STUDIA INFORMATICA 2002
Volume 23 Number 2A (48)

Sławomir NOWAK
Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN

KONCEPCJE REALIZACJI PROCESÓW NANOTECHNOLOGICZNYCH[1]

Streszczenie. Artykuł omawia podstawowe założenia i sposób organizacji nanotechnologicznej realizacji produktów, w oparciu o rozwiązania biologiczne i techniczne.

Przedstawiono główne problemy związane z nanotechnologią i możliwe sposoby ich rozwiązania. Przedstawiono również przykładową architekturę złożonego nanosystemu działającego w oparciu o koncepcję Rdzenia Logicznego (Logical Core Architecture).

ARRANGEMENT AND REALIZATION CONCEPTIONS OF NANOTECHNOLOGY PROCESSES

Summary. The paper presents basic assumptions and ways of arrangement which conceded with molecular nanotechnology production based on both biological and technical systems.

There are described main problems of molecular nanotechnology and potential solutions. There are also presented hypothetical architecture of complex nanosystem based on Logical Core Architecture.

1. Wprowadzenie

Jedną z pierwszych osób, które przewidziały dynamiczny rozwój nanotechnologii był znany fizyk Richard Feynman, który pod koniec 1959 roku w Kalifornijskim Instytucie Technologii zaprezentował książkę pod tytułem *„Jest wiele miejsca w środku"* [1]. Twierdził, że kiedyś pojawią się możliwości budowy dowolnie małych, działających maszyn i urządzeń

[1] Artykuł jest częścią projektu badawczego KBN nr 7T11C01721

elektronicznych. Feynman przedstawiał swoje wizje miniaturyzacji, zanim słowo „układ scalony" znalazło się w słownikach.

Obecnie nanotechnologia przestała być obecnie jedynie dziedziną teoretyczną i domeną wizjonerów. Jest dynamicznie rozwijającą się nauką, na którą w wielu krajach przeznacza się znaczne środki. Lista zastosowań nanotechnologii stale rośnie. Jeśli obecny trend do rozwoju nanonauki zostanie utrzymany, można się spodziewać, że odmieni ona większość dziedzin życia.

Przedrostek *nano* oznacza zmniejszenie skali o tysiąc milionów. Wymiar 10^{-9} [m] jest to skala molekuł i poszczególnych atomów. Słowo **nanotechnologia** stało się bardzo popularne dla określenia wielu dziedzin nauki i techniki, operujących na obiektach mniejszych niż 1000 nm, m.in. zaawansowanych technik litograficznych, stosowanych w celu uzyskania układów scalonych o większej skali integracji. W celu ściślejszego określenia technologii, pozwalającej na tworzenie struktur „atom po atomie", wykorzystuje się termin: **nanotechnologia molekularna** (*molecular nanotechnology*).

Aby nanotechnologia molekularna mogła być realizowana, należy spełnić trzy podstawowe warunki:

- umieć umieszczać atomy we właściwych miejscach projektowanych struktur, z dokładnością do ruchów termicznych;
- wytwarzać dowolne struktury, zgodnie z prawami fizycznymi i chemicznymi;
- koszt procesu wytwarzania nie powinien znacząco przekraczać kosztów wymaganych materiałów i potrzebnej energii.

Przykładów na powszechne zastosowanie nanotechnologii dostarcza sama natura, która w ciągu miliardów lat ewolucji wykształciła niezwykle rozbudowane różnorodne mechanizmy molekularnej syntezy. Badanie układów biologicznych dostarcza wiele spektakularnych wzorców. Badając układy biologiczne na poziomie molekularnym, poznajemy rządzące nimi prawa i mechanizmy. Są niewyczerpanym zbiorem elementów, które można zastosować, gotowe lub ulepszone, w technicznej realizacji technologii molekularnej. Nanotechnolodzy nie zamierzają bezwzględnie naśladować natury. Zamiast małowytrzymałych struktur białkowych można skorzystać ze znacznie sztywniejszych struktur, wykorzystujących inny rodzaj wiązań pomiędzy atomami węgla, występujących np. w diamencie lub pojedynczej warstwie grafitowej

Naukowcy i inżynierowie zajmujący się nanotechnologią mają do dyspozycji coraz szerszy zestaw urządzeń umożliwiających im wgląd i manipulacje poszczególnymi atomami. Najbardziej znane to skaningowy mikroskop tunelowy (STM) i mikroskop sił atomowych (AFM), które badają powierzchnię w skali atomowej zbliżając do niej ostrze igły i mierząc prąd tunelowy, który płynie jeszcze przed zetknięciem, albo siłę lokalnego przyciągania molekularnego.

