

# OD MIKROELEKTRONIKI DO MIKROSYSTEMÓW, CZYLI O ROLI I ZNACZENIU KRZEMU

## Streszczenie

W artykule zwrócono uwagę na znaczenie krzemu i technologii krzemowej zarówno w rozwoju mikroelektroniki – a co za tym idzie – także informatyki, a także w rozwoju mikrosystemów (ang.: MEMS – Micro-Electromechanical System), gdzie łączy się elektronikę z mikromechaniką, oraz w rozwoju zminiaturyzowanych systemów do całkowitych analiz chemicznych (ang.:  $\mu$ TAS – Micro Total Analysis System).

In this paper, the role of silicon for development of computer technology is emphasized. It is noticed that Micro-System Technology (MST) as well as Technology of Micro Total Analysis System ( $\mu$ TAS) are also derived from silicon technology. Hence, the importance of silicon in many modern human activities is concluded.

## 1. WPROWADZENIE

Głównym składnikiem piasku jest krzem, który pod względem ilości jest drugim po tlenie pierwiastkiem występującym w skorupie ziemskiej. Bez krzemu nie byłby możliwy tak szeroki rozwój informatyki: jest to podstawowy materiał wykorzystywany w technologii cyfrowych układów scalonych, czyli w technologii wszystkich najistotniejszych składników komputera takich jak procesor, pamięć itp. W ostatnich dziesięcioleciach dwudziestego wieku odkryto także inne możliwości zastosowania krzemu. Stwierdzono, że ma znakomite własności mechaniczne – w pewnych aspektach lepsze niż stal. W związku z tym, powstały nowe dziedziny techniki, takie jak np. technologia mikrosystemów, gdzie krzem jest wykorzystywany do realizacji struktur mechanicznych oraz elektronicznych układów sterujących.

Niniejszy artykuł jest popularyzatorską próbą pokazania znaczenia krzemu w mikroelektronice (a więc również w informatyce), a także w mikrosystemach mikro-elektromechanicznych oraz w mikrosystemach do analityki chemicznej. Należy

<sup>1</sup>Dr inż. Zenon Gniazdowski jest wykładowcą w Warszawskiej Wyższej Szkole Informatyki i adiunktem w Instytucie Technologii Elektronowej.

przy tym wyjaśnić, że wobec popularyzatorskiego charakteru i szerokiego zakresu poruszanych zagadnień, artykuł z konieczności zawiera wiele uproszczeń.

## 2. LOGIKA, A KOMPUTERY

Obserwując komputer, można wyodrębnić dwie platformy. Jedną z nich to platforma sprzętowa, druga programowa. Najważniejszym elementem platformy programowej jest system operacyjny, który zarządza pracą komputera. Poza tym, elementami tej platformy są wszystkie aplikacje współpracujące z systemem operacyjnym. Platforma sprzętowa to procesor, pamięć, wszelkie urządzenia wejściowe i wyjściowe. Truizmem jest stwierdzenie, że obydwie platformy nie mogą bez siebie funkcjonować.

W świadomości powszechnej praca informatyka jest raczej związana z platformą programową – bez względu na to czy jest to jej instalowanie, czy też posługiwanie się nią albo jej tworzenie. U jej podstaw leży wykorzystanie logiki. Z pewnością, żadna sensowna aplikacja nie może działać wbrew prawom logiki lub obok nich.

Platforma sprzętowa jest jakby zadana z góry. Przez to jest ona mniej znana. W sensie potocznym, ta platforma jest na pewno zrealizowana zgodnie z prawami logiki – podobnie jak każde dzieło inżynierskie. Z drugiej strony wcale nie jest oczywiste, że elementy składowe komputera realizują operacje logiczne w ścisłym matematycznym tego słowa znaczeniu. Dlatego warto prześledzić, jaki jest związek klasycznej logiki z architekturą komputera.

### 2.1. Logika

Historia logiki sięga starożytnej Grecji, gdzie Arystoteles (384 – 322 p.n.e.) zbudował pierwszy system logiki formalnej, będący logiką też zbudowanych ze stałych logicznych i zmiennych zdań oraz logiką nazw [1]. System ten służył dowodzeniu twierdzeń filozoficznych. Arystotelesowi znane było prawo wyłączonego środka oraz prawo sprzeczności [2], a więc znane mu było pojęcie prawdy i fałszu. Pierwszy system dwuwartościowej logiki zdań opracowali stoicy – również w Grecji – w III wieku p.n.e. Według nich każde zdanie jest prawdziwe, bądź fałszywe. W logice stoików występują m.in. spójniki międzydaniowe „i”, „jeżeli ..., to ...” oraz „albo”, a także negacja „nie” [1].

