

Kontynuujemy artykuł o podstawach budowy i działania mikroprocesorów. W tym odcinku zajmujemy się pamięciami.



## Pamięć

Pamięć jest nieodzownym elementem każdego systemu mikroprocesorowego, chociaż fizycznie nie musi ona znajdować się wewnątrz kostki mikroprocesora.

W systemie mikroprocesorowym pamięć służy do przechowywania rozkazów (kodu programu), ale też potrzebna jest jakaś pamięć do przechowywania wyników obliczeń pośrednich, czy innych danych liczbowych. Dlatego mówimy o dwóch pamięciach: *pamięci programu* i *pamięci danych*.

W "prawdziwych" komputerach i niektórych większych sterownikach przemysłowych, w pamięci stałej zapamiętany jest tylko program podstawowy, zwany czasem monitorem (w PC-tach zwany BIOS-em). Zapisano w nim procedury inicjujące działanie całego systemu mikroprocesorowego, podprogramy współpracy z urządzeniami zewnętrznymi. Natomiast wykonywany program użytkowy jest ładowany z dysku do pamięci zapisywalnej (RAM) i potem kolejne rozkazy pobierane są z tej pamięci.

W prostych sterownikach cały program zapisany jest do pamięci stałej. W takich sterownikach całkowicie wystarcza pamięć zapisywalna (pamięć RAM) o pojemności dosłownie kilkudziesięciu bajtów.

Przy omiawianiu sprawy pamięci spotyka się tajemnicze terminy, jak: ROM, EPROM, EEPROM czy RAM. Posiadacze jakiegokolwiek komputera orientują się, co może oznaczać RAM. Znajomy czy kolega, który też ma do czynienia z komputerami, zawsze zapyta, ile nasz komputer ma tego "megaRAMu". I tu pada jakaś liczba, i wprost proporcjonalnie do wartości RAMu rośnie szacunek dla posiadacza takiego komputera. Rzadko kto pyta, ile "siedzi" ROMu, EPROMu czy EEPROMu.

Te tajemnicze słowa to skróty angiels-

kojęzycznych zwrotów, które oznaczają pamięci o określonych cechach.

### Pamięć ROM

Pamięć ROM to *Read Only Memory*, czyli jest to pamięć tylko do odczytu. No dobrze, ktoś zapyta, po co mi taka pamięć, jeśli nie można w niej nic zapisać, bo tylko się z niej odczytuje. Zapisać można do niej, jak najbardziej. Zawartość pamięci ROM nie może być jednak modyfikowana w samym systemie mikroprocesorowym, czyli w niej nie przechowujemy przetwarzanych danych. Możemy za to przechowywać nasz program. Pamięć typu ROM jest pamięcią programowaną maską. Programowanie maską polega na takim wytrawieniu połączeń wewnętrznej struktury pamięci, żeby komórki pamięci miały trwałe i określone wartości zer i jedynek. Robi się to na etapie produkcji pamięci, zanim płyteczka krzemu zostanie zamknięta w obudowie i połączona z zewnętrznymi kontaktami.

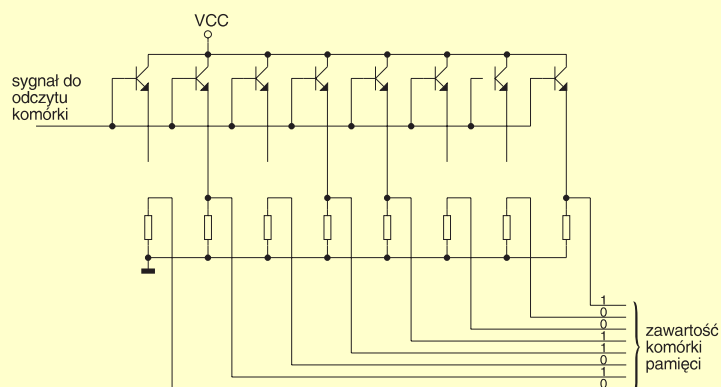
Po co jednak trzymać program i tylko program w pamięci, która jest taka niewygodna, nie może być modyfikowana, mało tego, może być programowana tylko u producenta pamięci? Czy nie staje się

Cały proces programowania za pomocą maski przypomina po trosze wykonanie płytki drukowanej, ale w mikroskopijnym wymiarze. Jak na płytce laminatu jednolicie pokrytego miedzianą folią wytrawiamy połączenia, tak i tutaj na płytce krzemu pokrytej mikroskopijnie cienką warstwą aluminium, wytrawiamy w tej warstwie układ cieniutkich ścieżek.

ona przeszkodą w czasie uruchamiania systemu mikroprocesorowego?