Z nanotechnologią molekularną związane są dwie podstawowe, uzupełniające się, koncepcje wytwarzania:

- **Pozycjonowanie** (*positional assembly*), technika umieszczania reaktywnych cząstek w odpowiednim miejscu i takie kierowanie chemiczną reakcją syntezy, by uzyskać złożoną strukturę, pozwalając na budowę nanomechanizmów z wzajemnie współpracujących, precyzyjnie umieszczonych części;
- **Samoreplikacja** (*self replication*), polegająca na powielaniu się struktur i kierujących nimi programów oraz ich skoordynowanych działań, co pozwala na bardziej efektywne działanie (np. szybsze tworzenie większych struktur).

Obecny stan zaawansowania nanotechnologii obejmuje z jednej strony zaawansowane prace teoretyczne i symulacyjne, w ramach których zaprojektowano układy, które powinny działać zgodnie z przewidywaniami, stanowiąc bazę dla konstrukcji kompleksowych nanosystemów. Zdobyto doświadczenia w zakresie organizacji działających równolegle, złożonych układów, tworzenia sterujących nimi systemów informatyki oraz ich samoreplikacji. Z drugiej strony prowadzone są prace doświadczalne, pozwalające w coraz większym zakresie dokonywać manipulacji pojedynczymi atomami. Rozwój obu tych dziedzin pokazuje, że nie ma ani teoretycznych ani praktycznych barier, które uniemożliwiałyby rozwój nanotechnologii i jej praktyczne wykorzystanie.

1.1. Nanosystemy informatyki

Realizacja i praktyczne wykorzystanie procesów nanotechnologicznych nie są możliwe bez odpowiednich systemów sterowania i kontroli, zwanych **nanosystemami informatyki**, realizujących procesy kodowania, przechowywania, przetwarzania i przekazywania danych [2]. Efektem takich procesów są nie tylko wyniki liczbowe, jako efekt procesów obliczeniowych, lecz także pewne, zaplanowane i zaprogramowane wcześniej urządzenia i struktury.

W szczególności są to **biologiczne systemy nanoinformatyki**, dzięki którym następuje rozwój i samoreplikacja organizmów żywych. Dokładniejszy opis takich systemów wraz z porównaniem do systemów klasycznych można znaleźć m.in. w [2, 3].

Opierając się na tych systemach, a także na doświadczeniach z konwencjonalnymi systemami technicznymi, tworzy się podstawy dla **technicznych systemów nanoinformatyki**.

Istnieją dwie podstawowe idee realizacji takich systemów w oparciu o technologię mechaniczną lub elektroniczną. Odrębną koncepcją jest wykorzystanie systemów biologicznych opartych na DNA. Podstawą badań są w chwili obecnej komputerowe symulacje i modelowanie.

Podstawą koncepcji mechanicznych nanokomputerów jest system podobny do maszyny Babbage'a [10], wykorzystującej przesuwające się pręty, będące nośnikami informacji, poruszane przez układy wałów i przekładni, zrealizowany w nanoskali. Jedną z konkretnych propozycji jest koncepcja logiki prętów (*rod logic*), przedstawiona w [5]. Stany binarne reprezentowane są przez położenie krótkiego, cienkiego pręta. Pręty wykonane byłyby z karbynu, liniowego łańcucha atomów węgla, połączonych na przemian pojedynczymi i potrójnymi wiązaniami, charakteryzującego się sztywnością i twardością. Molekularna bramka logiczna składałaby się z odpowiedniego połączenia między prętami, z których każdy mógł blokować ruch drugiego.

