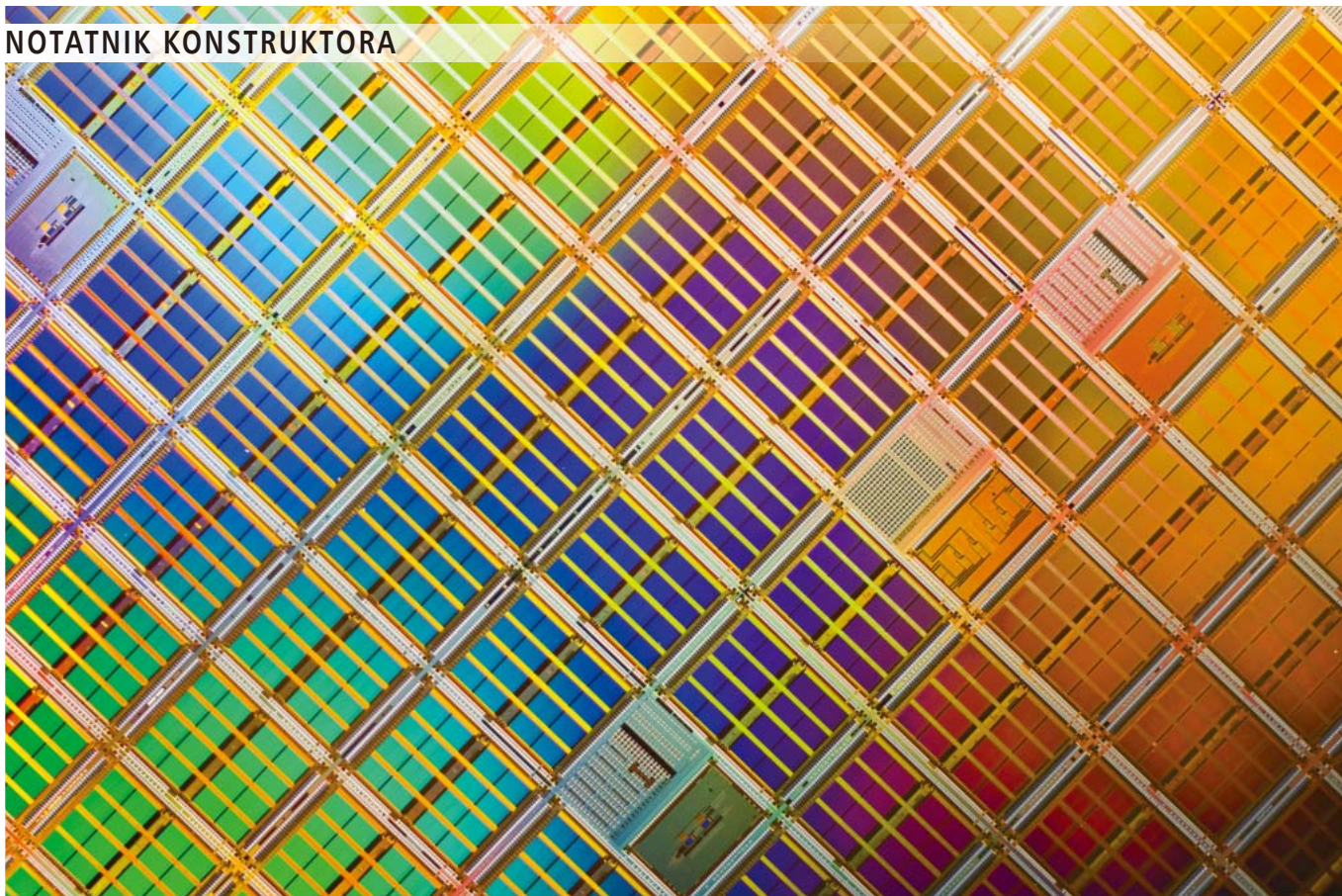


NOTATNIK KONSTRUKTORA



Pamięci nieulotne – technologie i trendy

Gwałtowny wzrost zapotrzebowania na urządzenia przenośne, takie jak aparaty fotograficzne, kamery, odtwarzacze multimedialne, tablety i smartfony, spowodował dynamiczny rozwój podzespołów przeznaczonych do ich konstrukcji. Mam tu na myśli przede wszystkim wyświetlacze, panele dotykowe, pamięci nieulotne oraz mikrokontrolery zdolne do „udźwignięcia” systemu operacyjnego. Jako użytkownicy przeważnie nie interesujemy się, co jest sercem takiego urządzenia i żądamy jedynie, aby działało ono płynnie i mieściło jak najwięcej danych, a więc przede wszystkim plików multimedialnych. Rosnące wymagania rynku musiały w takiej sytuacji spowodować rozwój technologii wytwarzania pamięci nieulotnych.

