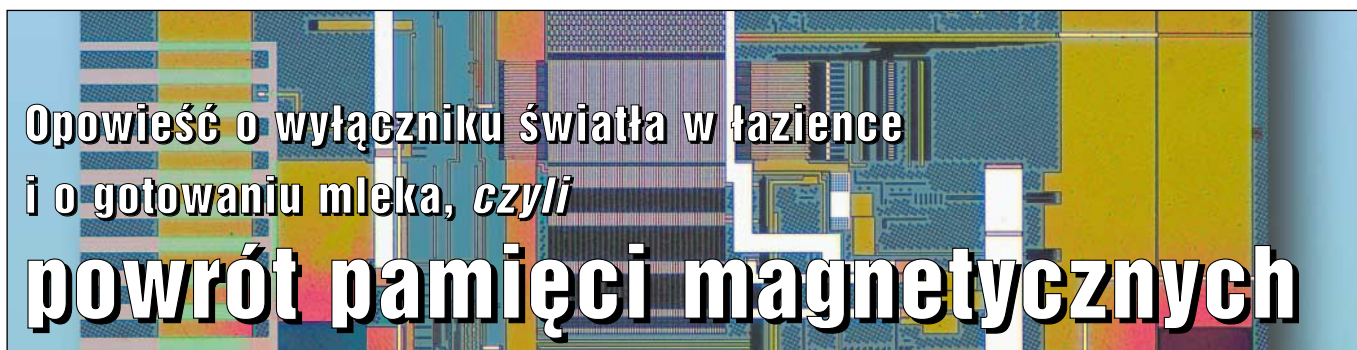




To warto wiedzieć



Czy używasz kart magnetycznych?
Na pewno?

Nie wiadomo dlaczego określenie „karta magnetyczna” mocno utrwaliło się w świadomości jako synonim nowoczesnej, małej, przenośnej, trwałej pamięci. Wielu sądzi, że wszystko, co małe i co jest pamięcią, to po prostu „karta magnetyczna”. Tymczasem dziś klasyczne karty magnetyczne są na wymarciu. Wbrew popularnym wyobrażeniom, pamięć nie musi mieć nic wspólnego z magnetyzmem.

Sytuacja w dziedzinie pamięci jest bardzo interesująca, dlatego warto dokonać przeglądu, zapoznać się z obecnym stanem rzeczy, a zwłaszcza z perspektywami.

Przy okazji okaże się, że być może już niedługo wrócą do łask pamięci magnetyczne, ale w postaci zupełnie innej, niż znane dotąd. A może nie będą to pamięci ferromagnetyczne (MRAM), tylko ferroelektryczne (FRAM)? A może rynek zdominują pamięci typu PM (Polymer Memory), OUM (Ovonic Unified Memory) albo PMCM (Programmable Metallisation Cell memory)?

Czas to pokaże, a póki co, warto zapoznać się z historią i obecnym stanem rzeczy. Na razie trzeba stwierdzić, że...

nie ma pamięci doskonałej

Dobrym przykładem różnorodności wynikającej z braku jednej doskonałej pamięci jest współczesny komputer. Ma on kilka rodzajów pamięci o różnych właściwościach.

Jeśli włączymy radio czy telewizor, zaczynają one normalną pracę co najwyżej kilka sekund po włączeniu zasilania. A komputer?

Komputer potrzebuje nawet kilku minut, żeby się „zabutował” i podjął normalną pracę. Wszystko przez niedoskonałość pamięci. Programy i pliki są kopiowane z pamięci magnetycznej, z dysku twardego, do pamięci RAM i uruchamiane w pamięci RAM. W komputerze jest też niewielka pamięć stała. Kiedyś była to klasyczna pamięć ROM, potem EEPROM, obecnie FLASH. Pamięć ta służy tylko do zapoczątkowania pracy komputera - w niej zawarty jest tzw. BIOS. Po uruchomieniu komputera pamięć ta przestaje pełnić swoją rolę, a cała działalność komputera odbywa się w pamięci RAM.