### 2.2. Algebra Boole’a

W XIX w. George Boole jako pierwszy dostrzegł podobieństwo pomiędzy logiką zdań, a prawami arytmetyki. Na ich podstawie podjął on próbę zbudowania logiki formalnej, posługując się językiem arytmetyki. W ten sposób zaczęła powstawać algebra logiki, nazwana algebrą Boole’a [1].

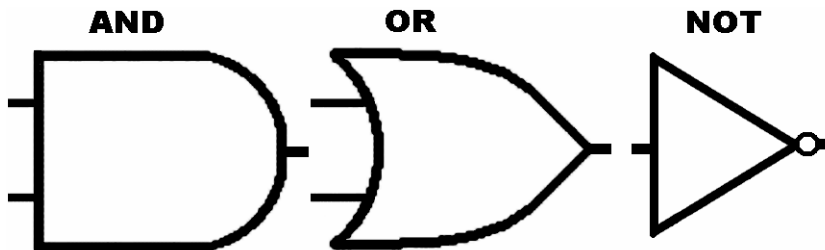
**Tab. 1. Analogie pomiędzy logiką, a algebrą Boole'a**

Logika	Algebra Boole'a
W języku logiki mówi się o zdaniach.	Język algebry Boola posługuje się pojęciem zmiennej
Zdanie jest fałszywe albo prawdziwe.	Zmienna może przyjąć jedną z dwóch wartości: zero albo jeden
Zdanie można zaprzeczyć: zaprzeczone zdanie prawdziwe stanie się zdaniem fałszywym i odwrotnie – zaprzeczone zdanie fałszywe stanie się zdaniem prawdziwym.	Zmienną można zanegować: zanegowana zmienna równa 1 przyjmie wartość 0 – zanegowana zmienna równa 0 przyjmie wartość 1.
Dwa zdania połączone spójnikiem „i” nazywane są koniunkcją zdań. Koniunkcja jest prawdziwa tylko wtedy, gdy obydwa zdania składowe są jednocześnie prawdziwe.	Odpowiednikiem koniunkcji dwóch zdań w algebrze Boola jest ich iloczyn, który jest równy 1 tylko wtedy, gdy obydwie zmienne są jednocześnie równe 1.
Dwa zdania połączone spójnikiem „lub” nazywane są alternatywą zdań. Alternatywa jest prawdziwa wtedy, gdy co najmniej jedno ze zdań składowych jest prawdziwe.	Algebraicznym odpowiednikiem alternatywy dwóch zdań jest ich suma, która jest równa 1 tylko wtedy, gdy co najmniej jeden ze składników sumy jest równy 1.

Tab. 1. Przedstawia analogie pomiędzy logiką a algebrą Boole'a. Na ich podstawie można powiedzieć, że algebra Boole'a jest matematycznym modelem logiki zdań.

### 2.3. Technika cyfrowa

Kolejnym krokiem jest budowa modeli operacji boolowskich w postaci układów elektronicznych zwanych bramkami logicznymi. Zajmuje się tym technika cyfrowa. Najprościej mówiąc, w technice cyfrowej zmienne boolowskie równe zero lub jeden reprezentowane są odpowiednio przez najniższe lub najwyższe wartości napięć występujących w układzie elektronicznym. Operacje iloczynu lub sumy dwóch zmiennych oraz negacja pojedynczej zmiennej (w logice – koniunkcja lub alternatywa oraz zaprzeczenie) realizowane są przez bramki logiczne odpowiednio AND, OR oraz NOT. Przy ich pomocy można zrealizować dowolną funkcję boolowską. Oznacza to, że te trzy podstawowe bramki są konieczne i wystarczające do realizacji dowolnego układu cyfrowego. Ich symbole przedstawia Rys.1



Rys.1. Symbole podstawowych bramek logicznych AND, OR i NOT.

W szczególności np. wśród rozkazów mikroprocesora jest sumowanie dwóch liczb dwójkowych. Operacja ta musi być zrealizowana sprzętowo. Sumowanie dwóch liczb binarnych można zrealizować przy pomocy bramek logicznych tworzących urządzenie zwane sumatorem. Podobnie, z bramek można zrealizować dowolne inne urządzenia cyfrowe, np. dekodery – demultipleksery, który m.in. może być wykorzystany do wyboru adresu odpowiedniego urządzenia występującego w systemie komputerowym, albo podstawowe komórki pamiętające, zwane rejestrami. Rozumując podobnie, można stworzyć całą logiczną strukturę mikroprocesora.

Konsekwencją przedstawionego wyżej rozumowania jest stwierdzenie, że co prawda komputer jest urządzeniem wynalezionym i zrealizowanym współcześnie, to z całą pewnością jego korzenie są umocowane w logice, a przez to sięgają starożytności.