Możliwości realizacji mechanicznych komputerów budzą wiele wątpliwości. Zwolennicy tego rodzaju rozwiązań twierdzą jednak, że konstrukcja tego typu systemów jest możliwa, na co wskazują dokładne badania i symulacje. Opracowano już teoretycznie wiele modeli cząstek, które w nanoskali stanowią odpowiedniki przekładni, łożysk i innych elementów mechanicznych. Co więcej, ziarnistość materii na poziomie molekularnym umożliwi konstruowanie układów działających w sposób znacznie bardziej pewny i możliwy do przewidzenia, niż ma to miejsce w makroskali.

Inna koncepcja budowy nanosystemów informatyki opiera się na rozwinięciu w skali molekularnej tradycyjnych, cyfrowych systemów elektronicznych. Idea polega jednak nie na zwiększaniu skali integracji układów scalonych, lecz na technice molekularnej syntezy, tworzeniu bramek logicznych oraz połączeń z wykorzystaniem pojedynczych atomów i molekuł. Duże nadzieje dla konstrukcji takich układów wiąże się z odkrytymi w 1991 roku nanorurkami węglowymi. Węglowe nanorurki zbudowane są ze zwiniętego arkusza grafitowego, zamkniętego połówkami fullerenu C60. Najcieńsza z możliwych nanorurek ma średnicę 1,38 nm, ale ich długość dochodzi do kilku mikrometrów.

Właściwości elektryczne nanorurki zależą od kierunku, w którym warstwa grafitu została zwinięta w rurkę. Okazało się więc, że w zależności od swojej struktury, nanorurki mogą być przewodnikami lub półprzewodnikami. Wykorzystując ich unikalne właściwości elektryczne można będzie z nich sporządzać złącza przewodnik-półprzewodnik, a także wykorzystywać jako swego rodzaju „nanokable". Jako przykład udanego eksperymentu z nanorurkami można podać udane połączenie elektryczne pomiędzy dwoma złotymi złączami za pomocą jednej molekuły (właśnie nanorurki) [6]. W innym eksperymencie utworzono molekularny rodzaj tranzystora o średnicy około jednej dziesięciotysięcznej średnicy ludzkiego włosa. Zaproponowano też wiele innych możliwych rozwiązań dla konstrukcji złożonych elektronicznych układów logicznych zbudowanych z pojedynczych cząstek [7][8].

Podstawą do opracowywania przyszłych nanosystmemów informatyki musi być uwzględnienie specyfiki tej technologii. Przy projektowaniu takich systemów trzeba brać pod uwagę ogromną liczbę współpracujących elementów, dysponujących ograniczoną pamięcią,

zdolnych do samoreplikacji programowej. Aby wytworzyć pożądaną strukturę, należy opracować metody wzajemnej komunikacji, sposoby sterowania, w dodatku z uwzględnieniem trudności w lokalizacji w trójwymiarowej przestrzeni, w której zachodzą procesy syntezy. Programy muszą działać w środowisku rozproszonym, którego elementy znajdują się w ciągłym ruchu, pełnią różne funkcje oraz powielają się. Trudno tutaj o jakąkolwiek analogię do istniejących rozwiązań w dziedzinie informatyki. To ogromne wyzwanie dla specjalistów zajmujących się przetwarzaniem danych, niezależne od tego, jakim problemem jest fizyczne zaprojektowanie i wytworzenie takich urządzeń.

2. Koncepcje nanotechnologicznego wytwarzania

Podstawą dla nanotechnologicznego procesu tworzenia struktur może być zaprojektowanie i wykonanie w nanoskali specjalnego **montera**, zwanego też asemblerem (*assembler*), działającego zgodnie z odpowiednim programem, potrafiącego wykonywać manipulacje na poziomie atomów. Projekt takiego urządzenia został przedstawiony i dokładnie przeanalizowany od strony chemicznej i fizycznej [4].