A gdyby tak nie tylko BIOS, ale cały system operacyjny wpisać nie do pamięci RAM, tylko do równie szybkiej pamięci trwałej, wtedy komputer wystartuje błyskawicznie i w ciągu kilku sekund zgłosi pełną gotowość do pracy. Idąc dalej tym tropem - czy nowoczesne kostki pamięci nie mogłyby zastąpić dysków twardech? Przecież już dziś dostępne są niewielkie „dyski” stałe, bez żadnych części ruchomych, zbudowane ze scalonych modułów pamięci.

Kiedy pojawią się takie komputery?

Trudno powiedzieć, ale najwcześniej za kilka lat. W komputerze takim byłby tylko jeden rodzaj pamięci. Uniwersalna pamięć musiałaby wykazywać następujące główne cechy:

- **bardzo dużą pojemność**
- **możliwość wielokrotnego zapisu i odczytu**
- **nieograniczoną trwałość zawartości**
- **dużą szybkość zapisu i odczytu**
- **niską cenę.**

Choć żadna ze współczesnych pamięci nie spełnia wszystkich tych cech, warto się

im przyjrzeć. Pamięć może być wykonana w technologii elektronicznej (układy scalone), magnetycznej (dyskieta, twardy dysk, taśma) i optycznej (wszystkie odmiany CD i DVD), ale też w technologii biologicznej, mechanicznej, pneumatycznej czy hydraulicznej.

Najprostszym przykładem pamięci może być wyłącznik światła w Twojej łazience. Ma on dwa stany stabilne, które możemy oznaczyć 0, 1. Zmiany stanu tej mechanicznej pamięci dokonujemy ręcznie. Jak szybko potrafisz zmieniać zawartość pamięci? Pojemność takiej pamięci też nie jest imponująca - wynosi jeden bit. Wszystkie wyłączniki światła w Twoim mieszkaniu to już kilka czy kilkanaście bitów, co daje jeden, dwa bajty...

Dla porównania, pojemność pamięci optycznej w postaci popularnego krążka DVD to od 4,7 do kilkunastu gigabajtów. A gigabajt to ponad miliard bajtów...

Najszybsze są scalone pamięci półprzewodnikowe, których zawartość można odczytać czy zmieniać w czasie rzędu 2...3 nanosekund. A jedna nanosekunda to miliardowa część sekundy.

Współczesne pamięci można podzielić na trzy główne grupy: półprzewodnikowe, magnetyczne i optyczne. Każda z dostępnych dziś pamięci ma oprócz zalet poważne wady.

Pamięci półprzewodnikowe to rozmaite odmiany pamięci RAM, ROM, FLASH. Nośniki magnetyczne to dyskietki, dyski twarde i stare karty kredytowe. Nośniki optyczne to wszelkie odmiany płyt CD, CD-R, CD-RW, DVD, DVD-R, DVD-RW, DVD+RW.

Generalnie pamięci półprzewodnikowe są szybkie. Najszybsze pamięci RAM są bardzo drogie i mają niewielką pojemność, a na dodatek informacje giną po wyłączeniu zasilania. Pamięci optyczne są bardzo tanie, ale szybkość zapisu i odczytu jest mała. W niektórych wadą jest możliwość dokonania tylko jednorazowego zapisu (CD-R, DVD-R). Pamięci magnetyczne, jeśli chodzi o koszt i szybkość, lokują się pomiędzy półprzewodnikowymi i optycznymi. Duża pojemność okupiona jest długim czasem dostępu (twardy dysk).

Pamięci optyczne i magnetyczne póki co mają dodatkową bardzo poważną wadę: wymagają skomplikowanego czytnika, który zawiera ruchome elementy mechaniczne. Czytnik i wspomniane elementy mechaniczne decydują o niezbyt wysokiej niezawodności, o czym przekonują się użytkownicy dyskiek i płyt kompaktowych. Obecnie dąży się do wyeliminowania wszelkich urządzeń mechanicznych, co dałoby pamięć o nieporównanie większej niezawodności także w bardzo trudnych warunkach pracy. Uwaga konstruktorów skierowana jest głównie na krzemowe pamięci półprzewodnikowe, choć trzeba przyznać, że trwają też wstępne badania nad zupełnie innymi rodzajami pamięci. Powstały na przykład optyczne pamięci stałe, ale nie wyszły one poza etap prób.