Najważniejszą z zalet wszystkich pamięci ROM jest nieulotność zapisanych danych po wyłączeniu zasilania. Takiej właściwości nie mają pamięci RAM. Możemy być więc spokojni o nasz program, nie stracimy go bezpowrotnie. Pewność przechowywanych informacji w pamięci ROM dała tym pamięciom inną nazwę - *pamięci stałe*. Możemy bowiem przechowywać w nich pewne ustalone dane na równi z samym programem.

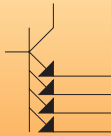
Zbudujmy model pojedynczej komórki pamięci ROM. Pokazano to na rysunku 7. Komórka taka może pamiętać osiem bitów, czyli cały bajt. Sygnał do odczytu ko-



Rys. 7. Model komórki pamięci ROM.

Jeśli rezystor jest połączony z emiterem tranzystora, to mówimy, że rezystor jest rezystorem emiterowym tranzystora albo rezystor znajduje się w obwodzie emitera tranzystora. Podobnie możemy powiedzieć o rezystorze znajdującym się w obwodzie kolektora czy bazy.

Grupę tranzystorów z rys. 7, które mają wspólne kolektory i wspólne bazy, wykonuje się jako jeden tranzystor o jednym kolektorze i jednej bazie, za to o tylu emiterach, ilu potrzeba. Taki jeden tranzystor nazywamy tranzystorem wieloemiterowym. Symbol tranzystora czteroemiterowego jest w tej ramce. Niech już więcej nikogo nie zdziwi symbol takiego tranzystora, kiedy będzie przeglądał schematy wewnętrznych struktur układów scalonych.



mórki, który przyjdzie na bazy tranzystorów jest sygnałem wysokim. Powoduje on wprowadzenie tranzystorów w stan przewodzenia. W procesie produkcji część tranzystorów (tych, które mają mieć zaprogramowane zera), nie ma wykonanych połączeń emiterów z rezystorami, co skutkuje niskim stanem wyjściowym, czyli zerem logicznym. Istniejące połączenie z rezystorem da stan wysoki, czyli na rezystorze połączonym z emiterem będzie potencjał bliski napięciu zasilania.

Do pamięci ROM, która jest programowana u producenta, zapisuje się program sprawdzony, przetestowany, którego już nie zamierzamy poprawiać ani ulepszać. Programowanie maską jest najtańszym sposobem programowania pamięci, pod warunkiem, że zamówimy olbrzymią ich ilość, rzędu dziesiątek i setek tysięcy sztuk. Na to mogą sobie pozwolić tylko wielkie montownie komputerów. Dla nas ten rodzaj pamięci jest więc mało przydatny. Należało go jednak wymienić, ponieważ pamięć ROM programowana u producenta funkcjonuje do dziś i stała się podstawą do kolejnych technologicznych modyfikacji sposobu zapisu do niej, bardziej przyjaznego dla konstruktora małego systemu mikroprocesorowego.

## Pamięć PROM

Idea prostszego zapisu do pamięci ROM szybko doczekała się realizacji w postaci pamięci PROM (*Programmable ROM*), programowalnych pamięci ROM. Pamięci typu PROM cechuje zdolność do zaprogramowania w programatorze, który może stać u użytkownika na stole. Pamięć nie zaprogramowana jest pamięcią, której komórki wypełniono tylko zerami a-

bo tylko jedynkami. Programowanie polega więc na fizycznej zmianie zawartości komórki pamięci stanu na przeciwny, oczywiście tylko w tych miejscach, gdzie to jest konieczne. Jeśli stan niezaprogramowania jest stanem właściwym, to taka komórka jest uznawana za prawidłowo zaprogramowaną.

