

O przyszłości miniaturyzacji

Tomasz DIETL

Mimo że – jak ktoś zauważył – przewidywanie nie jest trudne, chyba że dotyczy przyszłości, spróbujmy zastanowić się nad możliwymi scenariuszami rozwoju mikroelektroniki. Jednym z nich jest ten, który zaszedł w przypadku podróży przez oceany – jak wiemy, od ponad 20 lat prędkość pasażerskich samolotów transkontynentalnych nie zmienia się. Także w przypadku mikroelektroniki bariera finansowa (koszt budowy fabryki mikroprocesorów sięga 2 mld dolarów), psychologiczna (opór przed nowościami oraz brak uzasadnienia zwiększania potencjału informatycznego), prawna (zapobieganie rozpowszechnianiu się terroryzmu i pornografii przez sieć), . . . , mogą spowodować wypłaszczenie się krzywej Moora prognozującej tempo rozwoju.

Uważa się jednak dość powszechnie, że konstruowanie coraz lepszych systemów informatycznych będzie jeszcze przez długi czas uzasadnione. Sądzi się bowiem na przykład, że przejście od obecnych obliczeń gigaflopowych (10^9 operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę) do penaflopowych (10^{15}) otworzy zupełnie nowe możliwości zarówno w świecie rozrywki wirtualnej, jak i, przykładowo, w symulacjach procesów biologicznych oraz – ze względu na szybkie rozpoznawanie kształtów – w dziedzinie sterowania w czasie rzeczywistym.

Czy jednak dalszy postęp poprzez proste zmniejszanie rozmiarów tranzystorów MOSFET oraz komórek pamięci ferromagnetycznych i optycznych jest możliwy? Słysz się opinie, że dzisiejsza technologia i jej rozwój według krzywej Moora będzie trwał nie dłużej niż 5 do 10 lat. Wiąże się to z wieloma trudnościami technicznymi, często niezbyt spektakularnymi – dla przykładu mniejszym problemem jest dzisiaj przyspieszenie pracy procesora niż zlikwidowanie opóźnień przenoszenia sygnałów przez jego obudowę. . . Są też oczywiście bariery o charakterze bardziej podstawowym – dyfrakcyjne ograniczenie rozdzielczości w litografii, rosnące prawdopodobieństwo błędu, ziarnistość materii i ładunku elektrycznego, zjawiska kwantowe: np. tunelowanie elektronów przez izolator lub tunelowanie namagnesowania pomiędzy dwoma stanami pamięci ferromagnetycznych, czy wreszcie problem minimalnej energii potrzebnej do wykonania jednej operacji i wydzielania się jej w postaci ciepła.

W tej sytuacji wiele laboratoriów przemysłowych, narodowych i uniwersyteckich prowadzi badania w dziedzinie nanostruktur lub, szerzej, nanotechnologii. Nie jest jednak ciągle jasne, jaka technologia będzie dominowała w przyszłości. Wiadomo jedynie, że scalaniu elementów coraz częściej będzie towarzyszyło łączenie funkcji: procesorów, pamięci, czujników, aktywatorów, . . . Elementy elektroniczne i fotonowe będą więc zespolone z podzespołami

magnetycznymi i mikromechanicznymi. Wydaje się przy tym, że litografia w coraz większym stopniu będzie zastępowana syntezą elementów, a technologia planarna – trójwymiarową. Wykorzystany tu będzie samoorganizujący się wzrost w metodach epitaksjalnych. Wykorzysta się także syntezę organiczną i biologiczną oraz nowe metody manipulacji pojedynczymi cząsteczkami i atomami. Zbliżyć to nas może do praktycznej realizacji idei elektroniki molekularnej.

Znacznym zmianom może też ulec nośnik informacji. Dzisiaj do przetwarzania informacji służy ładunek elektronu, a wewnętrzny moment pędu (spin) do jej przechowywania. Uważa się, że będzie rosła rola fotonów, które już obecnie wykorzystywane są do przenoszenia, kodowania i zapisywania informacji. Poza elektronami i fotonami spore nadzieje wiąże się np. z wirami prądu w nadprzewodnikach II rodzaju (wiry Abrikosowa) i strumieniami pola magnetycznego w nanocewkach nadprzewodzących.