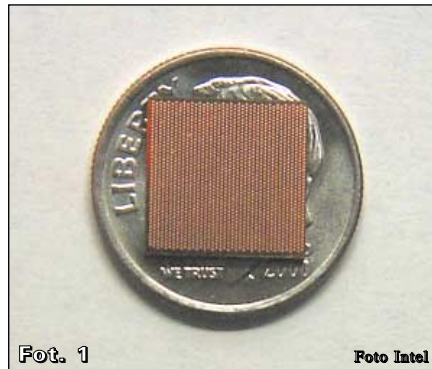
Aby dobrze zrozumieć stan obecny rozwoju pamięci półprzewodnikowych oraz ich perspektywy, trzeba zapoznać się z ich historią.

RAM

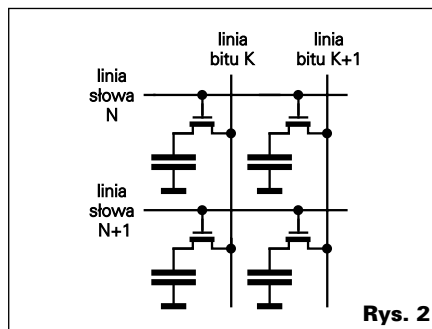
Pod koniec lat 60. narodziła się pamięć RAM. W największym uproszczeniu komórka pamięci RAM to klasyczny przerzutnik bistabilny, jak na **rysunku 1**, wzbogacony o obwody umożliwiające dokonanie odczytu oraz zapisu, czyli zmiany stanu. W sumie jednak komórka składa się zwykle z sześciu tranzystorów. Pamięć zawiera wiele takich komórek, zorganizowanych w postaci matrycy. Nazwa RAM oznacza *Random Access Memory*. Random znaczy przypadkowy, losowy, ale nie chodzi tu o żadną przypadkowość; wskazuje tylko, że dostęp do zawartości dowolnej komórki jest niezależny. Dlatego skrót RAM tłumaczy się na polski jako **pamięć o swobodnym dostępie**.

Dziś pamięci zbudowane według zasady z rysunku 1 są nazywane Static RAM, w skrócie SRAM. Jedna komórka pamięci wraz z obwodami adresowania i sterowania zbudowana jest z sześciu tranzystorów. Pamięci SRAM są najszybsze ze znanych pamięci, jednak istotną wadą jest cena, związana między innymi z dość skomplikowaną bu-

dową. Pokazana na **fotografii 1** struktura to pamięć SRAM o pojemności 52Mb (52 milionów bitów) wykonana w technologii 90nm, zawierająca 330000000 tranzystorów umieszczonych na powierzchni 109mm².



Już w roku 1970 opracowano dynamiczną pamięć RAM - DRAM. Jej budowa jest w sumie dużo prostsza od pamięci SRAM. Pamięć DRAM to w rzeczywistości zespół wielu kondensatorów tworzących matrycę. Każdy kondensator to elementarna komórka pamięci - może być naładowany albo rozładowany, co odpowiada stanom logicznym 0, 1. Zapis informacji to w rzeczywistości ładowanie i rozładowanie elementarnych kondensatorów. Aby umożliwić obsługę pojedynczych kondensatorów w matrycy zawierającej tysiące czy miliony komórek, każdy kondensator pamiętający współpracuje z tranzystorem. Budowę komórki DRAM w uproszczeniu pokazuje **rysunek 2**.