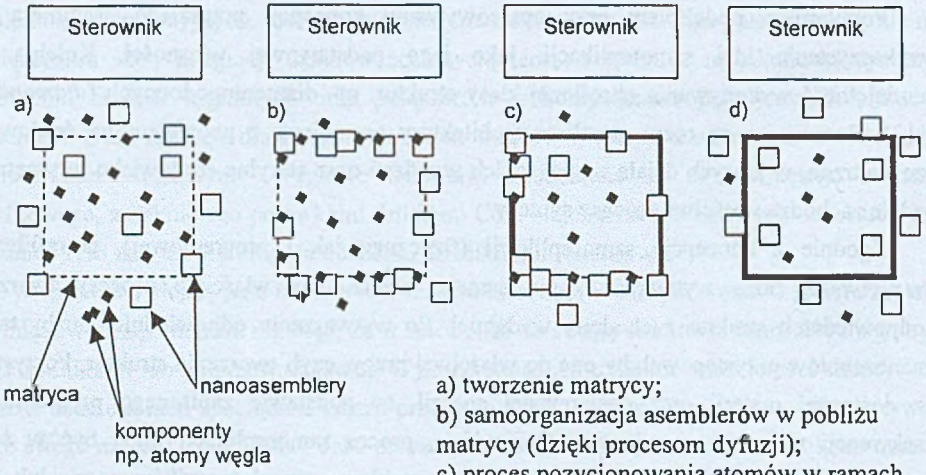
Popularnym podejściem przy opracowywaniu koncepcji przyszłego asemblera jest wykorzystanie idei samoreplikacji, jako jego podstawowej własności. Kolejną jest umiejętność wykonywania określonej klasy struktur, np. diamentopodobnych (*diamondoic*) [12]. Rozważane są różne możliwe architektury asemblera, z podziałem na środowisko zewnętrzne, w których działa zespół takich urządzeń oraz sterylne środowisko wewnętrzne, gdzie zachodzą właściwe procesy syntezy.

Zgodnie z koncepcją samoreplikacji (fizycznej, jak i programowej), potrafiłby on w pierwszej fazie wytwarzać kopie samego siebie, aby właściwe procesy tworzenia odpowiednich struktur zachodziły wydajniej. Po wytworzeniu odpowiedniej liczby takich nanorobotów przystępowałyby one do właściwej pracy, czyli tworzenia struktur, korzystając z dostępnej materii oraz dostarczonej energii, na podstawie zapisanego programu lub sekwencji sygnałów sterujących. Oczywiście, proces samoreplikacji musi być w ścisły sposób kontrolowany, gdyż istnieje poważny problem „**szarej masy**" (*gray goo* lub *Start Trek scenario*) [11], czyli niekontrolowanego procesu powielania się błędnie działających mechanizmów, który mógłby doprowadzić do, trudnej do przewidzenia w swoich skutkach, katastrofy.

Poważnym problemem jest wzajemna współpraca zespołu asemblerów, która prowadziłaby do powstania pożądanej struktury makroskopowej, w szczególności ich wzajemna lokalizacja w przestrzeni, sposób i organizacja wymiany danych oraz sterowania całym systemem. Ograniczeniem wydaje się też być, na obecnym etapie, wspomniana

zdolność do samoreplikacji, która czyni poszczególne elementy znacznie bardziej złożonymi, jednocześnie zwiększając ryzyko błędu i w rezultacie niekontrolowanych i trudnych do przewidzenia działań. Złożoność asemblera zdolnego do wytwarzania określonej klasy struktur, w porównaniu do takiego, który jest jednocześnie zdolny do samoreplikacji, jest nieporównywalnie mniejsza, zarówno w części związanej pozycjonowaniem atomów, jak i sterującej (logika i pamięć komputera sterującego). Tym bardziej, że w przypadku procesów wytwarzania w ramach pewnego zamkniętego środowiska liczba działających w nim urządzeń zostanie w końcu ograniczona, a ich zdolność do samoreplikacji pozostanie niewykorzystana.

