

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ПАМ'ЯТІ КОМП'ЮТЕРА

Розвиток сучасної електронної технології, яке умовно почалося 50 років тому з винаходу транзистора і десятима роками пізніше - твердотільної інтегральної схеми, як і раніше вписується у відкритий в 1965 році співробітником корпорації Intel Гордоном Муром закон: кожен новий чіп, вироблений через 18-24 місяці після попереднього, має приблизно вдвічі більшу ємність пам'яті. Даний рух має природним чином закінчитися через 10-15 років з огляду на необхідність переходу до використання взаємодії елементів на основі квантової механіки.

Дійсно, розміри елементів повинні бути порівнянні з нанометром (нм), рівним 10^{-9} метра, який в тисячу разів менше мікрметра (мкм), або, постарому, мікрона (мк).

В останні роки намітився реальний вихід із ситуації, заснований на досягненнях фізичних і хімічних наук. Розглянемо основні тенденції розвитку пам'яті комп'ютерів.

Комплект модулів пам'яті 128 ГБ (8 x 16 ГБ) DDR4

Компанія Corsair, світовий лідер високопродуктивних компонентів для ПК, оголосила перший в світі комплект модулів небуферизованої оперативної пам'яті DDR4 для персональних комп'ютерів із загальною ємністю 128 ГБ. Запропоновано дві серії: Vengeance LPX і Dominator Platinum.

Комплект нових модулів DDR4 від Corsair ємністю 128 ГБ (8 x 16 ГБ) розроблений для самих «свіжих» материнських плат серії Intel X99 з підтримкою XMP 2.0. Запропоновано комплекти для тактових частот 2666 і 2400 МГц, але очікується поліпшення цього параметра в самому найближчому майбутньому. Як і вся інша продукція Corsair, нові модулі пам'яті мають довічну гарантію.

XMP 2.0 на материнських платах - це Extreme Memory Profile (профіль екстремальної пам'яті) від Intel, який дозволяє змінювати часові параметри доступу до пам'яті, грубо кажучи, в трьох режимах: звичайний, ентузіаст (enthusiast) і екстремал (extreme), тобто розганяти модулі пам'яті на свій смак, але без порушення узгодженості декількох параметрів.

Пам'ять DDR4 має повну назву DDR4 SDRAM, тобто Double Data Rate версія 4 Synchronous Dynamic Random Access Memory або четвертий за рахунком інтерфейс з подвоєною швидкістю передачі даних (DDR) синхронної динамічної пам'яті RAM. Слово «динамічна» в цій назві означає, що навіть з поданням живлення відбувається розряд комірки пам'яті, тому необхідна спеціальна службова процедура «підзарядки» комірок, які давно не оновлювалися.

Слово «синхронна» відзначає ще один недолік - команди подаються не в будь-який момент (асинхронний принцип роботи), а тільки по тактовому сигналу. Незважаючи на обидва недоліки, пам'ять SDRAM дозволяє знизити виробничі витрати і підвищити об'єм в порівнянні з іншими типами RAM, а з затримками виробники борються еволюційними методами, постійно підвищуючи тактову частоту (яка як раз і визначає синхронізацію з шиною). Основним трюком на цьому шляху залишається конвеєрна обробка запитів звернення до пам'яті SDRAM, що передбачає буферізування або відсутність буфера при зверненні до пам'яті для читання або запису.

Пам'ять DDR4 SDRAM з'явилася на ринку в другому кварталі 2014 року. Стандарт DDR4 дозволяє мати модуль пам'яті ємністю 128 ГБ (замість 16 ГБ в DDR3), причому передбачається напруга живлення 1,2 В з тактовою частотою 1600 ... 3200 МГц (порівняйте: 800 ... 2400 МГц з напругою 1,5 або 1,65 В для DDR3). Тобто, стандарт DDR4 залишає величезні перспективи для подальшого зростання характеристик пам'яті, якщо зіставити з оголошеними модулями компанії Corsair.

Резистивна пам'ять RRAM

RRAM - мемристор - пристрій, здатний змінювати опір в залежності від величини струму, який проходить. Сама назва елемента є похідним від англійських слів memory (пам'ять) і resistor (електричний опір), тобто по суті прилад має здатність "пам'ятати" обсяг заряду, який встиг пройти по ланцюгу до моменту відключення живлення.