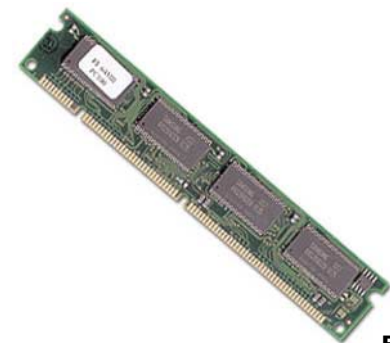


Pamięci SRAM i DRAM tracą zawartość po wyłączeniu zasilania. Z pamięcią DRAM jest dodatkowy problem - kondensatory pamiętające są kiepskiej jakości. Po naładowaniu kondensator szybko ulega samorozładowaniu. Pamięć DRAM można śmiało porównać do sieci złożonej z wielkiej liczby przeciekających garnków. Po wlewu do garnka wody, jej poziom stopniowo opada. I to jest istotny problem, bo poziom wody ma nieść informację - wyznaczać stan logiczny. Aby zmagazynować i przechować informację w dziurawych garnkach przez dłuższy czas, trzeba zatrudnić cierpliwego służącego, który będzie miał za zadanie dolewać wodę do garnków, które są „prawie pełne”. Służący musi być cierpliwy i systematyczny. Nie mu-

si natomiast być inteligentny. Jego zadaniem będzie sprawdzenie, czy wody jest więcej niż pół garnka, czy mniej. Jeśli więcej, musi dołać jej do pełna; jeśli mniej - ma sprawdzać następne naczynia. Taki mało inteligentny sługa przy odczytywaniu zawartości danego naczynia przelewa zawartość do swojej miarki z kreską. Tym samym odczytując komórkę kasuje zapis. Trzeba go poinstruować, że po każdym odczytaniu musi koniecznie przywrócić ostatni stan wlewając wodę z powrotem i dolewając do pełna.

Podobnie tak jest z pamięcią DRAM: „przeciekające” kondensatory tracą ładunek w ciągu kilkunastu... kilkudziesięciu milisekund, a odczyt powoduje skasowanie zawartości. Aby utrzymać zawartość pamięci, trzeba odświeżać ją co kilka milisekund i rekonstruować zawartość odczytywanych komórek. Zajmują się tym specjalne obwody wbudowane w układ scalony, a użytkownika to niewiele obchodzi. Faktem jest jednak, że w związku z taką zasadą działania pamięci DRAM są znacznie wolniejsze od pamięci SRAM. W związku ze wzrostem wymagań, pamięci DRAM były udoskonalane, przez co wzrastała ich szybkość i pojemność. Efektom jest różnorodność kolejnych odmian: FPM DRAM, EDO DRAM, BEDO DRAM, SDRAM, SLDRAM, PC66, PC100, DRDRAM PC800 RDRAM, PC133, PC150, DDR SDRAM, MicroDIMM, EDRAM...

W typowym współczesnym komputerze pracuje pamięć DRAM o pojemności 64...512 megabajtów. Każdy komputer zawiera też niewielką ilość pamięci SRAM (kilkaset kilobajtów) - jest ona częścią procesora i służy jako pamięć podręczna. Pamięć SRAM jest dużo szybsza od pamięci DRAM, ale i dużo droższa. Na **fotografii 2** pokazany jest moduł pamięci DRAM.

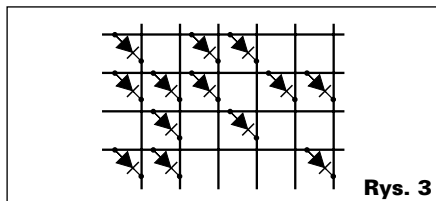


Fot. 2

ROM

Klasyczne pamięci ROM (ROM - Read Only Memory - tylko do odczytu) mają prostą budowę. Też jest to matryca komórek. Ideę pokazuje w uproszczeniu na przykładzie matrycy diodowej **rysunek 3**. Pamięci ROM były też realizowane z wykorzystaniem tranzystorów bipolarnych i MOS. W praktyce wartości logiczne 0, 1 to po prostu (aluminiowe) połączenie oraz brak takiego połączenia w strukturze

układu scalonego. Zawartość pamięci ROM jest ustalona raz na zawsze podczas produkcji - o zawartości decyduje tzw. maska litograficzna, wykorzystywana podczas produkcji układu scalonego. Dlatego też mówi się, że ROM to pamięci programowane maską (w fabryce). Zaletą przy masowej produkcji jest niska cena. Zaletą jest też odporność tak dokonanego zapisu na wszelkie wpływy zewnętrzne, co ma znaczenie w najtrudniejszych warunkach pracy. Użytkownik nie ma żadnego wpływu na zawartość pamięci - może ją tylko odczytać.