Należy się więc spodziewać w pierwszej kolejności opracowania prostych nanourządzeń zdolnych do pozycjonowania atomów we wskazanych miejscach, współpracujących za to z rozbudowanymi, makroskopowymi systemami sterowania (rys. 1). Sterownik taki tworzyłby w pierwszej kolejności matrycę (idea podobna do tej wykorzystywanej w kserokopiarkach), następnie przekazywałby do monterów, organizujących się w pobliżu matrycy, sygnały sterujące. Takie rozwiązanie ogranicza potrzebę wzajemnej interakcji obiektów oraz konieczność ich lokalizacji w przestrzeni.

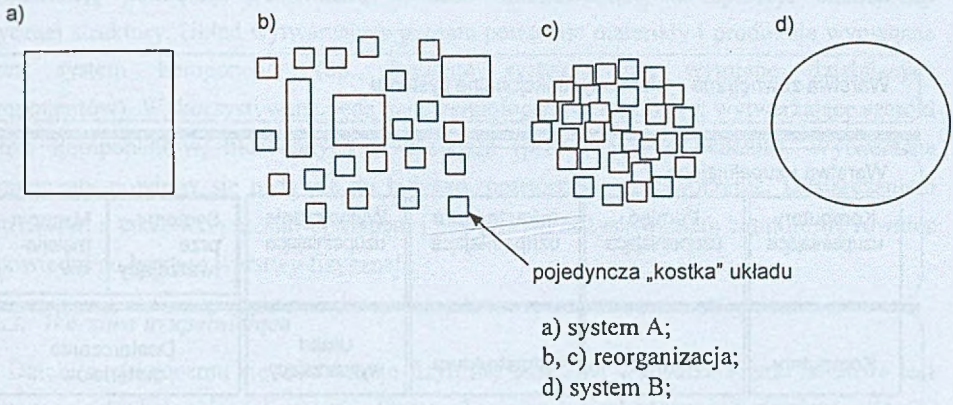


a) tworzenie matrycy;
b) samoorganizacja asemblerów w pobliżu matrycy (dzięki procesom dyfuzji);
c) proces pozycjonowania atomów w ramach struktury;
d) zakończenie procesu wytwarzania struktury

Rys. 1. Koncepcja procesu wytwarzania w makroasemblerze
Fig. 1. The idea of creation process in a macroassembler

Inną możliwością tworzenia struktur makroskopowych są **urządzenia polimorficzne**, złożone z wielu podstawowych układów w skali nano (kostek podstawowych), zdolne do

organizowania się w miarę potrzeb w większe makrostruktury (rys. 2). Tak jak każda technologia związana jest z pewnymi typami architektur, tak systemy (architektury) polimorficzne wydają się być najbardziej odpowiednie dla przyszłej, zaawansowanej nanotechnologii. O ile sama koncepcja budowy takich systemów jest zrozumiała (tworzenie rozbudowanych struktur z prostych „klocków"), to problemem pozostaje logiczna organizacja poszczególnych elementów, jak i komunikacja w ramach całego, złożonego układu.



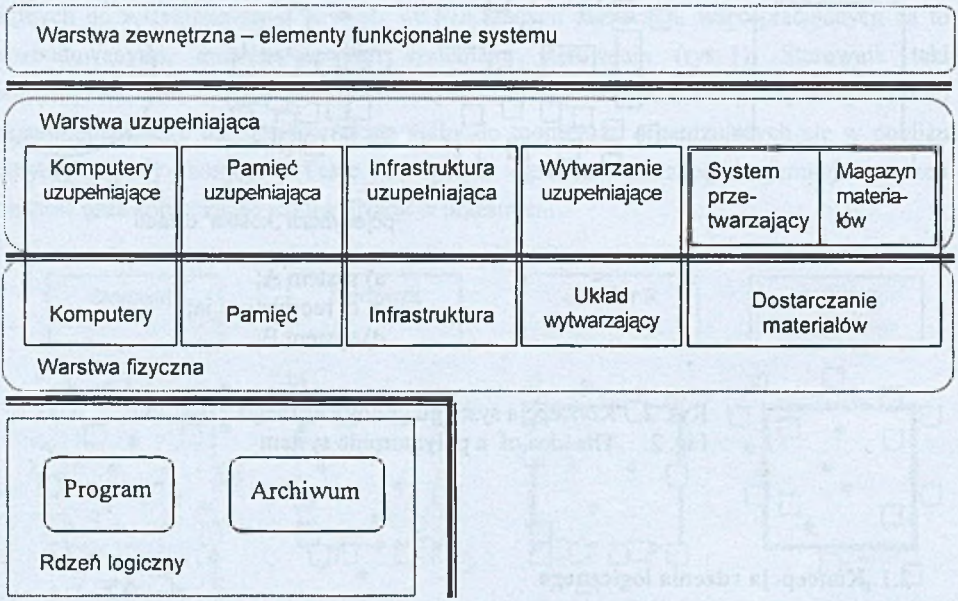
Rys. 2. Koncepcja systemu polimorficznego
Fig. 2. The idea of a polymorphic system