### 3. MIKROELEKTRONIKA

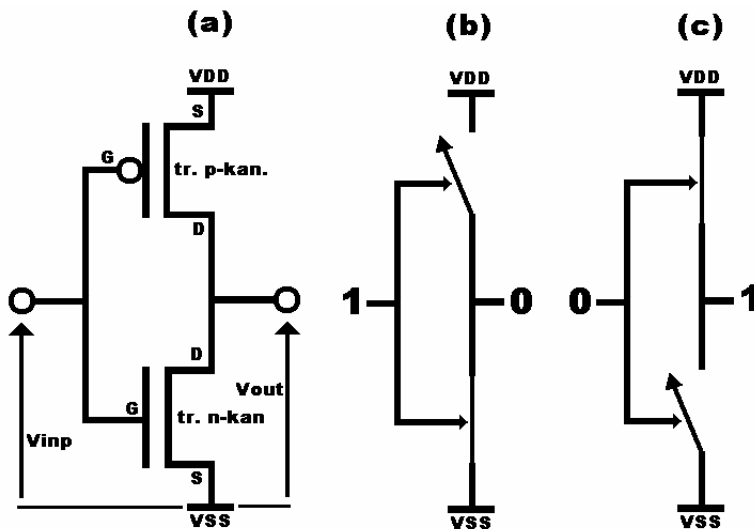
Pomijając pewne szczegóły historyczne, można powiedzieć, że w chwili obecnej do realizacji bramek logicznych potrzebne są tranzystory polowe z bramką izolowaną, zwane tranzystorami MOS<sup>2</sup>. Układy cyfrowe realizuje się jako układy CMOS (ang. Complementary MOS). Ich charakterystyczną cechą jest to, że każde wejście bramki logicznej steruje bramkami dwóch komplementarnych tranzystorów MOS: n-kanalowego i p-kanalowego<sup>3</sup>. Na Rys. 2 (a) pokazano schemat inwertera<sup>4</sup> CMOS. Na Rys. 2 (b) i (c) pokazano zasadę jego działania. Zasada ta wynika z faktu, że tranzystor MOS przy napięciu na bramce niskim (zero logiczne) lub wysokim (jedyńka logiczna) działa jak klucz, który może pozwolić na przepływ prądu, lub może ten przepływ uniemożliwić. Przy podanej na bramkę tranzystora n-kanalowego jedynie logicznej, pomiędzy drenem (D) i źródłem (S) tranzystora może płynąć prąd. Przy zerze logicznym ten prąd nie płynie. W tranzystorze p-kanalowym sytuacja jest odwrotna<sup>5</sup> – przepływ prądu może mieć miejsce przy zerze logicznym na bramce tranzystora. Stąd wynika fakt, że w stanie ustalonym (zera lub jedynki logicznej na wejściu) przez inwerter nie płynie prąd, gdyż jeden z tranzystorów jest zawsze zatkany. Oznacza to, że inwerter nie pobiera mocy. Jednocześnie, cechą wszystkich bramek CMOS jest to, że w stanie statycznym nie pobierają mocy. Pobór mocy ma miejsce tylko w trakcie przełączania bramki, a więc rośnie z częstością dokonywanych przełączeń.

<sup>2</sup> MOS jest skrótem od angielskich słów „Metal – Oxide – Semiconductor”. W strukturze tranzystora MOS przewodząca bramka (np. aluminiowa – stąd słowo „Metal”) jest oddzielona od półprzewodnikowego podłoża (Semiconductor – półprzewodnik) warstwą izolacyjną SiO<sub>2</sub> (Oxide – tlenek).

<sup>3</sup> W tranzystorze n-kanalowym nośnikami prądu są elektrony, zaś w tranzystorze p-kanalowym – dziury.

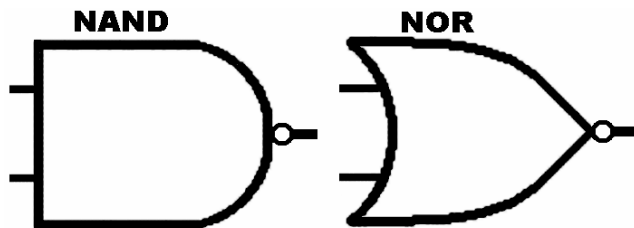
<sup>4</sup> Bramka NOT bywa nazywana inwerterem.

<sup>5</sup> Fakt ten zaznaczono kółkiem od strony bramki tranzystora p-kanalowego.