Rys. 3

RAM kontra ROM

Od lat dzieli się pamięci półprzewodnikowe na pamięci RAM i ROM. Pamięć RAM można łatwo i szybko zapisać oraz odczytać. Dużą wadą jest utrata informacji po wyłączeniu zasilania. Pamięci **ROM** to dosłownie **pamięci tylko do odczytu** (ROM - Read Only Memory). Pamięci z rodziny ROM występują w bardzo wielu odmianach, a ich główną cechą i zaletą jest fakt, że **po zaniku napięcia zasilania nie tracą zapisanej informacji**.

Dawniej pamięci RAM i ROM niejako z natury były od siebie bardzo odległe. Rozwój techniki prowadzi jednak do tego, że już teraz granica między RAM a ROM staje się coraz bardziej płynna, a w przyszłości najprawdopodobniej zaniknie całkowicie.

Rozwój techniki spowodował, że określenia RAM, a zwłaszcza ROM - pamięć do odczytu, stają się mylące. Dlatego obok tych tradycyjnych określeń coraz częściej używa się nazw bardziej precyzyjnych: pamięci, które tracą zawartość po wyłączeniu zasilania nazywane są **pamięciami ulotnymi** (volatile memories), natomiast pamięci, które nie tracą zawartości, to **pamięci nieulotne** (nonvolatile memories, w skrócie NVM).

PROM

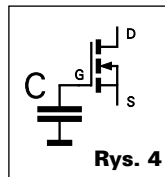
Pamięci **PROM** (**P**rogrammable **R**OM) są odmianą pamięci ROM. Są programowane przez użytkownika. Programowanie polega na wybiórczym przepalaniu znacznym prądem sieci aluminiowych połączeń lub delikatnych złącz p-n, przez co uzyskuje się potrzebną zawartość pamięci. W związku z destrukcyjnym sposobem programowania, pamięć PROM można zaprogramować tylko raz. Pamięci PROM były wykorzystywane w latach 70. i 80. i nigdy nie zdobyły dużej popularności.

EPROM

Pamięć **EPROM** (**E**rasable **P**rogrammable **R**OM) to pamięć stała, którą użytkownik może sam zaprogramować i której zawartość można skasować. Jest to więc pamięć nieulotna wielokrotnego użytku.

Pamięć EPROM została wynaleziona w firmie Intel przez przypadek, przy okazji badań nad tranzystorami MOSFET. Okres świetności EPROM-ów trwał dość długo, od wynalezienia we wczesnych latach 70. (1-kilobitowa pamięć EPROM stała się dostępna na rynku w roku 1971) do połowy lat 90. Dziś EPROM-y zostały wyparte przez inne pamięci, które można nieporównanie łatwiej programować i kasować.

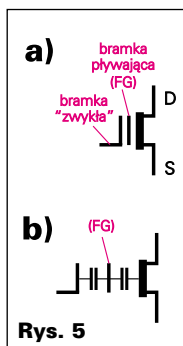
Pamięć EPROM oraz kilka pochodnych rodzajów mają stosunkowo prostą budowę i opierają swe działanie na tej samej zasadzie. Podstawą jest jeden jedyny najzwyklejszy tranzystor MOSFET, który współpracuje z kondensatorem dołączonym do bramki. Ten kondensator i tranzystor tworzą elementarną komórkę pamięci. Budowę jednej komórki pamięci EPROM ilustruje w największym uproszczeniu **rysunek 4**. Jeśli kondensator jest naładowany, tranzystor MOSFET N może przewodzić (zależnie od napięć na drenie i źródle). Jeśli kondensator jest pusty i tranzystor na pewno będzie zatkany, niezależnie od napięć na źródle i drenie. Mamy dwa wyraźnie różniące się stany tranzystora i możemy im przypisać wartości logiczne 0, 1.