Popatrzmy z powrotem na rysunek 7. Gdyby udało nam się umieścić coś w rodzaju bezpiecznika pomiędzy każdym tranzystorem a rezystorem emiterowym, to przepalając ten bezpiecznik moglibyśmy zmienić w sposób trwały stan każdego bitu. Jeśli zrobimy to wybiórczo, to zachowamy się tak samo jak projektant maski dla pamięci ROM: wykonamy, a właściwie pozostawimy te połączenia, które należy pozostawić.

Samo programowanie komórki polega więc na trwałym uszkodzeniu każdego bitu pamięci w taki sposób, aby stan tej komórki zmienił się na przeciwny. Można to wykonać poprzez przepalenie tego "bezpiecznika" (rys. 8). Przeważnie jest to zwężony odcinek ścieżki połączeniowej, wykonany z materiału o dużej rezystancji własnej, np. ze stopu niklu i chromu. Na cały układ podaje się przez chwilę podwyższone napięcie, wymuszając tym samym zwiększony pobór prądu i lokalne rozgrzanie wąskiej ścieżki oporowej. Ścieżka ta przepala się w taki sam sposób, jak bezpiecznik topikowy przeciążonej instalacji elektrycznej. Układ scalony jest specjalnie przygotowany na to i jemu jako całości to nie szkodzi.

Wadą pamięci PROM jest ich jednorazowość. Układ raz zaprogramowany nie może być przeprogramowany. Nie pozwalają na to przepalone w sposób nieodwracalny oporowe ścieżki komórek pamięci.

Pamięci PROM są to przeważnie pamięci wykonane z tranzystorów bipolarnych, czyli są to pamięci bipolarne. Pamięci te nie mogą mieć wielkich pojemności ze względu na znaczną moc pobieraną przez komórkę pamięci oraz jej dość duże rozmiary.

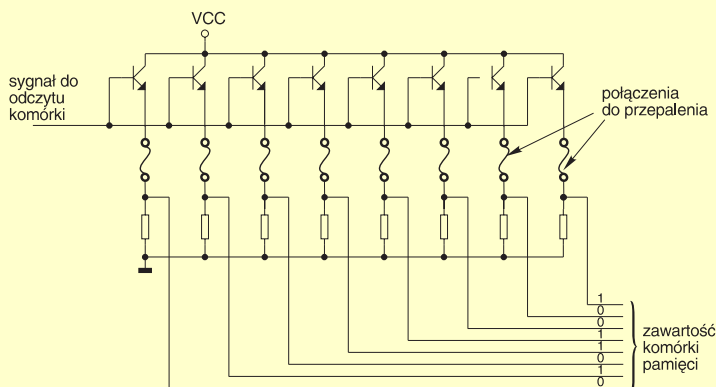
## Pamięć EPROM

Kolejną odmianą pamięci PROM jest wersja wykonana w technologii polowej MOS. Tranzystor polowy jest mniej energożerny od tranzystora bipolarnego i do tego może być mniejszy. W tej technologii zapis informacji nie polega na przepalaniu połączeń, lecz opiera się na zjawisku tunelowego przenikania i gromadzenia. Tranzystor polowy posiada dwie bramki, z tego jedna nazywana jest bramką programującą, bo na nią podaje się napięcie programujące, zaś druga - bramką pływającą, bo została "zatopiona" w środku izolatora. W bramce pływającej może być gromadzony ładunek, "wtłoczony" przez bramkę programującą, włączający tranzystor, gdy na bramkę programującą podano sygnał odczytu. Bez tego ładunku tranzystor nie może przewodzić, ponieważ napięcie na bramce programującej w czasie odczytu jest za niskie. Pokazuje to rysunek 9.

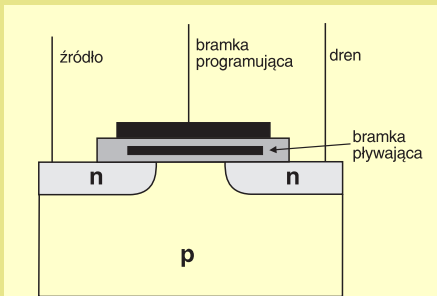
Zaletą tej komórki pamięci jest zdolność do zaprogramowania bez fizycznego uszkodzenia układu. Usunięcie ładunku z bramki pływającej jest możliwe poprzez dostarczenie energii w postaci promieniowania ultrafioletowego.