Rys. 2. Inwerter CMOS: (a) schemat elektryczny; (b) stan inwertera przy jedynce logicznej na wejściu; (c) stan inwertera przy zerze logicznym na wejściu;

Dodając do inwertera kolejne komplementarne pary tranzystorów można otrzymać bramki NAND (NOT AND – zaprzeczony iloczyn) lub NOR (NOT OR – zaprzeczona suma). Inwerter oraz bramki NAND i NOR są bramkami podstawowymi dla techniki CMOS. Jednocześnie można dowieść, że bramki NAND albo NOR są bramkami uniwersalnymi w tym sensie, że z samych bramek NAND albo samych bramek NOR można zbudować bramki AND, OR i NOT. Oznacza to, że bramki NAND albo NOR są wystarczające do realizacji dowolnej funkcji boolowskiej [3]. Na Rys. 3 przedstawiono symbole dwuwejściowych bramek uniwersalnych NAND i NOR.

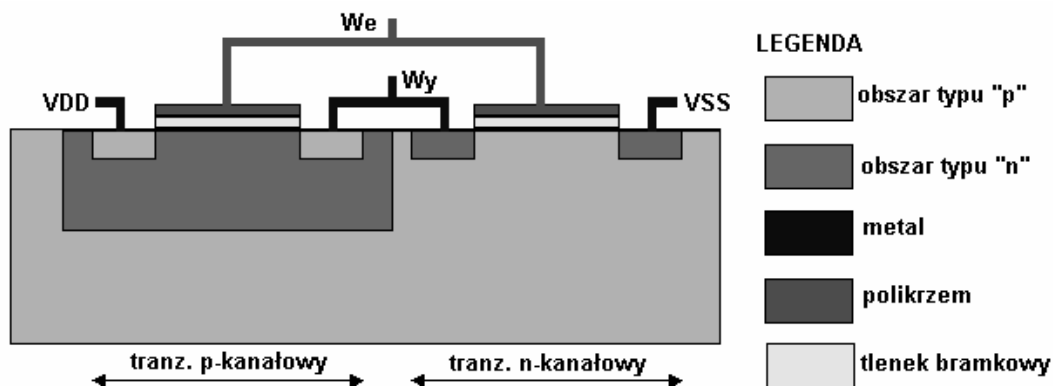


Rys. 3. Symbole bramek uniwersalnych NAND i NOR

### 3.1. Technologia krzemowa

Układy cyfrowe wykorzystywane w technice komputerowej realizowane są w postaci monolitycznych krzemowych planarnych układów scalonych realizowanych

w technologii CMOS<sup>6</sup>. Na Rys. 4 pokazano uproszczoną strukturę przykładowego inwertera CMOS. Na przedstawionym przykładzie tranzystor n-kanalowy jest umieszczony bezpośrednio na podłożu typu „p”, zaś tranzystor p-kanalowy zrealizowany jest w obszarze wyspy typu „n”.



Rys. 4. Uproszczony przekrój inwertera CMOS z bramką polikrzemową. Przez „We” i „Wy” oznaczono odpowiednio wejście i wyjście inwertera. Symbolami „VDD” i „VSS” oznaczono odpowiednio wysoki i niski potencjał zasilania.

Podstawową przyczyną dominacji technologii CMOS na rynku układów cyfrowych jest to, że układy CMOS w stanie statycznym nie pobierają mocy<sup>7</sup>. Z drugiej strony w mikroelektronice istnieje możliwość skalowania przyrządów, polegająca z jednej strony na zmniejszaniu ich wymiarów geometrycznych, a także na idącymi za tym korzystnymi zmianami ich parametrów. W efekcie daje to mniejsze przyrządy, a więc możliwość ich większego upakowania, a w dalszej kolejności większe możliwości układu cyfrowego, oraz poprawę jego parametrów funkcjonalnych<sup>8</sup>.

Tab. 2. Rozwój technologii układów cyfrowych [4]

Rok	Procesor	Reguły projektowania [μm]	Liczba tranzystorów na strukturze	Częstotliwość pracy [Hz]
1971	4004	10	2300	7.4E+05
1972	8008	10	3500	8.0E+05
1974	8080	6	6000	2.0E+06
1976	8085	3	6500	5.0E+06

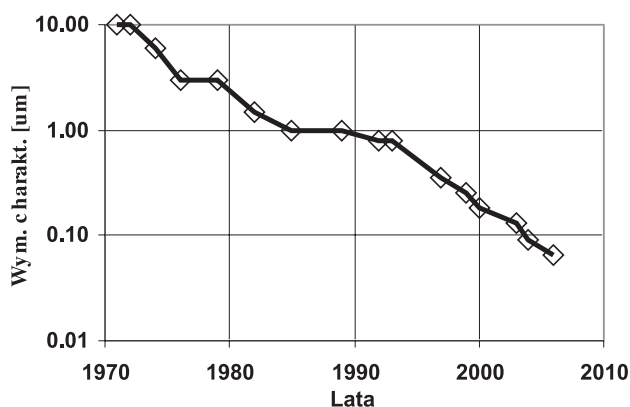
<sup>6</sup> Na początku lat siedemdziesiątych dwudziestego wieku firma Intel realizowała procesory 4004 i 8008 w technologii z tranzystorami p-kanalowymi (PMOS). Procesor 8080 zrealizowano w roku 1974 w technologii NMOS – z tranzystorami n-kanalowymi. W drugiej połowie lat osiemdziesiątych zaczęto stosować technologię CMOS, uzyskując dzięki temu istotny spadek zużywanej mocy.