Prognoza przyszłości nanotechnologii pod względem wykorzystywanych w niej materiałów wskazuje na zainteresowanie heterostrukturami krzemu z germanem i węglem. Pozwalają one nie tylko przyspieszyć szybkość tranzystorów, ale także umożliwią – jak się sądzi – rozciągnięcie dominacji krzemu na obszar fotoniki (optoelektroniki), gdzie dzisiaj królują związki pierwiastków z grupy III i V, np. GaAs. Ze względu na możliwość pracy w wysokich temperaturach oraz możliwość generowania światła w szerokim obszarze widmowym znaczną rolę mogą odegrać związki SiC i GaN, a także . . . diament. Rosnące znaczenie może przypadać nieprzeliczalnie bogatej rodzinie związków organicznych, z takim powodzeniem wykorzystywanych przez mózg. Odkrycie nadprzewodników wysokotemperaturowych skierowało uwagę ku tlenkom. Materiały te są nie tylko nadprzewodnikami, ale wykazują niezwykle własności magnetyczne, tak że coraz częściej słyszy się o elektronice tlenkowej.

Obok zmian zasad działania poszczególnych elementów, które zapewne będą wykorzystywały to, co dzisiaj przeszkadza – tunelowanie, interferencje, ziarnistość materii – można oczekiwać nowych odkryć w dziedzinie architektury komputerowej. Wydaje się np., że zjawiska w układach nieuporządkowanych, chaotycznych, chemicznych i biologicznych, które mozolnie symulujemy przy użyciu dzisiejszych komputerów, będą służyły do szybkiego wykonywania obliczeń według algorytmu narzuconego przez charakter zjawiska. Może się też okazać, że – zamiast odrzucania procesorów z błędami – połączenia w obwodach scalonych będą tworzone w sposób przypadkowy, a przeznaczenie poszczególnych egzemplarzy będzie określane dopiero po ich wykonaniu.

I na koniec idea komputerów kwantowych. Jak wiemy, proces obliczania polega na przypisaniu jednej liczbie (której odpowiada określona sekwencja tranzystorów w stanie 1 i 0) pewnej innej liczby. Zgodnie z mechaniką kwantową tranzystor jest jednak w stanie 1 bądź 0 jedynie z pewnym prawdopodobieństwem. Zmiana tego prawdopodobieństwa w czasie opisana jest przez kwantowe równanie falowe, co oznacza, że zachodzi np. zjawisko interferencji. W latach dziewięćdziesiątych

dowiedziano, że wiele algorytmów byłoby wykonywanych znacznie szybciej przez komputery kwantowe. Znanym przykładem jest znajdowanie podzielników liczby o N cyfrach. Czas t tego poszukiwania rośnie wykładniczo z liczbą cyfr w przypadku komputerów klasycznych, $t \sim a^N$, a potęgowo dla algorytmów kwantowych, $t \sim N^b$; gdzie stałe a, b są większe od 1. Podstawową trudnością przy budowie komputera kwantowego są zewnętrzne zaburzenia, które w sposób przypadkowy wpływają na ewolucję jego stanu.