Мемристор був запропонований в 1971 році професором Леоном Чуа з університету Каліфорнії в Берклі. Довгий час мемристор вважався лише теоретичною концепцією, нездійсненою на практиці, хоча деякі вчені і пророкували цьому гіпотетичному елементу велике і славне майбутнє. Сам Леон Чуа стверджував, що рано чи пізно мемристор, поряд з конденсатором, резистором і котушкою індуктивності, стане четвертим базовим елементом електронних схем. Але головна роль мемристора, на думку професора Чуа, полягає в радикальній зміні принципів створення електронних схем. Аж до теперішнього часу наріжним каменем схемотехніки було співвідношення між напругою і зарядом на тих чи інших елементах схеми, однак більш перспективним підходом, стверджує професор, є розгляд співвідношення між зарядом і швидкістю зміни напруги.

Лабораторний зразок мемристора був створений в 2008 році колективом вчених на чолі з Р.С. Вільямсом в дослідницькій лабораторії фірми Hewlett-Packard. Явище гістерезису, що спостерігається в мемристорі, дозволяє використовувати його в якості елемента пам'яті.

У порівнянні з сучасними типами пам'яті мемристори володіють важливими перевагами. Оскільки вони енергонезалежний і мають високу швидкодію, запам'ятовуючі пристрої на їх основі дозволять замінити флеш-пам'ять і пам'ять DRAM. Завантаження відбуватиметься миттєво, минаючи зчитування інформації з "повільних" жорстких дисків.

На думку Грега Снайдера (фахівець компанії HP), мемристор стане одним з основних елементів нанопристроїв, емулює роботу людського мозку (мініатюрні нанопристрої будуть об'єднані в єдину мережу, а мемристор стане елементом, відповідальним за "пам'ять" штучного інтелекту).

Як стверджується, створення нового елемента може стати найбільш значною подією десятиліття в мікроелектроніці і привести до кардинальних змін в технології зберігання інформації, оскільки мемристор здатний зберігати дані без витрат енергії на протязі тривалого часу. Мікросхеми пам'яті, побудовані на базі мемристоров, забезпечать можливість моментального включення комп'ютерів за рахунок відмови від необхідності початкового завантаження, зниження енергоспоживання мобільних пристроїв та інші перспективи.

На думку HP, нова технологія цілком може претендувати на роль універсальної пам'яті майбутнього, яка одночасно замінить використовувану зараз динамічну пам'ять з довільним доступом і флеш-пам'ять.

Мемристори дозволять створювати чіпи пам'яті майбутнього, які здатні зберігати дані без електрики протягом тривалого періоду часу, що дозволить уникнути довгого процесу завантаження комп'ютерів, підвищити їх продуктивність, а також багаторазово знизити енергоспоживання електронної техніки.

Магніторезистивна пам'ять (MRAM)

MRAM - оперативна пам'ять, в якому, на відміну від інших типів пам'яті, інформація зберігається не у вигляді електричних зарядів або струмів, а в магнітних елементах. Останні сформовані з двох феромагнітних шарів, розділених тонким шаром діелектрика. Магніторезистивна пам'ять володіє швидкодією, яку можна порівняти з пам'яттю типу SRAM, такий же щільністю комірок, але меншим енергоспоживанням, ніж у пам'яті типу DRAM. Вона швидша і не деградує в часі в порівнянні з Flash-пам'яттю.

PRAM-пам'ять (phase change random access memory)

Мова йде про так звану "пам'ять зі зміною фазового стану" (phase change memory, PCM або PRAM), заснованої на здатності халькогеніду (chalcogenide) під впливом нагріву і електричних полів змінювати свій стан з непровідного аморфного в провідний кристалічний. Даний вид пам'яті прекрасно справляється як із зберіганням великих об'ємів даних, так і зі зберіганням

виконуваного коду, уявляючи, таким чином, дивовижний сплав флеш-пам'яті і динамічної пам'яті з довільним доступом.

При нагріванні і наступному охолодженні халькогенід швидко переходить з стабільного аморфного в стабільний кристалічний стан. У аморфному стані коефіцієнт відбивання матеріалу невеликий, а опір великий, в кристалічному - коефіцієнт віддзеркалення великий, а опір малий. Це і дозволяє зберігати в пам'яті такого типу логічні "0" і "1". Використовуваний в сучасних схемах пам'яті халькогенід - сплав германію, сурми і телуру. Комірка пам'яті складається з верхнього електрода, шару халькогеніда і резистивного нагрівального елемента. Так само, як і в MRAM, при зчитуванні даних вимірюється опір комірки пам'яті, але на відміну від MRAM відношення опорів велике - більше 100. При запису даних халькогенід нагрівається до температури, що перевищує його точку плавлення, і потім швидко охолоджується, тобто переходить в аморфну фазу. Щоб перевести матеріал в кристалічний стан, комірка нагрівається до температури нижче точки плавлення і витримується при ній протягом ~ 50 нс.

