціонування як окремого організму, так і суспільства в цілому. І тому з врахуванням накопиченого досвіду і можливості сучасних фізичних структур пам'яті стає можливим в контексті сучасної бази знань, її гармонічного взаємозв'язку глобального підсилення інтелектуального та фізичного самовираження через ефективне використання віртуальних складових інтелектуальної око-процесорної розподіленої геоінформаційно – енергетичної системи. Це означає, що глобальним стратегічним шляхом подальшого розвитку цивілізації є створення всесвітньої мережі оптикоелектронної розподіленої геоінформаційно – енергетичної системи в значній мірі самодостатньої з точки зору об'ємів і фізичних принципів функціонування елементів пам'яті, так їх здібності до функціонального розширення щодо вирішення всіх регіональних проблем в єдиній системі інформаційно енергетичного перетворення подібного дуальності фотонних перетворювачів світла.

## Література

- 1 Кожем'яко В. П., Білан С. С., Кожем'яко О. В., Кожем'яко А. В. Оптико-електронна геоінформаційно-енергетична система, як глобальний засіб гармонійного вирішення проблеми розвитку цивілізації// Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.–2004.–№8, с.5-10.
- 2 Гвозденко А. 10Тб на квадратный дюйм –насколько это реально? //Компьютерное обозрение. – 2001.–№ 37, с.42.
- 3 Материалы для магнитной записи со сверхвысокой плотностью. Коротко о новом. // ТКТ. – 2004.– №1, с.34
- 4 Бараш Л.500Gb на квадратный дюйм – таков прогноз к 2010 году// Компьютерное обозрение.– 2005.–№29, с. 54-55
- 5 Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника. – СПб.: БХВ - Петербург, 2001.-528с.
- 6 Митилино С. FLASH-память–долгожданный реванш. //Компьютерное обозрение.– 2002.–№15, с.24-28.
- 7 Митилино С. Магические кристаллы, или недвижимое в подвижном.// Компьютерное обозрение.– 2003.–№27, с.18-25
- 8 Новый тип памяти для хранения видеофильмов и цифровых фотографий. Коротко о новом.// ТКТ. –2004.– №2, с.32
- 9 <http://itc.ua/16121>
- 10 Митилино С. FLASH: революція // Компьютерное обозрение.–2004.– №5, с.52-55.
- 11 Петров В.В., Крючин А. А., Шанойло С. М., Костюкевич С. А., Кравец В. Г., Лапчук А. С. Оптические диски: история, состояние, перспективы развития: монография. –К.: «Наукова думка», 2004.–176с.
- 12 Ягофаров Т. Blu-ray HD DVD: за кем последнее слово? // Компьютерное обозрение. – 2004.– №50, с.66-67.
- 13 <http://www.shynok.com.ua>
- 14 <http://www.bluraydisc.com>
- 15 Гвозденко А. Iomega: на пути к 800-гигабайтовым DVD// Компьютерное обозрение. –2005.– №22, с.68.
- 16 <http://www.c3d.com>
- 17 Перезаписываемая оптическая память гигантской емкости. Коротко о новом. //ТКТ. – 2002.– №8, с.33
- 18 Многослойная оптическая запись. Коротко о новом.// ТКТ. –2001.– №1, с.28
- 19 Кольер Р, Беркхарт К., Лиин Л. Оптическая голография. – М: Мир, 1973.
- 20 Носов Ю. Голографическая апамять.// Квант. –1991.–№10, с.13 – 24.
- 21 Винецкий В.Л., Кухтарев Н. В. Динамическая голография. – К.: Наукова думка, 1983.–128с.
- 22 <http://www.ixbt.com/mainboard/halo-molec-mem.shtml>
- 23 Митилино С. Вторжение высокочастотных технологий хранения данных. Голография // Компьютерное обозрение.–2001.– №41, с. 42-46.
- 24 <http://www.from-ua.com/technology/40f8fdd06d5c8/>
- 25 Котов В. Б., Политова С. В. Особенности использования пар толстых голограмм как слоїв оптической памяти.// Радиотехника и электроника. –2004., том 49, №5.
- 26 Акаев А. А и др. Современное состояние исследований по голографическим запоминающим устройствам с трехмерным хранением информации // Оптический журнал .–1999.– т.66, №1, с.78 – 83.
- 27 Барачевский В. А. Светочувствительные органические среды для оптической памяти высокой емкости.// Журнал научной и прикладной фотографии. –1998.–т. 43, №5, стр.79
- 28 Гвозденко А. Голографическая память превращается в реальность.// Компьютерное

- обозрение.–2002.– №13, с.50-51.
- 29 <http://itc.ua/15332>
- 30 Носители информации. Коротко о новом.// ТКТ. – 2002.– №6, с.34
- 31 Носитель оптической записи нового поколения. Коротко о новом. // ТКТ. –2004.– №1, с.34
- 32 Митилино С. Вторжение высокочастотных технологий хранения данных. Обзор разработок.// Компьютерное обозрение.– 2001.–№42, с. 48-51.
- 33 <http://www.itc.ua/6575>
- 34 Гвозденко А. Фазовая память–еще одна технология энергонезависимых носителей// Компьютерное обозрение.– 2005.–№21, с.56
- 35 Гвозденко А. Milipede–«перфокарта» емкостью в гигабайты. //Компьютерное обозрение.–2002.– №25, с.42.
- 36 Натрошвили О. Г., Кожемяко В. П., Саникидзе Д. О. Организация оптоэлектронных некогерентных процессоров ЦВМ.– Тбилиси: Ганатлеба, 1989. – 512с.
- 37 Кожемяко В. П., Тимченко Л. И., Яровий А. А. Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис для побудови спеціалізованих модулів образного комп'ютера. Монографія. –Вінниця: «Універсум», 2005.–160с.
- 38 Оптические дисковые системы: Пер. с англ./ Г. Боухьюз, Дж. Браат, А. Хейсер.–М.: Радио и связь, 1991.–280с.: ил.
- 39 Балашов Е. П., Кноль А. И. Многофункциональные запоминающие устройства. – Л.: Энергия, 1972. – 140с.
- 40 Бурцев В. С., Федоров В. Б. Ассоциативная память на принципах оптической обработки информации для СУПЕ-ЭВМ нового поколения // Квантовая электроника – 1992. – №8. – с.795-803.
- 41 Кисилев Б. С., Кулаков Н. Ю. Оптическая реализация ассоциативной памяти высокого порядка.// Квантовая электроника – 1990. – №7. – с.817-818.
- 42 Вербовецкий А. А. Современные нетрадиционные методы построения ассоциативных оптоэлектронных ЗУ// Зарубежная радиоэлектроника. – 1998. – №2. – с.18 – 37.
- 43 Микаэлян А. Л. Оптические методы в информатике: запись, обработка и передача информации. – М.: Наука, 1990.
- 44 Симонов А. Н., Ураяв Д. В., Шибав В. П., Костроми С. Г. Фотореверсивная оптическая запись в пленках аморфных азосодержащих полимеров. //Квантовая электроника.–2002.– т.32, №2, с.33-35.
- 45 Попо А. Р. Память биологических и технических систем. //Успехи современной радиоэлектроники. –2002.– №4,с.65-66.
- 46 Петров М. П., Белотицкий В. И., Кузин Е. А., Спиринов В. В. Полностью оптическая кольцевая волоконная память долговременного хранения, основанная на использовании ВКР// Квантовая электроника. – 1995. – т.22, №12. – с.1245.