<sup>7</sup> Należy zauważyć, że ze wzrostem częstotliwości pobór mocy rośnie.

<sup>8</sup> Np. wzrost częstotliwości pracy układu, zmniejszenie gęstości wydzielanej mocy.

Rok	Processor	Reguły projektowania [ $\mu\text{m}$ ]	Liczba tranzystorów na strukturze	Częstotliwość pracy [Hz]
1979	8088	3	29000	8.0E+06
1982	80286	1.5	134000	1.3E+07
1985	80386DX	1	275000	1.6E+07
1989	80486DX	1	1.20E+06	2.5E+07
1992	80486DX2	0.8	1.20E+06	5.0E+07
1993	Pentium	0.8	3.10E+06	5.0E+07
1997	Pentium MMX	0.35	4.50E+06	1.7E+08
1999	Pentium III	0.25	9.50E+06	4.5E+08
2000	Celeron	0.18	2.81E+07	5.3E+08
2003	Pentium M	0.13	7.70E+07	9.0E+08
2004	Itanium 2	0.13	5.92E+08	1.6E+09
2004	Pentium 4E	0.09	1.25E+08	3.4E+09
2006		0.065		

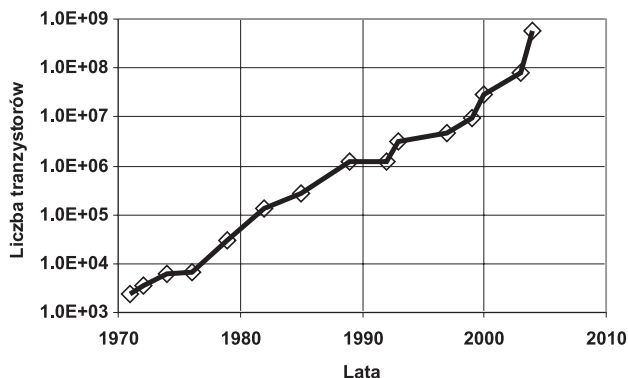
W Tab. 2 przedstawiono zestawienie zawierające daty wprowadzenia na rynek kolejnych typów procesorów wraz z towarzyszącymi im zmianami w technologii i ich parametrach [4]. Szczególnie istotnym parametrem opisującym technologię jest tzw. wymiar charakterystyczny określający reguły projektowania. Wymiar ten określa minimalny projektowany wymiar boczny (długość, szerokość) elementu w układzie scalonym<sup>9</sup>. Na początku lat siedemdziesiątych ten wymiar wynosił 10  $\mu\text{m}$ , w roku 2005 tylko 0.09  $\mu\text{m}$ , a w latach 2006 – 2007 ten wymiar ma być na poziomie 0.065  $\mu\text{m}$ . Oznacza to, że powierzchnia przyrządów (tranzystorów) w ciągu trzydziestu kilku lat zmalała ponad dziesięć tysięcy razy. Na Rys. 5 przedstawiono wykres zmian reguł projektowania w ciągu tych lat.



Rys. 5. Zmiana reguł projektowania w funkcji czasu

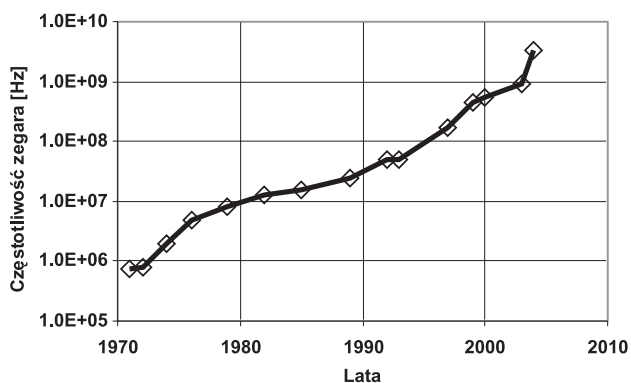
<sup>9</sup> Ponieważ przyrządy (tranzystory) są definiowane przez wzajemne relacje określonych obszarów na strukturze układu, to wymiar charakterystyczny określa minimalne rozmiary obszarów, minimalne między nimi odstępów w płaszczyźnie poziomej oraz minimalne zakładki obszarów leżących jeden nad drugim.