Aktualności (nie tylko) fizyczne

Co robi komputer? Nazwa wskazywałaby, że liczy, ale większość współczesnych procesorów więcej czasu oczekuje na dane lub wyprowadza wyniki. Takie są skutki obcowania przyzwyczajonych komputerów z ludźmi. Kiedyś wybrańcy porozumiewali się z komputerami za pomocą przelączania kabelków, dziurek w papierze, klawiatury. Powiecie „przecież i teraz używa się klawiatury”. Tak, tylko, po pierwsze, istotnie inaczej, a po drugie, coraz rzadziej. Różnica polega na skutkach naciśnięcia klawisza. Teraz objawia się to pojawieniem się stosownego znaku na ekranie (dla młodszych Czytelników wyjaśniam, że wcale nie tak dawno żadnego ekranu nie było). To nie my jednak ten znak wyświetlamy, lecz komputer. Oczywiście, nadal występujemy w roli kapitana okrętu, który wydając komendę, oczekuje najpierw potwierdzenia jej zrozumienia (powtórzenia komendy poprzedzonej słowem „jest”), a następnie jej wypełnienia. Ale to marynarz, a nie kapitan potwierdza i wykonuje komendy. Gdyby pozostać przy tej morskiej analogii, to współczesnemu marynarzowi-komputerowi samo wykonywanie komend praktycznie nie zajmuje czasu (prawda, jaki szybki?). Całą uwagę skupia on na odgadywaniu życzeń swojego kapitana, a swój czas poświęca na wyszukane potwierdzanie i jeszcze bardziej wymyślne informowanie o skutkach wykonywanych poleceń. Czy to źle? Wcale tak nie uważam, choć tak jak was śmieszy mnie traktowanie go jak człowieka: „proszę państwa, komputer podpowiada mi, że państwo Dulscy wygrywają drugi talon na balon”. Bo, przynajmniej na razie, żaden komputer, nawet najlepiej to udający, nie myśli. Osobiście przychyliam się do zdania, że myślenie jest procesem kwantowym. Jeżeli tak, to myślące może będą kiedyś komputery kwantowe. A tu droga jeszcze bardzo daleka, choć coraz częściej pojawiają się doniesienia o kolejnych istotnych osiągnięciach. Pod koniec kwietnia społeczność naukowa dowiedziała się o dokonaniu Japończyków, którym udało się uzyskać pierwszy elektrycznie kontrolowany qubit w ciele stałym [1] (qubit to układ dający się w kontrolowany sposób wprowadzić w stan będący superpozycją dwóch stanów kwantowych). Wcześniej wprawdzie zbudowano działający, 2-qubitowy komputer (patrz *Delta* 6/1998), ale zastosowana technika, wykorzystująca cząsteczkę chloroformu, raczej nie da się przenieść na urządzenie o pojemności umożliwiającej realistyczne obliczenia. Nadzieje takie wiąże się natomiast właśnie z qubitami w ciele stałym.

Czy należy się więc spodziewać spełnienia marzeń (ostrzeżeń) fantastów o myślących maszynach? Nie znam odpowiedzi na to pytanie. Wiadomo natomiast, że – pomimo olbrzymiego postępu neurologii – nadal bardzo mało wiemy o procesach, które nam samym pozwalają myśleć. Nie do końca wiadomo nawet, jak przebiega przekazywanie sygnałów pomiędzy neuronami. Ich połączenia są w tkankach skomplikowane w stopniu uniemożliwiającym rozszyfrowanie zachowania naturalnych sieci neuronowych.

A gdyby tak zbudować sztuczną sieć z naturalnych neuronów i połączyć ją z układem scalonym? Czy nie w tym kierunku ewoluje nasz sposób komunikowania się z komputerami? Możemy już z nimi porozumiewać się głosem, wirtualna rzeczywistość oszukuje (wspomaga) nasze zmysły, dlaczego nie pójść dalej i po prostu ich (zmysłów) nie zastąpić wyspecjalizowanymi urządzeniami? Czy możliwe jest skonstruowanie protezy słuchu, wzroku, rdzenia kręgowego? Prace nad protezami neurologicznymi, działającymi na zasadzie bezpośredniego stymulowania systemu nerwowego w celu odzyskania słuchu, wzroku czy zdolności ruchowych, są bardzo zaawansowane. Istnieją działające urządzenia pozwalające na zgrubne przywrócenie utraconych zmysłów [2]. Sukcesy te zawdzięczamy jednak stymulowaniu całych grup neuronów. Połączenie pojedynczego neuronu z elektroniką czy wytworzenie sztucznej sieci z prawdziwych neuronów jest trudniejsze, ale i tu notuje się coraz więcej osiągnięć [3]. Udało się już uzyskać proste, działające sieci na sztucznych powierzchniach za pomocą przyciągającej neurony substancji DETA. Po pokryciu powierzchni kulturą, zawierającą neurony pochodzące z hipokampu szczurów, naukowcy zaobserwowali, jak komórki nerwowe najpierw migrują do przygotowanego dla nich miejsca, a następnie rozwijają połączenia synaptyczne wzdłuż ścieżek wytyczonych za pomocą DETA. Niestety, nie mogą już dalej snuć rozważań nad rysującą się przyszłością cyborgów, bo mój komputer kopie mnie w kostkę, dając do zrozumienia, że na tej stronie już nic więcej się nie zmieści.

Piotr ZALEWSKI

- [1] Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin i J. S. Tsai, *Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box*, *Nature* **398** (1999) 786.
- [2] R. S. Service, *Bypassing Nervous System Damage With Electronics*, *Science* **284** (1999) 579.
- [3] R. S. Service, *Neurons and Silicon Get Intimate*, *Science* **284** (1999) 578.