Pamięć nieulotna nie potrzebuje zasilania, aby poprawnie przechowywać dane. Zwykle zasilanie pamięci nieulotnej jest wymagane, jeśli dane są zapisywane lub odczytywane. Istnieją co prawda pamięci zwane nVRAM, które składają się z pamięci statycznej RAM oraz akumulatora lub baterii (ostatnio coraz częściej stosuje się superkondensatory), ale nie będziemy się nimi zajmowali. Gdy pamięć nieulotna jest nieużywana, to możemy odłączyć jej zasilanie lub usunąć ją z gniazda, aby oszczędzać energię.

Najlepiej znanymi przez użytkowników i najbardziej popularnymi są pamięci Flash, ale jednocześnie są rozwijane inne technologie, takie jak FeRAM, MRAM i OUM. Omówimy je pokrótce sygnalizując ich wady i zalety.

Flash

Technologie Flash NOR i Flash NAND dominowały rynek półprzewodnikowych pamięci nieulotnych. Pamięci NOR, które zaczęto oferować około 1988 r., doprowadzi-

ły do wycofania z użycia układów EPROM i EEPROM.

Komórki pamięci Flash NOR są połączone równolegle, co umożliwia ich bezpośrednie adresowanie i łatwy, swobodny dostęp do pojedynczych słów danych. Z tego powodu są one przeznaczone przede wszystkim do zastosowania w aplikacjach niewymagających dużej gęstości zapisu, w których pamięć jest przede wszystkim odczytywana oraz jest wymagane, aby odczyt przebiegał z bardzo dużą prędkością. Łatwo zorientować się, że ten rodzaj technologii będzie doskonały do wytwarzania pamięci programu dla mikroprocesora. Do wad pamięci Flash NOR należy zaliczyć bardzo małą prędkość zapisu i kasowania danych, stosunkowo niedużą pojemność uzyskiwaną z milimetra kwadratowego powierzchni struktury, a przez to również relatywnie wysoką cenę.

Pamięci wykonane w technologii Flash NAND wprowadzono na rynek niespełna rok później z przeznaczeniem przede wszystkim dla dysków półprzewodnikowych i co należy podkreślić, świetnie się do tego nadają. Na podłożu półprzewodnikowym o tej samej powierzchni, co w pamięci NOR, można

wykonać pamięć NAND o około dwukrotnie większej pojemności. Pamięć tę można szybko programować i kasować, wolniej niż w pamięciach NOR przebiega odczyt danych. Liczba cykli programowania jest o rząd większa, niż dla NOR, a przy tym te pamięci są tanie. Niestety, operacje zapisu/odczytu muszą przebiegać sekwencyjnie, więc ten rodzaj pamięci raczej nie nadaje się wprost tj. bez stosowania żadnych „zabiegów” do pełnienia roli pamięci programu dla mikroprocesora.

Kiedy do swojej aplikacji wybrać pamięć NOR, a kiedy NAND? Odpowiedź zależy od wymagań systemu docelowego. Krótkie porównanie podstawowych parametrów pamięci wykonanych w technologii NOR i NAND umieszczono w tabeli 1. Dla systemu, który musi być uruchamiany z pamięci Flash, wykonywać kod programu w niej zapamiętany lub dla takiego, w którym jest istotny czas opóźnienia odczytu, odpowiedzią będzie pamięć NOR. Dla aplikacji przechowujących dane lepsza będzie pamięć NAND.

Stosując pamięci Flash należy pamiętać, że zapamiętanie informacji wymaga wcześniejszego skasowania komórki pamięci. W pamięciach NAND operacje zapisu i kasowania przebiegają blokami (sektorami) o określonej wielkości – nie można po prostu zapamiętać pojedynczego słowa, a gdyby zaszła taka konieczność, to wewnętrzny kontroler pamięci zadba o to, aby pozostała zawartość bloku nie zmieniła się.

Niestety, przez różne cechy i parametry pamięci Flash konstruktor nie może zastosować tylko jednego ich rodzaju w urządzeniu, takim jak na przykład smartfon. Wymaga on zarówno sporego „magazynu” na przechowywane dane, jak i pamięci programu, najczęściej z zapisanym kodem systemu operacyjnego. Dlatego w takich aplikacjach najczęściej stosuje się albo oba typy pamięci, albo NAND w połączeniu z pamięcią PSRAM lub DRAM, do której jest przepisywany kod programu po załączeniu urządzenia i z niej uruchamiany.

