

# Nanometrowe układy CMOS dla elektroniki terabitowej

Prof. Tomasz Skotnicki

STMicroelectronics, 850 rue Jean Monnet, 38926 Crolles, France; email: [thomas.skotnicki@st.com](mailto:thomas.skotnicki@st.com)

Nominalna długość bramki tranzystora dla najbardziej zaawansowanych technologii CMOS, które są jeszcze w fazie prac rozwojowych, wynosi około 20 nm. Oznacza to nie więcej niż 60 atomów krzemu wzdłuż kanału tranzystora. W planach rozwojowych przemysłu przewiduje się, że około roku 2020 długość bramki wyniesie 6 nm, czyli nie więcej niż 20 atomów krzemu wzdłuż kanału. W tych warunkach ani technologia produkcji, ani przepływ elektronów w tranzystorze nie mogą być rozważane jako procesy o charakterze ciągłym, którymi rządzą prawa wynikające z uśrednienia wielkich liczb. W dodatku elektrony w kanale podlegają więzom kwantowym oraz poruszają się w obszarze, w którym panują silne naprężenia mechaniczne, co zmienia strukturę pasm energetycznych półprzewodnika. Procesy produkcyjne coraz bardziej przypominają manipulowanie pojedynczymi atomami, a nie obróbkę materiału o charakterze ciągłym. Wystarczy zauważyć, że liczba atomów domieszki, które należy wprowadzić w obszar aktywny kanału tranzystora o długości bramki 20 nm, jest rzędu 4 atomów. Ta liczba atomów, podobnie jak wszystkie wymiary, grubości obszarów i ich fizyczne właściwości, muszą być powtórzone dokładnie i ściśle dla miliarda tranzystorów tworzących współczesny duży układ scalony. Ten miliard bardzo ciasno upakowanych tranzystorów będzie w układzie służył do przetwarzania i przechowywania informacji i tym samym będzie rozpraszać energię. Gdy uświadomimy sobie to wszystko, możemy zdać sobie sprawę z tego, jak gigantyczne problemy musi pokonać przemysł półprzewodnikowy.

W użyciu są już technologie umożliwiające osadzanie warstw z atomową precyzją oraz kontrolowanie wymiarów w procesach litografii i trawienia z dokładnością do ułamka nanometra. Wytworzenie miliarda tranzystorów z taką precyzją jest wielkim wyzwaniem dla przyszłych generacji technologii CMOS, ale także i dla wszystkich innych technologii, jakie są proponowane. Trzeba zdać sobie sprawę, że bez względu na to, jak "szybkie" będą nowo pojawiające się technologie, nie znajdą się one w produkcji, jeśli nie będą umożliwiały lepszej, niż w przypadku technologii CMOS, kontrolowalności procesów wytwarzania elementów w wielkiej liczbie kopii. Podobnie, żadne z nowych technologii nie zastąpią technologii CMOS, jeśli nie będą umożliwiały przetwarzania informacji w sposób bardziej energooszczędny. Z tego punktu widzenia obiecujące w dłuższej perspektywie są nanotechnologie wykorzystujące ideę samoorganizacji oraz elementy, w których przewarżanie informacji nie będzie oparte na transporcie ładunku elektrycznego. Jednak są to obietnice, które mają szansę spełnić się w perspektywie nie mniej niż 20 - 30 lat. W krótszej perspektywie czasowej mamy konkurujące ze sobą różne rodzaje elementów wykorzystujących zasadę transportu ładunku. Zostanie pokazane, że według istniejących ocen żadne z nowo proponowanych elementów nie zapewnią ani większej wydajności, ani lepszej energetycznej efektywności przetwarzania informacji, niż CMOS. Czy się to nam podoba, czy nie, pozostaje nam technologia CMOS, aczkolwiek mogą się w niej zmieniać nie tylko wymiary tranzystorów, ale także postać i charakter tej technologii.

Jest faktem, iż takie zmiany obecnie zachodzą zarówno w samej technologii, jak również w jej zastosowaniach, i to na wszystkich poziomach, od pojedynczego tranzystora aż do kompletnego systemu, i odpowiednio do tego zmieniają się kryteria i wymagania. Tradycyjne cele rozwoju, takie jak dążenie do maksymalnego stopnia scalenia i możliwie jak największej szybkości działania układów, ustępują innym, takim jak minimalny pobór mocy i rozpraszana energia (urządzenia mobilne!), możliwości łączenia funkcji realizowanych cyfrowo, analogowo, pamięci, bloków RF (scalanie kompletnych funkcjonalnie systemów), poziom rozrzutów produkcyjnych i produkowalność. Trzeba będzie poradzić sobie z licznymi wyzwaniami, potrzebne będą rozległe prace badawcze i rozwojowe we wszystkich obszarach, jak struktura tranzystora, litografia, technologia połączeń, technologie pamięci. Optymistyczne przesłanie jest takie, że technologia CMOS nie traci rozpędu na żadnym z poziomów: tranzystora, układu, systemu. Nie tylko stała się ona autentyczną nanotechnologią, ale można też oczekiwać, że jeszcze na długo pozostanie podstawową technologią przetwarzania informacji, jaką dysponuje ludzkość.