Z maleniem powierzchni tranzystorów rosła ich liczba na strukturze układu scalonego. Dzięki temu rosły możliwości funkcjonalne budowanych procesorów. Najpierw były to procesory 4-bitowe, potem 8, 16, 32, a w chwili obecnej już 64-bitowe. Procesor 4004 w swojej strukturze zawierał 2300 tranzystorów. Obecnie ich liczba zbliża się do miliarda. Oznacza to, że w ciągu trzydziestu lat liczba tranzystorów w strukturze procesora wzrosła kilkadziesiąt tysięcy razy. Na Rys. 6 przedstawiono wykres zmian liczby tranzystorów w strukturze procesora w funkcji czasu.



Rys. 6. Zmiana liczby tranzystorów w funkcji czasu

Jak wcześniej wspomniano, wraz z maleniem tranzystorów oraz ze wzrostem ich liczby w strukturze procesora poprawiały się parametry funkcjonalne procesorów, w tym wzrosła także ich częstotliwość pracy. Pierwsze procesory pracowały z częstotliwością kilkudziesięciu kHz. Obecnie ich częstotliwość przekracza 1 GHz. W ciągu trzydziestu lat nastąpił ponad tysiąckrotny jej wzrost. Na Rys. 7 pokazano zmiany częstotliwości pracy procesorów wyszczególnionych w Tab. 2 w funkcji czasu.



Rys. 7. Zmiana częstotliwości pracy procesorów w funkcji czasu



### 3.2. Prawo Moore'a

Wzrost upakowania liczby tranzystorów na strukturze procesora (ogólniej – układu scalonego) da się opisać przy pomocy prawa sformułowanego w roku 1965 przez Gordona Moore'a, współzałożyciela firm Fairchild oraz Intel. Moore zauważył, że liczba elementów na strukturze podwaja się corocznie. Na tej podstawie oszacował, że w roku 1975 na strukturze powinno być 65 tysięcy elementów. W tymże 1975 prawo Moore'a zostało zrewidowane. Stwierdzono, że liczba elementów podwaja się co półtora roku [5].

Przez całe następane lata prawo Moore'a wykorzystywano do prognozowania rozwoju mikroelektroniki. Rozwój ten, postępujący zgodnie z tym prawem, spowodował dramatyczne zmiany, najpierw w rozmiarze pojedynczych elementów, a w konsekwencji także w ich cenie<sup>10</sup>. Dzięki temu nastąpił m.in. rewolucyjny rozwój informatyki. Szczególnie ostro to widać, porównując chociażby komputery używane na początku lat osiemdziesiątych dwudziestego wieku (ich wielkość, moc obliczeniową, dostępność oraz możliwe aplikacje) z tymi, które w chwili obecnej są wykorzystywane.

Gdyby prawo Moore'a obowiązywało w innych dziedzinach niż mikroelektronika, to jego skutki widoczne by były zarówno kosztach jak i możliwościach oferowanych przez te dziedziny. Np. koszt oraz czas przelotu samolotem z Europy do Ameryki Północnej byłyby niewyobrażalnie niskie. Niestety, poza mikroelektroniką prawo Moore'a nie obowiązuje [5].

## 4. MIKROSYSTEMY

Jak wcześniej pokazano, krzemowa technologia mikroelektroniczna służąca produkcji układów scalonych (w szczególności układów cyfrowych) rozwinęła się w ciągu ostatnich trzydziestu kilku lat w sposób niezwykle dynamiczny. Jednocześnie stwierdzono, że krzem ma bardzo interesujące własności. Przede wszystkim jego własności mechaniczne są porównywalne, a nawet lepsze niż własności stali. Z drugiej strony już na początku lat pięćdziesiątych XX w. odkryto zjawisko piezorezystancyjne w krzemie, polegające na tym, że krzem ma własności umożliwiające konwersję sygnałów mechanicznych, poprzez pojawiające się w jego strukturze naprężenia, na zmiany własności rezystancyjnych warstw domieszkowanych. Do tego trzeba dodać, że technologia mikroelektroniczna wzbogacona o techniki trawienia anizotropowego pozwala „rzeźbić” stosowne kształty w krzemie. To wszystko dało początek systemom mikroelektromechanicznym albo mikrosystemom<sup>11</sup>, pośród któ-

<sup>10</sup> Rozmiar tranzystora jest obecnie taki, że na główce szpilki można by umieścić około 200 milionów tranzystorów, zaś cena jednego tranzystora jest taka sama jak cena wydrukowanej litery w gazecie [5].

<sup>11</sup> W literaturze anglojęzycznej na ich określenie używa się różnych skrótów: MEMS – micro-electromechanical system, MST – microsystem technology, albo micromachines [7].

rych wyróżnia się dwie grupy urządzeń. Są to czujniki i aktywatory, czyli elementy wykonawcze – powodujące powstawanie ruchu (ang.: sensors and actuators).