FeRAM

FeRAM jest rodzajem pamięci nieulotnej, w której użyto efektu ferroelektrycznego do zapamiętywania bitów słowa danych. Efekt ten polega na zdolności materiału do przechowywania polaryzacji elektrycznej również przy nieobecności pola elektrycznego,

które tę polaryzację wywołało. Komórka pamięci jest tworzona poprzez nałożenie materiału ferroelektrycznego w postaci krystalicznej pomiędzy dwa doprowadzenia płaskich elektrod w taki sposób, aby został utworzony kondensator z materiałem ferroelektrycznym jako dielektrykiem. Konstrukcja tego kondensatora jest zbliżona do typowej komórki pamięci DRAM z tym, że zamiast przechowywać informację w postaci naładowanego kondensatora, bit jest przechowywany w postaci polaryzacji ładunków w obrębie struktury krystalicznej. W ten sposób – poprzez zmianę polaryzacji ładunków za pomocą pola elektrycznego wewnątrz kondensatora – można tworzyć i zapamiętywać dwa stabilne stany. Stany te umownie mogą odpowiadać wartościom logicznym bitów, to jest „0” i „1”.

Prosta zasada działania, niemalże identyczna z tą stosowaną w pamięciach RAM, umożliwia konstrukcję nieskomplikowanych obwodów zapisu i odczytu komórek pamięci. Jak wspomniano wcześniej, materiał ferroelektryczny zachowuje polaryzację ładunków pomimo zaniku pola elektrycznego i w związku z tym, nie tak jak w pamięciach RAM, dane mogą być przechowywane w sposób nieulotny. Zbudowana z jego wykorzystaniem komórka pamięci nie wymaga również okresowego odświeżania.

Pamięć FRAM jest odporna na działania zewnętrznego pola magnetycznego. Jej zasada działania, nie ma nic wspólnego z ferromagnetyzmem. Podobny jest jedynie opis zjawiska fizycznego: w przypadku materiałów ferroelektrycznych polaryzacji ulegają ładunki, natomiast w przypadku materiałów ferromagnetycznych – domeny magnetyczne. Kryształ używany do konstrukcji komórki pamięci ma ruchomy atom w środku swojej struktury (oznaczony kolorem żółtym). Przyłożenie pola elektrycznego powoduje, że „mobilny” atom przesuwa się w kierunku działania sił pola. Odwrócenie polaryzacji pola powoduje przemieszczanie się atomu w kierunku przeciwnym. Pozycje atomu na „górze” i „dole” struktury krystalicznej są stabilne. Atom pozostaje w jednej z nich w przypadku braku pola elektrycznego. Jako komórka pamięci cyfrowej, taka struktura jest wręcz idealna: ma dwa stany stabilne i potrzebuje niewielkiej mocy do zmiany stanu, który zachowuje nawet mimo działania różnych czynników zewnętrznych.



Mimo, iż podstawowym elementem komórki pamięci jest kondensator, to jednak bity nie są zapamiętywane jako ładunek liniowy. Odczyt takiej komórki pamięci wymaga detekcji położenia atomu wewnątrz struktury krystalicznej. Niestety, nie może ono być rozpoznane bezpośrednio i musi tu być używany pewien „zabieg”. Do kondensatora jest przykładane napięcie. Na skutek tego pomiędzy jego okładzinami pojawia się pole elektryczne. Ruchomy atom przesuwa się zgodnie z kierunkiem działania pola, lub pozostaje w spoczynku, jeśli jego położenie jest z nim zgodne. W środku struktury kryształu występuje stan równowagi, który utrzymuje pozostałe atomy w ściśle określonych położeniach sieci krystalicznej, a wypadkowe pole elektryczne jest równe 0. Jeśli ruchomy atom przemieszcza się, to powoduje zaburzenie, co skutkuje impulsem energetycznym. Impuls ten dodaje się do ładunku zgromadzonego przez kondensator. Na skutek tego jedne kondensatory będą naładowane do wartości ładunku wymuszonej przez pole elektryczne a inne będą miały ładunek będący kombinacją oddziaływania pola

Tabela 1. Porównanie parametrów pamięci NAND i NOR (na podstawie materiałów firmy Toshiba)