Rys. 4

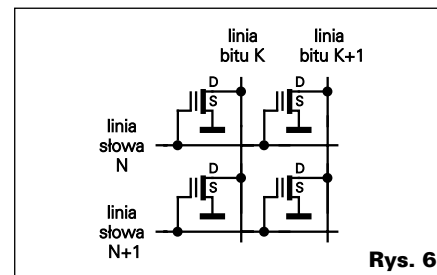
W pamięci DRAM ładunek z kondensatora ucieknie w ciągu niewielu milisekund. W pamięci EEPROM jest inaczej. Tym razem izolacja jest znakomita i w normalnych warunkach kondensator pamiętający ani się nie ładuje, ani nie rozładowuje. Izolacja jest tak dobra, że zgromadzony ładunek pozostanie niezmienny przez wiele lat. Trwałość pamięci EPROM ocenia się na 100 lat!

W rzeczywistości w komórce pamięci EPROM nie ma odrębnego kondensatora, a jego rolę pełni niewielka pojemność bramki tranzystora. Kluczową rolę elementu pamiętającego odgrywa niepodłączona nigdzie bramka, zwana bramką pływającą (floating gate - FG). Oprócz tego istnieje druga „zwykła” bramka wykorzystywana do adresowania komórki. Między bramkami a kanałem tranzystora występują pojemności umożliwiające pracę w roli adresowalnego elementu pamiętającego. Pokazuje to w uproszczeniu **rysunek 5**. O właściwościach komórki decyduje w dużym stopniu izolacja,



Rys. 5

czyli dielektryk oddzielający bramkę pływającą od pozostałych składników układu. Oczywiście i tu, by zwiększyć ilość zapamiętywanych informacji, komórki zorganizowane są w matrycę zawierającą nawet miliony komórek. **Rysunek 6** pokazuje strukturę prostej pamięci EPROM.



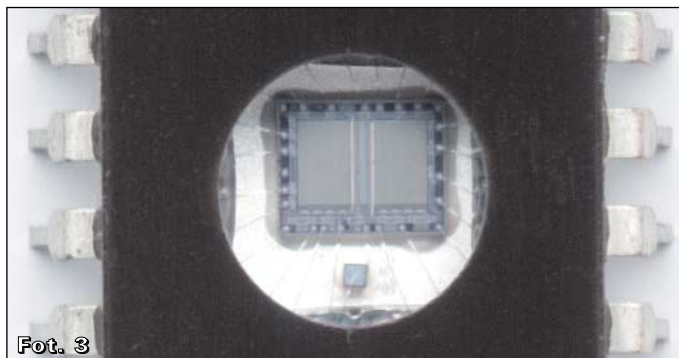
Rys. 6

Zapis i odczyt komórki następuje po dołączeniu odpowiednich napięć między elektrody tranzystora. Pamięć na początku jest skasowana - pływające bramki są pobawione ładunku. Zapis komórki polega na naładowaniu pojemności bramki pływającej. Cała tajemnica zapisu tkwi we właściwościach izolatora tej bramki. Warstwa dielektryka jest bardzo cienka (ok. 25 nm), ma jednak znakomite właściwości izolacyjne pozwalające przy typowym napięciu zasilania (zwykle 5V) utrzymać ładunek przez długie lata - dwutlenek krzemu jest jednym z najlepszych izolatorów. Zapis, czyli ładowanie pojemności bramki polega najogólniej biorąc, na chwilowym kontrolowanym przebiciu warstwy izolatora. Podanie odpowiednio podwyższonego napięcia o właściwej biegunowości (zwykle 12...25V, zależnie od typu i producenta) między źródło i dren tranzystora powoduje przenikanie tzw. gorących elektronów do izolowanego obszaru bramki. Zjawisko to nazywa się wstrzykiwaniem gorących elektronów (HEI - Hot Electron Injection). Elektron poruszający się między źródłem a drenem zyskuje energię w silnym polu elektrycznym i w odpowiednich warunkach staje się „gorącym elektronem”, mającym energię wystarczającą dużą do przeskokowania bariery potencjału warstwy izolacyjnej bramki. W ten sposób następuje ładowanie pojemności pływającej bramki. Po odłączeniu napięcia programującego ładunek zostaje uwięziony w pływającej bramce i określa nowy stan - logiczne zero.