Opisana wyżej komórka pamięci stała się podstawowym elementem budowy pamięci EPROM (*Erasable PROM*). Pamięci EPROM są programowane w programatorach, z reguły uniwersalnych, bo przystosowanych do wielu typów pamięci i ich wielkości. Kasowanie pamięci odbywa się za pomocą lamp jarzeniowych, które

Wprowadzie do pamięci stałych możemy zaliczyć również inne rodzaje pamięci, np. pamięci ferrytowe, ale tylko elektronicy zaawansowani wiekiem mogą kojarzyć ten termin, więc go pominiemy. Ale pamięcią stałą jest też znana wszystkim mikrokomputerom pamięć magnetyczna, do której zalicza się wspomniana pamięć ferrytowa. Oni jednak tak jej nie nazywają. Znajdą ją pod postacią dyskietek i dysków twardej czy kaset do streamerów.



Rys. 8. Model komórki pamięci PROM.



Rys. 9. Tranzystor polowy.

wydzielają silne promieniowanie ultrafioletowe. Kostka pamięci EPROM jest zapatrzona w okienko wykonane ze szkła kwarcowego, przez które promienie ultrafioletowe przenikają do struktury.

Dość popularną odmianą pamięci EPROM jest wersja OTP (*One-Time Programmable*). Jest to pamięć EPROM umieszczona w obudowie bez okienka, czyli nie może ona być przeprogramowana i służy do jednokrotnego zapisu. Projektant może do takiej kostki zapisać końcową wersję oprogramowania. Zaletą tej odmiany pamięci EPROM jest niska cena w porównaniu z obudową z okienkiem.

Wadą pamięci EPROM jest konieczność kasowania całej zawartości pamięci, nawet jeśli ma być zmieniony tylko jeden bit. Dodatkowo obudowa z okienkiem kwarcowym jest technologicznie trudna do wykonania i droga.

#### Pamięć EEPROM

Producenci pamięci wpadli więc na pomysł, aby zmodyfikować tak komórkę pamięci EPROM, aby każda komórka mogła być kasowana elektrycznie niezależnie od innych, sąsiednich komórek. Przebudowali oni komórkę pamięci EPROM w taki sposób, że ładunek gromadzony w bramce pływającej można wprowadzać i usuwać poprzez dren wykorzystując zjawisko tunelowe.

Tak otrzymana komórka pamięci jest podstawą do budowy pamięci EEPROM (*Electrically EPROM*). Programowanie ko-

mórki pamięci EEPROM polega na kasowaniu wybranego bajtu, a potem selektywnej modyfikacji wybranych bitów komórki.

Komórki pamięci z czasem starzeją się i tracą własności utrzymywania ładunku w bramce pływającej. Proces przeprogramowywania to przyspiesza. Dlatego warto wiedzieć, jaką liczbę programowań zapewnia producent pamięci. Wartość  $10^5$  jest wynikiem przyzwoitym.

Wadą typowych pamięci EEPROM jest czas kasowania komórki, który dochodzi do 20ms. Jeśli przemnożymy ten czas przez liczbę komórek (np. 65536) to otrzymujemy czas przeprogramowania całej pamięci porównywalny z czasem kasowania pamięci EPROM. Z tego powodu pamięci EEPROM znalazły zastosowanie jako pamięci pamiętające dane ważne, których nie chcemy stracić po wyłączeniu zasilania. Takie pamięci mają małe pojemności w porównaniu z pamięciami EPROM, które pamiętają kod programu.

#### Pamięć Flash EEPROM

Długi czas kasowania całej pamięci EEPROM zmusił producentów do opracowania odmiany pamięci EEPROM zwanej *Flash EEPROM*. W pamięci Flash EEPROM proces kasowania zachodzi całymi blokami komórek, do tego bez wyjmowania kostki z urządzenia, w czasie kilku sekund.

Pamięci Flash osiągają znaczne pojemności i ich podstawowym zastosowaniem jest pamiętanie dużych bloków danych, w tym zastępowanie w niektórych wykonaniach pamięci masowych (np. dyskietek).