До переваг PCM-пам'яті відносяться: проста структура, мала площа комірки пам'яті, можливість неруйнівного зчитування і селективного перезапису даних без стирання, мала споживана потужність і велика кількість циклів перезапису - більш 10^{13} . PCM-матриці, які не потребують при виготовленні високо температурних процесів, легко об'єднувати з кремнієвими логічними пристроями.

Лідерами дослідного виробництва PCM в даний час є Samsung і спільне підприємство Intel і STMicroelectronics – компанія Numonyx.

Освоюючи PRAM-пам'ять, Samsung сподівається в майбутньому зайняти лідируючі позиції на цьому ринку. Samsung Electronics Co. Ltd розпочала поставки першого повністю функціонального прототипу PRAM-чіпа пам'яті (Phase-change Random Access Memory, або пам'ять з довільним доступом на основі фазових перетворень) ємністю 512 Мбіт.

Нова технологія дозволяє перезаписувати дані без попереднього затирання вже існуючих, що виливається в 30-кратну перевагу в швидкості над традиційною флеш-пам'яттю. Очікується десятикратне збільшення терміну служби PRAM-чипів. Нові чіпи компактніше і, що важливо, на 10% дешевше.

Сегнетоелектрична енергонезалежна пам'ять (FRAM)

FRAM за своєю будовою схожа з DRAM (конденсатор на основі сегнетоелектрика). Запис відбувається шляхом зміни вектора поляризації сегнетоелектричного шару різницею потенціалів між електродами. Серед переваг FRAM перед Flash-пам'яттю можна виділити низьке енергоспоживання, швидкий запис інформації і суттєво збільшене максимальне число циклів

перезапису, що перевищує 10^{14} . До недоліків FRAM відносять набагато більш низьку щільність запису, обмежену ємність і більш високу вартість.

Одним зі світових лідерів в області розробки і виробництва електронних компонентів самого різного призначення за запатентованою технологією створення енергонезалежних сегнетоелектричних ОЗП (FRAM) є Ramtron International. У число ліцензіатів або партнерів по освоєнню технології FRAM входять такі великі компанії, як Texas Instruments, Fujitsu, Toshiba, Samsung, Hynix і ін. В їх роботах дані прогнози подальшого розвитку пристроїв FRAM, розглянуті перспективи заміни Flash-пам'яті і зроблено висновок про те, що пристрої перепрограмовуваної пам'яті на основі сегнетоелектриків мають всі шанси зайняти міцну конкурентоспроможну позицію серед інших пристроїв енергонезалежної пам'яті за умови, що будуть вирішені проблеми їх старіння і надійності, а також забезпечена можливість неруйнуючого зчитування інформації.

Полімерна пам'ять

Шведська компанія ThinFilm вважає, що пам'ять майбутнього буде заснована на пластмасі. Дуже тонкий лист полімеру, затиснутий між двома сітками крихітних електродів, являє собою матрицю пам'яті. В кожному перетині шахівниці електродів (один провід зверху шару полімеру, а інший - знизу його) створюється бістабільна комірка пам'яті. Електрична напруга, прикладена до даної комірки, може змінювати структуру полімеру, переводячи його з одного стабільного стану в інше. Альтернативні стани полімеру відповідають логічним нулю і одиниці. Даний стан може зберігатися досить тривалий час, так як зміна стану полімеру носить хімічний характер. З цієї ж причини стан комірки енергонезалежний.

Практично технологія створення пристроїв пам'яті даного виду може являти собою розкочування рулону полімеру і нагадувати роботу газетної друкарні. Особливо вражає щільність такої пам'яті. Якщо зараз одна комірка SRAM займає площу розміром 4-6 квадратних мікрометрів, пропонована технологія дозволить розмістити елемент пам'яті на площі близько однієї чверті квадратного мікрометра. Причина цього - відсутність у складі комірки активних елементів (транзисторів). Активні елементи адресування, зчитування і запису можуть знаходитися по периметру матриці пам'яті або, як альтернатива, вище або нижче її. Якщо врахувати, що сучасна пам'ять ємністю в один гігабіт вимагає застосування від 1,5 до 6,5 млрд. транзисторів, то система полімерної пам'яті обмежується приблизно половиною мільйона активних елементів. Для підвищення щільності пам'яті листи полімеру можуть бути складені стопкою. Згідно з розрахунками фахівців фірми ThinFilm, пристрій пам'яті розміром з кредитну картку, побудований за цією технологією, міг б зберігати 60 000 фільмів в стандарті DVD; або 126 років музики в стандарті MP3; або 400 000

компакт-дисків; або 250 мільйонів цифрових фотографій високої роздільної здатності.