Napięcie i czas programowania muszą być dobrane, żeby nastąpiło zjawisko opisanego „kontrolowanego przebicia”, a jednocześnie by nie uszkodził trwale delikatnej warstwy izolatora.

Ładunek zgromadzony w bramce może być usunięty przez dostarczenie zawartym tam elektronom odpowiednio dużej energii, by mogły, mówiąc obrazowo, „przeskoczyć” barierę izolacyjną. Wykorzystuje się do tego promieniowanie ultrafioletowe UV-B o długości fali 300-400nm. Aby umożliwić takie

kasowanie, pamięci EPROM mają obudowy z okienkiem ze szkła kwarcowego. Po zaprogramowaniu okienko to musi być starannie zaklejone, ponieważ światło słoneczne też powoduje powolne kasowanie zawartości. **Fotografia 3** pokazuje okienko pamięci EPROM.



EPROM może być kasowany i ponownie zapisywany setki i tysiące razy - trwałość zależy w istotnej mierze od sposobu programowania i warunków kasowania. Podczas programowania, zamiast podania określonego podwyższonego napięcia na określony czas, stosuje się często metodę impulsową, gdzie po kolejnych impulsach sprawdza się stan programowanych komórek. Warto przy tym zwrócić uwagę, że zarówno programowanie, jak i kasowanie, nie jest procesem czysto cyfrowym. Nie następuje tam nagła i gwałtowna, tylko płynna zmiana stanu naładowania bramki pływającej. Oznacza to, że komórka pamięci jest w rzeczywistości elementem analogowym. Dlatego podczas programowania impulsowego trzeba przedłużyć czas programowania, a nie od razu kończyć je po stwierdzeniu, że w komórce jest już potrzebny stan.

OTPROM

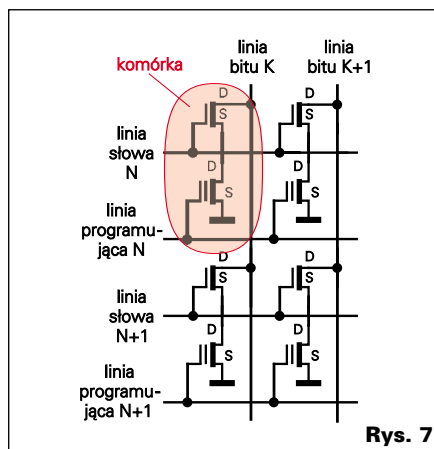
Struktury pamięci EPROM zamykane są też w obudowach bez wspomnianego okienka ze szkła kwarcowego. Taką pamięć, umieszczoną w klasycznej obudowie, można zaprogramować tylko raz. Zaletą jest znacznie niższa cena. Pamięci EPROM jednorazowego programowania nazywane są OTPROM (One Time Programmable ROM). Pamięci OTPROM wyparły klasyczne ROM-y i PROM-y.

EEPROM

Na początku lat 80. pojawiły się pamięci EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM), będące odmianą pamięci EPROM. Nazywane są też pamięciami E2PROM lub E3PROM. Dla użytkownika różnica w stosunku do EPROM-a polega głównie na sposobie kasowania. Nie jest do tego potrzebne promieniowanie ultrafioletowe. Kasowanie zawartości poszczególnych komórek następuje na drodze elektrycznej,

co jest ogromną zaletą. Nie trzeba przy tym kasować naraz całej pamięci - można kasować i programować pojedyncze komórki. Właściwie pamięć EEPROM nie do końca jest pamięcią ROM (tylko do odczytu), ponieważ w stosunkowo prosty sposób pozwala zapisywać, odczytywać i kasować informacje. Wadą, która decyduje, że pamięć ta jednak jest zaliczana do grupy pamięci ROM, jest długi czas zapisu. O ile odczyt trwa znacznie krócej od 1 mikrosekundy, o tyle zapis i kasowanie trwają tysiące razy dłużej: 10ms...1s, zależnie od typu i producenta. Wadą jest też ograniczona liczba cykli kasowania i zapisu: 100000...1000000 razy, zależnie od użytej technologii produkcji.