2.1. Koncepcja rdzenia logicznego

Molekularna nanotechnologia niesie ze sobą znaczne zwiększenie funkcjonalności i wydajności przyszłych systemów. Wykorzystanie tych nowych własności jest możliwe przy zastosowaniu zupełnie nowych architektów, zarówno na poziomie struktury logicznej, jak i fizycznej. Przykładem są, wspomniane wcześniej, architektury systemów polimorficznych, zdolnych do rekonfiguracji i zmiany swoich własności.

System taki musiałby posiadać odpowiednią, stałą strukturę logiczną, niezależną od jego zmiennej struktury fizycznej, w oparciu np. o koncepcję **rdzenia logicznego** (*Logical Core Architecture*) [13]. Jako przykład można podać system zdolny do długotrwałego działania, samowystarczalny, którego najważniejszą cechą byłaby niezawodność. Niezawodność całego układu zależy od niezawodności poszczególnych elementów. Może być też wspomagana przez wzajemnie uzupełniające się, redundantne podsystemy, które mimo nieuniknionych awarii pozwolą utrzymać działanie systemu. Dzięki własnościom nanotechnologii system taki

będzie potrafił systematycznie zastępować stare elementy, których działanie jest już obciążone większym ryzykiem awarii. W razie konieczności będzie też potrafił, korzystając z zapisanych instrukcji, wytworzyć nowe elementy, niezbędne w danej sytuacji. Dokładnie cały układ składa się więc z elementów tworzonych, ponownie przetwarzanych i wymienianych „na pokładzie". Jedynym, niezmiennym elementem systemu jest jądro, rdzeń logiczny, które jednak nie stanowi żadnego fizycznego elementu. Architektura rdzenia logicznego stanowi strukturę logiczną definiującą powiązania pomiędzy fizycznymi elementami, organizującą system na czterech warstwach (rys. 3).



Rys. 3. Warstwy i podsystemy dla architektury rdzenia logicznego
Fig. 3. The Layers and Subsystems of the Logical Core Architecture

2.1.1. Rdzeń logiczny

Rdzeń logiczny stanowi jedyny niezmienny element. Nie posiada jednoznacznego odzwierciedlenia fizycznego. Składa się z oprogramowania działającego w danej chwili (na istniejących w warstwie fizycznych komputerach) oraz archiwum, przechowującego dane. Dane te zawierają zarówno programy zapisane przez twórców systemu (uruchamiane w odpowiednich momentach), jak i historię działania, kopie danych i wszelkie inne

informacje. Zakłada się, że należy przechowywać wszelkie możliwe dane związane z funkcjonowaniem systemu, choćby w wysokoskompresowanej formie.