Parametr	NAND Flash (x8)	NOR Flash (x16)
Gęstość	512 Mb...4 Gb	16 Mb...256 Mb
Prędkość odczytu	16 MB/s	55 MB/s
Prędkość zapisu	6,9 MB/s	0,16 MB/s
Prędkość kasowania	64 MB/s	0,032 MB/s
Prędkość programowania (kasowanie + zapis)	6,1 MB/s	0,026 MB/s
Interfejs	Dostęp pośredni	Dostęp swobodny
Aplikacje	Pamięć programu lub pamięć danych	Pamięć programu

NOTATNIK KONSTRUKTORA

elektrycznego i ruchu atomu. Co prawda, odczyt pamięci wymaga przemieszczenia atomu, ale należy pamiętać, że atom przebywa bardzo krótką drogę. Jego położenie zmienia się w czasie 1 nanosekundy, a cała operacja odczytu zajmuje około 70 nanosekund i to głównie ze względu na prędkość interfejsu.

Łatwo na podstawie powyższego opisu wywnioskować, jak będzie wyglądał obwód określający stan bitu. Będzie nim rodzaj komparatora porównującego ładunek odebrany z komórki pamięci z pewnym poziomem odniesienia. Dobrze, a co ze zmianą polaryzacji ładunku? Przecież podczas odczytu atom przemieszcza się wewnątrz struktury. W związku z przyjętą metodą odczytu, każdemu cyklowi dostępu do pamięci towarzyszy rodzaj operacji odświeżania. A co w związku z tym z czasem dostępu do pamięci? Czy nie jest przez to odświeżanie wydłużany? Niestety tak. Wpływ odświeżania na czas odczytu pamięci FRAM jest znaczny, ponieważ zajmuje ono aż 50 nanosekund.

Operacja zapisu jest bardzo podobna do opisywanego wcześniej odczytu. Inaczej niż inne rodzaje pamięci programowane elektrycznie, FRAM nie wymaga przyłożenia wysokiego napięcia czy też długiego czasu zapisu. Wewnętrzny obwód przykładu napięcia do okładzin kondensatora ferroelektrycznego. Powoduje to odpowiednie przemieszczenie ruchomego atomu i polaryzację kryształów. Jeśli jest to potrzebne, nowe dane po prostu zmieniają stan polaryzacji kryształu ferroelektrycznego. Jak przy odczycie, zmiana stanu kryształu zajmuje ok. 1 nanosekundę, a cała operacja zapisu około 70 nanosekund (7×10^{-8} s!). Nieporównywalnie krótki czas, jeśli odnieść go np. do pamięci FLASH.

MRAM

Pamięć MRAM przechowuje informację w kanapce składającej się z dwóch cienkich warstw ferromagnetyka przedzielonych izolatorem. Opór elektryczny takiej „kanapki” jest zależny od tego, czy spiny w warstwach ferromagnetycznych są ułożone w tym samym kierunku (mała rezystancja), czy też są zorientowane przeciwnie (duża rezystancja). Zmiana kierunku polaryzacji magnetycznej jednej z warstw odpowiada zmianie stanu

bitu. Odbywa się ona za pomocą impulsów prądu dostarczanego selektywnie do poszczególnych komórek. Czas niezbędny do przemagnesowania pamiętającej warstwy magnetycznej ogranicza maksymalną prędkość zapisu danych, podobnie jak na czas odczytu ma znaczący wpływ sposób mierzenia rezystancji.

Producenci i firmy prowadzące badania opracowali wiele różnych technik sterowania magnetycznymi komórkami pamięciowymi, które zapewniają czas dostępu rzędu 20...40 ns, a opracowania eksperymentalne nawet 200 ps! Oprócz dużej szybkości pracy i względnie niewielkiemu apetytowi na energię, najpoważniejszą zaletą pamięci MRAM jest nieograniczona liczba cykli zapisu danych (przypomnijmy, że pamięci Flash mają żywotność 100000...1 mln cykli kasowanie/zapis).

Odczyt stanu bitu polega na pomiarze rezystancji komórki. Poszczególne komórki są wybierane (typowo) przez zasilenie połączonego z nimi tranzystora, który załącza przepływ prądu przez daną komórkę do masy. Jak wspomniano, rezystancja komórki zmienia się ze względu na występowanie zjawiska tunelowania magnetycznego. Odczyt stanu komórki odbywa się za pomocą pomiaru natężenia płynącego przez nią prądu. Typowo, jeśli warstwy ferromagnetyka w kanapce są spolaryzowane w tym samym kierunku, to uznaje się, że jest to „1”, jeśli przeciwnie – „0”.