Technologia mikrosystemów umożliwiła przede wszystkim miniaturyzację bardzo wielu przyrządów mechanicznych, które dotychczas miniaturowymi nie były. Jednymi z pierwszych takich przyrządów były czujniki piezorezystywne. W czujnikach tych wykorzystuje obszar aktywny w postaci krzemowej membrany lub belki, na którym znajdują się odpowiednio rozmieszczone piezorezystory<sup>12</sup>, które powinny być odpowiednio zorientowane zarówno względem krystalicznej struktury krzemu jak i względem składowych naprężeń. Przykładem takiego czujnika może być czujnik siły w postaci belki krzemowej z odpowiednio ułożonymi piezorezystorami. Jest on przeznaczony dla mikroroboty pracującego w komorze elektrycznej mikroskopu skaningowego<sup>13</sup> [6]. Na etapie jego projektowania przyjęto, że powinien on mierzyć siły o wartościach od pojedynczych mN do dziesiątek mN<sup>14</sup>. Rozmiary struktury (w zależności od wariantu konstrukcyjnego) przyjmowano następujące: grubość belki około kilkadziesiąt  $\mu\text{m}$ <sup>15</sup>, długość rzędu kilku tysięcy  $\mu\text{m}$  (kilku mm), szerokość ponad 300  $\mu\text{m}$  (0.3 mm). Struktura czujnika była wykonywana na płytkach krzemowych o grubości ok. 400  $\mu\text{m}$  (0.4 mm). Cztery piezorezystory umieszczono u nasady belki. Dwa z nich umieszczono wzdłuż belki – w tych dominują naprężenia wzdłużne rozciągające. Pozostałe dwa piezorezystory umieszczono w poprzek – tu dominują naprężenia poprzeczne rozciągające. Elektryczne połączenia pomiędzy rezystorami tworzą mostek Wheatstona. Podanie obciążenia mechanicznego na strukturę czujnika powoduje powstanie naprężeń w jego obszarze aktywnym, które z kolei powodują zmianę rezystancji piezorezystorów, wyprowadzając mostek pomiarowy z równowagi elektrycznej. Na Rys. 8 pokazano przykład wyników modelowania ugięcia czujnika pod wpływem siły. Modelowanie wykonano na etapie projektowania struktury czujnika.



Rys. 8. Ugięcie belki o długości 2500 $\mu\text{m}$ , szerokości 350 $\mu\text{m}$  i grubości 20 $\mu\text{m}$  pod wpływem siły 1mN przyłożonej na końcu belki i skierowanej w kierunku osi Y – ugięcie belki na końcu wynosi ponad 130  $\mu\text{m}$ .

<sup>12</sup> Piezorezystor jest elementem o rezystancji zależnej od naprężenia.

<sup>13</sup> Czujnik zrealizowano w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie w ramach europejskiego projektu badawczego ROBOSEM.

<sup>14</sup> Siła 1 mN (miliNewton) jest równoważna ok. 0,1G.

<sup>15</sup> Odległość 1 $\mu\text{m}$  jest równa 0.001mm.

Poza przyrządami mikromechanicznymi, buduje się także miniaturowe urządzenia do analiz chemicznych zarówno gazowych jak i cieczowych. Zastępują one dotychczasowe reaktory znane z laboratoriów chemicznych. Przyrządy te określa się mianem mikroTASy, od angielskiego skrótu microTAS – micro Total Analysis System. Przykładem takiego urządzenia może być zintegrowany analizator składu gazów kopalnianych, będący w praktyce przenośnym, zminiaturyzowanym chromatografem gazowym, współpracującym z komputerem. Innym przykładem może być miniaturowe urządzenie do badania próbek DNA, dla potrzeb diagnostyki medycznej. Obydwa te urządzenia charakteryzują się znacznie zmniejszonymi rozmiarami, istotnie krótszymi czasami analiz oraz tym, że są zautomatyzowane. Wszystkie te cechy wyróżniają je w porównaniu z ich klasycznymi pierwowzorami.

Wspomniane wyżej mikrosystemy mechaniczne, czy też chemiczne nie zawsze są wytworzone z krzemu. Jednakże krzem i technologia krzemowa mają ogromne znaczenie w ich wytwarzaniu. Najpierw dlatego, że w bardzo wielu przypadkach krzem stanowi podłoże na którym przyrządy te są wytwarzane. Z kolei także dlatego, że do ich wykonania wykorzystuje się związki krzemu. Głównie jednak dlatego, że do realizacji mikrosystemów wykorzystuje się wiele elementów mikroelektronicznej technologii krzemowej. Bez elementów tej technologii niemożliwa byłaby miniaturyzacja.