### System mikroprocesorowy

Nawet najprostszy system mikroprocesorowy musi składać się więc z mikroprocesora, pamięci programu i pamięci danych, ale istnieją mikroprocesory zawierające pamięć programu i pamięć danych w jednej kostce - nazywamy je mikrokom-

Jeszcze nie tak dawno, kiedy mikroprocesory posiadały słowo co najwyżej 8-bitowe, obok nich spokojnie egzystowały układy mikroprogramowane jako osobne układy scalone. Układ mikroprogramowany wymaga zewnętrznej pamięci ROM, w której były zapisane mikroinstrukcje, tworzące mikroprogram. Taka mikroinstrukcja zawierała kod bardzo prostej czynności, z reguły były to sygnały zezwolenia na te czynności, ewentualny adres następnego rozkazu, czasem kilka bitów reprezentujących stany warunkowe. Z chwilą, gdy mikroprocesory robiły się coraz tańsze i gwałtownie zaczęły rosnać ich możliwości, zaniechano produkcji pojedynczych układów mikroprogramowanych. Układy mikroprogramowane nadal są, stały się fragmentem ... mikroprocesorów. Właściwie bez nich nie można byłoby dekodować instrukcji przychodzących do mikroprocesora. Pamięć mikroprogramu też została scalona w strukturze mikroprocesora i teraz cały układ mikroprogramowany nazwiemy dekoderym rozkazów.

puterami jednoukładowymi. Wtedy cały system składa się naprawdę z jednej kostki.

Mikrokomputery jednoukładowe są powszechnie wykorzystywane do budowy najróżniejszych sterowników o zastosowaniach niekomputerowych. Nas, amatorów, ta klasa mikroprocesorów interesuje najbardziej.

Do odczytania informacji z pamięci potrzebne są szyna adresowa i szyna danych oraz ewentualnie linie współpracy z pamięcią. W mikroprocesorze jednoukładowym szyny te mogłyby być całkowicie ukryte w jego wnętrzu, jednak szyna danych, a często także szyna adresowa wyprowadzone są na zewnątrz, co umożliwia dołączenie zewnętrznej pamięci i różnych układów współpracujących.

Popularne procesory jednoukładowe zawierają "na pokładzie" pamięć programu ROM lub EPROM o pojemności 1...8 kilobajtów i pamięć danych RAM o pojemności kilkudziesięciu, do kilkuset bajtów.

Pamiętajmy, że jeśli np. szyna adresowa mikroprocesora jest 16-bitowa, to może on zaadresować  $2^{16} = 65536$  komórek pamięci. Taka jest więc wielkość *obszaru adresowego* dla tego mikroprocesora, czyli potrafi on bezpośrednio obsłużyć pamięć o tej wielkości. A w sześćdziesięciu czterech kilobajtach pamięci można zmieścić program o naprawdę dużych możliwościach.

Mirosław Lach

### Bity i bajty

Jednostką miary w informatyce jest bit. Oznacza on możliwość zapamiętania dwóch różnych, wykluczających się wzajemnie informacji. Większą jednostką miary jest bajt, który jest równy ośmiu bitom, na których można zapamiętać  $2^8=256$  informacji. Oznaczamy go jako B. Jeszcze większymi jednostkami są kilobajt, megabajt, gigabajt i terabajt, oznaczane odpowiednio jako KB, MB, GB, TB.

$1\text{KB} = 2^{10}\text{B} = 1\ 024\ \text{bajty} = 8192\ \text{bity}$ ,

$1\text{MB} = 2^{10}\text{KB} = 2^{20}\text{B} = 1\ 048\ 576\ \text{bajtów} = 8\ 388\ 608\ \text{bitów}$ ,

$1\text{GB} = 2^{10}\text{MB} = 2^{20}\text{KB} = 2^{30}\text{B} = 1\ 073\ 741\ 824\ \text{bajty} = 8\ 589\ 934\ 592\ \text{bity}$ ,

$1\text{TB} = 2^{10}\text{GB} = 2^{20}\text{MB} = 2^{30}\text{KB} = 2^{40}\text{B} = 1.0995 \times 10^{12}\ \text{bajtów} = 8.796 \times 10^{12}\ \text{bitów}$ .

Przez analogię tworzymy jednostki pokrewne, takie jak kilobit, megabit, gigabit czy terabit. Jednostki terabajtu i gigabajtu mają dla nas wymiar astronomiczny. Trzeba jednak wiedzieć, że parametry współczesnych mikroprocesorów najnowszej generacji muszą być opisywane takimi właśnie jednostkami. Np. przestrzeń adreso-