Молекулярна пам'ять

Якщо попередній підхід до вдосконалення систем пам'яті можна умовно назвати еволюційним (шляхом масштабування провідники стають все тонше, також поступово тоншає шар полімеру), то воістину революційним є ідея використання в якості елементів електронної техніки молекул.

Вже відносно давно був створений прототип системи пам'яті, що використовує в якості комірок молекули протеїну, який називається бактеріородопсин (bacteriorhodopsin). Він має пурпурний колір, поглинає світло і присутній в мембрані мікроорганізму, з назвою *halobacterium halobium*. Цей мікроорганізм був виявлений в соляних болотах, де температура може досягати +150° С. Коли рівень вмісту кисню в навколишньому середовищі настільки низький, що для отримання енергії неможливо використовувати подих (окислювання), він для фотосинтезу використовує протеїн.

Бактеріородопсин був обраний тому, що фотоцикл (послідовність структурних змін, які молекула зазнає при реакції зі світлом) робить цю молекулу ідеальним логічним запам'ятовуючим елементом типу «&» або типу перемикача з одного стану в інший (тригер). Як показали дослідження, bR-стан (логічне значення «0») і Q-стан (логічне значення «1») є проміжними станами молекули і можуть залишатися стабільними протягом багатьох 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. Дані, записані в такому пристрої зберігання даних, можуть зберігатися приблизно п'ять років.

Був побудований прототип системи пам'яті, в якому бактеріородопсин запам'ятовує дані в тривимірній матриці. Така матриця являє собою кювету (прозора посудина), заповнену поліакридом гелем, в який поміщений протеїн. Кювета має довгасту форму розміром 1x1x2 дюйма. Протеїн, який знаходиться в bR-стані, фіксується в просторі при полімеризації гелю. Кювету оточують батарея лазерів і детекторна матриця, побудована на базі приладу, що використовує принцип зарядової інжекції (CID - Charge Injection Device), які служать для запису і читання даних.

При запису даних для перекладу молекул у Q-стан спочатку треба використовувати жовтий «сторінковий» лазер. Просторовий світловий модулятор (SLM), який, як говорилося раніше, являє собою LCD-матрицю, що створює маску на шляху променя, викликає виникнення активної (збудженої) площини в матеріалі усередині кювети. Ця енергоактивна площина є сторінкою даних, яка може вміщати масив розміром 4096x4096 комірок.

Для повернення протеїну в стан спокою використовується червоний лазер, що записує і розташовується під прямим кутом по відношенню до жовтого. Другий SLM також управляється матрицею двійкових даних і, таким чином, створює на шляху променя відповідну маску, тому опроміненню піддаються тільки певні точки сторінки. Молекули в цих місцях перейдуть у Q-стан і будуть представляти двійкову одиницю. Частина сторінки повернеться в початкове bR-стан і буде представляти виконавчі нулі. Для того щоб прочитати дані, треба знову використовувати сторінковий лазер, який переводить читану сторінку в Q-стан. Це робиться для того, щоб в подальшому за допомогою відмінності в спектрах поглинання ідентифікувати виконавчі нулі і одиниці.

Для стирання даних досить короткого імпульсу синього лазера, щоб повернути молекули з Q-стану в початковий bR-стан. Синє світло не обов'язково повинно йти від лазера – можна стерти всю кювету за допомогою звичайної ультрафіолетової лампи.

Запропонована система по швидкодії близька до напівпровідникової пам'яті. Теоретично кювета, що містить протеїн, може вмістити близько одного терабіта даних. Обмеження на ємність пов'язані, в основному, з проблемами лінзової системи і якістю протеїну.

Така молекулярна пам'ять «першого покоління» вже має певні переваги в порівнянні з традиційною напівпровідниковою пам'яттю. По-перше, вона заснована на протеїні, що виробляється у великій кількості і за невисокою ціною, чому сприяють досягнення генної інженерії. По-друге, система може функціонувати в більш широкому діапазоні температур, ніж існуюча напівпровідникова пам'ять. По-третє, така пам'ять енергонезалежна. Нарешті, кювети з даними можна довго і безпечно зберігати.