2.1.2. Warstwa fizyczna

Warstwa fizyczna składa się z minimalnego zbioru podsystemów niezbędnych dla działania rdzenia logicznego: komputera dla uruchomienia oprogramowania, układów pamięci dla przechowywania danych archiwum, wewnętrznej infrastruktury zapewniającej takie funkcje, jak dostarczanie energii, odprowadzanie ciepła, zapewniającej wewnętrzną komunikację pomiędzy elementami, a także umożliwiającej manipulacje elementami fizycznej struktury. Układ wytwarzający pobiera potrzebne materiały i produkuje wymagane przez system komponenty (np. realizuje systematyczną wymianę działających komponentów). Wykorzystywane będą nanotechnologiczne asemblery, wytwarzające szeroki zakres komponentów, niezbędnych w systemie (przy realizacji zadania). Wytwarzane komponenty powinny się nadawać do łatwego, powtórnego przetworzenia. Dostarczaniem materiałów, a także ich przechowywaniem i powtórnym odzyskiwaniem zajmuje się również odpowiedni podsystem warstwy fizycznej.

2.1.3. Warstwa uzupełniająca

Dzięki znajdującemu się w warstwie fizycznej układowi wytwarzającemu możliwe jest zwiększenia funkcjonalności warstwy fizycznej powyżej niezbędnego dla działania rdzenia logicznego minimum. W pewnych przypadkach może się pojawić konieczność przetworzenia w krótkim czasie dodatkowych danych i chwilowego ich przechowania. Działanie systemu może zostać czasowo uzupełnione dodatkowymi komputerami i układami pamięci. To samo dotyczy wszystkich pozostałych elementów warstwy fizycznej (uzupełniające wytwarzanie komponentów, dostarczanie i przetwarzanie materiałów).

2.1.4. Warstwa zewnętrzna

Warstwa zewnętrzna zapewnia funkcjonalność systemu dla konkretnych zadań i zastosowań. Mogą to być np. silniki, baterie słoneczne, urządzenia pomiarowe, transmisyjne i wszelkie inne elementy bezpośrednio związane z realizacją zadania. W zależności od odpowiednich czynników i zgodnie z ideą systemu polimorficznego układ może zwiększyć moc przez dodanie kolejnych silników, rozbudować powierzchnię baterii słonecznych, uzupełnić układ łączności lub zredukować do minimum liczbę działających komponentów, przechodząc w stan uśpienia.

3. Budowa nanoukładów: możliwości i ograniczenia

Większość wielkości fizycznych oddziałujących na obiekty skali nano znacznie się różni od tych działających w skali makro. Podstawowym więc problemem, który należy brać pod uwagę przy projektowaniu nanosystemów, jest to, że nie można po prostu wykorzystać zminiaturyzowanych odpowiedników urządzeń ze świata makro. Pozornie wpływ wielkości fizycznych można oszacować przez zastosowanie praw skalowania, jednak w większości przypadków takie podejście jest niewystarczające. Konieczne jest bardziej dokładne podejście, z powodu ziarnistej struktury materii, oddziaływań cząsteczkowych, ruchów termicznych oraz efektów kwantowych. Najlepiej do skali nano pozwalają się skalować systemy mechaniczne, dość dobrze systemy cieplne (termiczne), znacznie gorzej zaś elektromechaniczne. Szerzej problemy skalowania omówione są w [9]. Mimo wspomnianych trudności, klasyczne makrosystemy wraz z bogatym doświadczeniem, zdobytym przy ich wykorzystywaniu, stanowią dobrą podstawę, na której może się opierać przyszła nanotechnologia. Przykładem może być, wspomniane wcześniej, wykorzystanie systemów mechanicznych, które pozwalają się bardzo dobrze skalować do poziomu nano. Mimo wielu trudności związanych z wykonaniem zaprojektowanych układów mechanicznych, technologia ta wciąż wydaje się obiecująca w przyszłej nanotechnologii.

Jako główne ograniczenie w skutecznym działaniu nanoukładów podawano problem szumu termicznego, kT, źródło ruchów Browna. Układy poddawane nieustannym wibracjom nie wydają się być właściwe dla pewnego przekazywania i przechowywania informacji. Jednak odpowiednie zaprojektowanie układów pozwala na zminimalizowanie tego problemu. W przypadku np. systemów mechanicznych można wprowadzić odpowiednią czułość elementów, aby reakcja następowała na przesunięcia prętów większe od szumów termicznych (analogicznie jak tolerancja dla drobnych odchyleń napięcia w przypadku elektronicznych układów cyfrowych). Przewidywania teoretyczne pozwalają zmniejszyć stopę błędów do poziomu nawet 10^{-64} [21], czyli praktycznie nieistotnego.