## 5. ZNACZENIE KRZEMU

Krzem jest pierwiastkiem z czwartej grupy układu okresowego. Jest to półprzewodnik, który przede wszystkim wykorzystywany jest w postaci monokrystalicznej. Monokryształ krzemu jest otrzymywany metodą Czochralskiego<sup>16</sup>, a następnie cięty na płytki i stosownie obrabiany w zależności od potrzeb. Technologia krzemowa oraz krzem jako materiał mają podstawowe znaczenie zarówno w mikroelektronice jak i w mikrosystemach. W pracy [8] zwrócono uwagę, że krzem jest nośnikiem informacji obecnej epoki. Dzięki niemu dokonała się rewolucja, podobnie, jak miało to miejsce 500 lat temu, wraz z odkryciem druku przez Gutenberga. Tab. 3 zawiera analogie pomiędzy obydwojmi nośnikami informacji.

---

<sup>16</sup> Jan Czochralski w okresie międzywojennym był profesorem w Politechnice Warszawskiej. Był on odkrywcą metody wzrostu kryształów, która jest powszechnie wykorzystywana do wytwarzania krzemu monokrystalicznego.

**Tab. 3. Rewolucje w dziedzinie nośników informacji [8]**

Johan Gutenberg	William Shockley
Drewno	Piasek
Kartka papieru	Płytką krzemową
Ryza papieru	Monokrystal krzemu
Drukarnia	Fabryka układów scalonych
Korekta	Testowanie
Tekst, język	Układy logiczne
Wydawnictwa artystyczne, niskonakładowe edycje	Układy specjalizowane
Gazety, tanie książki wielkonakładowe	Układy standardowe

Rewolucja związana z krzemem nie zatrzymała się w obrębie mikroelektroniki, lecz rozprzestrzeniła się poza tę dziedzinę, powodując również rewolucyjne zmiany, prowadzące do mikromechaniki i mikrosystemów, a także zmiany o podobnej skali w dziedzinie przyrządów do analityki chemicznej.

## 6. ZAKOŃCZENIE

W artykule starano się przedstawić rolę i znaczenie krzemu i technologii krzemowej oraz ich wpływ na rozwój informatyki oraz innych dziedzin. Stwierdzono, że rozwój ten miał charakter rewolucji technologicznej. Można się zastanawiać, czy postęp w rozwoju mikroelektroniki krzemowej zgodny z prawem Moore'a będzie miał swój rychły koniec. Mówi się, że może to nastąpić już w ciągu kilku najbliższych lat. Zapewne, dynamika zmian może w sposób istotny ulec zmniejszeniu – krzywa Moore'a może się spłaszczać [9], co dowodziłoby nasycania się rozwoju technologii opartych o krzem. Bez względu na to, czy to nastąpi szybko, czy też nie, znaczenia krzemu dla rozwoju technologicznego i ekonomicznego przełomu wieków dwudziestego i dwudziestego pierwszego nie da się przecenić.

W balladzie „Pani Twardowska” A. Mickiewicza, jej bohater żąda, aby Mefisto niezwłocznie ukręcił mu bicz z piasku, mając nadzieję, że nawet diabeł nie potrafi sprostać jego wyzwaniu – bicz z piasku jest synonimem rzeczy niemożliwej do zrealizowania. Tymczasem zadanie zostaje wykonane. Ale czy potrzeba aż czartowskiej mocy, aby ukręcić bicz z piasku? Opisane wyżej możliwości technologii krzemowej dowodzą tego, że współczesny człowiek potrafi zrobić znacznie więcej niż tylko bicz z piasku.

## Literatura

1. Mała encyklopedia logiki. Red. W. Marciszewski. Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo. Wrocław 1986.
2. Wprowadzenie do filozofii. Praca zbiorowa. Wydawnictwo KUL. Lublin 2003.
3. B. Wilkinson. Układy cyfrowe. WKŁ. Warszawa 2000.
4. [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_Intel\\_microprocessors](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Intel_microprocessors)
5. <http://www.intel.com/technology/mooreslaw/index.htm> i pokrewne linki na tej stronie
6. Z. Gniazdowski: Krzemowe piezorezystywne czujniki wielkości mechanicznych. Teoretyczne i praktyczne aspekty modelowania i konstrukcji.
7. J. W. Judy: Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and. Applications. Smart Mater. Struct. 10 (2001) 1115–1134
8. A. Jakubowski, L. Łukasiak: O telekomunikacyjnych korzyściach z elektroniki wynikających. Przegląd Telekomunikacyjny. Rocznik LXXVI. Nr 1/2003, str. 5-11.
9. T. Dietl: O przyszłości miniaturyzacji. Delta. Nr 10(305) (1999) str. 12