Podstawową wadą pierwszych pamięci MRAM było duże zapotrzebowanie na energię. W uproszczeniu ich zasada działania opierała się na zmianie polaryzacji magnetycznej na skutek przepływu dużego prądu przez komórkę pamięci. Z drugiej strony, duże pole magnetyczne przy niewielkich odległościach komórek pamięci powodowało również zmiany stanu sąsiadów, więc musiały one mieć stosunkowo duże wymiary. Jednak ze względu na potencjał nowego rodzaju pamięci naukowcy nie poddawali się i wspólnie stworzyli np. używana technika o nazwie SST (*Spin Transfer Switching*), w której do bezpośredniej zmiany polaryzacji domeny magnetycznej jest używany spin „spolaryzowanych” elektronów. Dzięki nowej technice można było znacznie zredukować pobór energii (przy zastosowaniu nowej struktury kompozytowej nowej 50-krotnie mniejszy prąd) oraz zmniejszyć wymiary komórki pamięci. Prognozuje się, że SST umożliwi budowę układów pamięci w technologii 65 nm i mniej. Niestety, przy dużej prędkości pracy pamięci, pomimo zastosowania nowej techniki, jej apetyt na energię nadal jest bardzo duży.

Mimo, iż pamięci MRAM są dostępne w handlu od 2006 r., to jednak wydaje się, że najlepsze czasy dla MRAM’ów dopiero nadejdą. Nadal są opracowywane nowe, konkurencyjne metody zmiany polaryzacji

domeny. Można wspomnieć chociażby o metodzie zmiany polaryzacji pod wpływem temperatury TAS-MRAM (*Thermal Assisted Switching*) lub na skutek przepływu prądu w pionowych kolumnach, co niweluje problem zakłóceń – VDRAM (*Vertical transport MRAM*).

PRAM, OUM

Pod nazwami PRAM (czasami PCRAM – *Phase-change RAM*) i OUM (*Ovonic Unified Memory*) kryje się ten sam rodzaj pamięci nieulotnej, której zasada działania opiera się na zjawisku zmiany rezystancji na skutek zmiany fazy z krystalicznej na amorficzną nośnika krystalicznego. Zmiana fazy jest wykonywana za pomocą temperatury, tj. miejscowego podgrzewania komórki pamięci za pomocą impulsów prądu elektrycznego. Odczyt stanu komórki pamięci jest wykonywane przez pomiar rezystancji nośnika. Autorem koncepcji i prototypów pamięci PRAM jest firma Ovonyx, stąd pamięć określanie pamięć OUM. Obecnie rozwojem tego rodzaju pamięci zajmuje się głównie firma Intel.

Nośnikiem w pamięci PRAM jest stop tellurku antymonu i tellurku galu, podobny do stosowanego w płytach CD-R/W. Co ciekawe, proces zmiany fazy nośnika może być zakończony w przeciągu 10 ns. Typowo pamięci dostępne komercyjnie zapewne na skutek ograniczeń interfejsu realizują zapis pojedynczego bitu w przeciągu około 300 ns. Niewątpliwą zaletą pamięci PRAM jest duża liczba cykli zapisu, która sięga aż 10^{12} ! Co ciekawe, w pojedynczej komórce pamięci można zapisać więcej niż jeden bit informacji.

W 2006 r. firma Samsung wprowadziła do sprzedaży pamięć PRAM o pojemności aż 512 Mb, to jest o znacząco więcej niż dostępne w handlu pamięci FeRAM lub MRAM. Tuż po Samsungu w październiku 2006 r. firmy Intel i STMicroelectronics zademonstrowały własne pamięci PRAM, natomiast w grudniu prezentacji PRAM dokonała firma IBM.

Podsumowanie

W artykule omówiono najbardziej popularne rodzaje pamięci nieulotnych. Konkurencja na tym polu jest bardzo silna i co pewien czas pojawiają się pomysły na nieulotne zapamiętanie informacji. Firmy już wytwarzają pamięci NAND w technologii 25 nm i o strukturach trójwymiarowych, poszukuje się też nowych materiałów do wytwarzania pamięci FeRAM. Ten postęp jest wymuszany przez wymagania rynku i oczekiwania konsumentów. Współczesne trendy można określić za pomocą kilku słów: większa pojemność, większa szybkość pracy, mniejsze zużycie energii i duża niezawodność.

Jacek Bogusz, EP