Uproszczony przykład budowy wewnętrznej pokazany jest na **rysunku 7**. Komórka zawiera dwa tranzystory: jeden z pływającą bramką, pełniący rolę elementu pamiętającego (dolny), oraz drugi, wykorzystywany do adresowania (górnny). Podczas elektrycznego programowania i kasowania pamięci EEPROM elektrony są przenoszone do i z pływającej bramki, a przy kasowaniu - usuwane. Programowanie następuje albo tak, jak w pamięci EPROM, z wykorzystaniem „gorących elektronów”, albo z wykorzystaniem zjawiska tunelowania. Kasowanie zawsze następuje wskutek zjawiska tunelowania.



Rys. 7

Tunelowanie to zjawisko mechaniki kwantowej, niemające odpowiednika w codziennej rzeczywistości. Można je unaocznnić przykładem gotowania mleka w garnku. O ile tylko garnek jest szczelny, w normalnych warunkach mleko nie może wydostać się z garnka. Mleko może opuścić garnek, jeśli dostarczymy mu odpowiednio dużo energii - wykipi wtedy, przelewając się przez brzegi garnka. Podobne zjawisko dostarcza-

nia energii i wydostania się elektronów „górną” następuje przy kasowaniu pamięci EPROM za pomocą światła ultrafioletowego.

W naszej codziennej rzeczywistości nie występuje zjawisko tunelowania, więc mleko nie może się wydostać z garnka inaczej, niż w opisany właśnie sposób. Gdyby zjawisko tunelowania zachodziło, maleńkie kropelki mleka pojawiałyby się w przedziwny sposób na zewnątrz garnka z dołu i z boków. Właśnie ni stąd, ni zowąd pojawiałyby się, a nie przenikały przez ścianki. Nie byłoby żadnego przeciskania się przez ścianki. Po prostu w pewnej chwili maleńka kropelka mleka pojawiałaby się gdzieś w powietrzu na zewnątrz garnka, a jednocześnie mleka w naczyniu ubywałyby tyle, ile pojawiło się na zewnątrz. Takie niewyobrażalne dla nas znikanie i pojawianie się cząstek ma związek z naturą materii na poziomie kwantowym. Jak stwierdzili uczeni, cząstki elementarne takie jak elektron, to wcale nie maleńkie kulki, jak niegdyś uczono, porównując atom do systemu planetarnego. Mówiąc obrazowo, cząstki to raczej „rozmyte smugi prawdopodobieństwa”, materializujące się podczas obserwacji.

Zjawisko tunelowania w omawianych komórkach pamięci daje zadziwiający efekt przenoszenia elektronów do i z obszaru pływającej bramki, bez przeciskania się ich przez warstwę izolatora. Zjawisko tunelowania zachodzi tylko w odpowiednich warunkach - w obecności silnego pola elektrycznego. Dopiero w odpowiednio silnym polu cząstki z jednej strony izolatora znikają i pojawiają się z drugiej jego strony.

Pamięci EEPROM mają stosunkowo nieduże pojemności. Dostępne są wersje z adresowaniem równoległym, jak w klasycznych pamięciach RAM i EPROM, częściej używane są EEPROM-y z adresowaniem szeregowym - do adresowania i wymiany danych wystarczą wtedy dwie linie plus masa. **Fotografia 4** pokazuje popularną pamięć EEPROM z interfejsem szeregowym I²C.



Fot. 4

W drugiej części artykułu opisane będą pamięci FLASH, NVRAM, FRAM, MRAM, OUM, PMCM.

Zbigniew Orłowski