Wiele problemów wiąże się też z realizacją teoretycznych koncepcji, w szczególności z opisywanymi wcześniej asemblerami, zaczynając od podstawowego poziomu, jakim jest dostarczanie energii do nanoukładów. Pierwszych rozwiązań w tym zakresie dostarczyła biologia. Udało się przeprowadzić eksperymenty z silnikami w molekularnej skali, w oparciu o strukturę DNA, wykorzystując energię chemiczną, podobnie jak to ma miejsce w organizmach żywych [14]. Innym przykładem jest nieorganiczny silnik zbudowany z 78 atomów, wykorzystujący energię chemiczną [15], lub inny silnik wykonany w skali molekularnej, wykorzystujący energię świetlną [16]. Ciekawym rozwiązaniem jest wykorzystanie energii sygnałów akustycznych, mogących być jednocześnie źródłem

sygnałów sterujących. Taki sposób przekazywania energii, jednocześnie jako zgodny koncepcją nanoukładów mechanicznych opisywany jest m.in. w [17].

Trudnym do rozwiązania problemem jest przechowywanie informacji w poszczególnych nanoukładach. Możliwe wydaje się znów wykorzystanie rozwiązań biologicznych opartych na DNA. Wydaje się jednak, że projektowane układy będą miały ograniczoną do minimum pamięć, będąc elementem większej logicznej struktury, lub też nie będą miały jej wcale, pobudzane zewnętrznymi sygnałami sterującymi (*broadcast architecture*) [18].

Aby asemblery mogły wykonywać swoją pracę, najpierw muszą się znaleźć w odpowiednich miejscach budowanej struktury. Powstaje więc problem poruszania się w świecie atomów. Trudno odnieść do takiego środowiska jakiekolwiek analogie ze świata makro. Można na przykład, rozważając środowisko ciekłe, stosować podobne struktury, jakie wykorzystują bakterie, czyli struktury elastycznych spiral podobnych w działaniu do śmigła. Napęd taki (w przypadku bakterii *E. coli*) osiąga prędkość obrotową 6000 obrotów/min., a uzyskiwana moc to 10^{-19} KM, co w przypadku chemicznego mola takich napędów daje ogromną moc 60000 KM [20]. Oddziaływania cząsteczkowe mogą mieć jednak zbyt duży wpływ na kierunek ruchu takiego urządzenia, aby mogło się ono skutecznie poruszać. Na obecnym etapie podstawowym rozwiązaniem jest wykorzystanie dyfuzji, dzięki czemu obiekty same będą „dostarczane" we właściwe pozycje. Inne propozycje to wykorzystanie aktywnej matrycy sterującej (*excitable lattice controllers*), w której odpowiednio pobudzane brzegowo sensory (np. sygnałem świetlnym) pobudzają sensory tablicy, tworząc pewnego rodzaju ścieżkę dla znajdujących się wewnątrz matrycy urządzeń [19].

4. Podsumowanie

Obecnie nanotechnologia przestała być jedynie dziedziną teoretyczną i stała się dynamicznie rozwijającą się nauką. Lista dokonań, koncepcji oraz potencjalnych zastosowań nanotechnologii stale rośnie. Procesy nanotechnologiczne oznaczają radykalną zmianę podejścia do zasady technologicznego tworzenia, w którym zamiast dużych struktur wykonujących małe elementy będziemy mieli struktury w nanoskali tworzące elementy w makroskali.

Celem niniejszej pracy było omówienie istniejących w tym zakresie możliwości, pomysłów oraz trudności i wyzwań stojących przed naukowcami.

Z jednej strony prowadzone są intensywne prace doświadczalne związane z wytwarzaniem nanostruktur oraz pozycjonowaniem atomów, z drugiej opracowuje się teoretyczne koncepcje zastosowań, realizacji i organizacji złożonych nanoukładów. Praktyczne wykorzystanie teoretycznych doświadczeń jest tylko kwestią czasu. Mimo iż

rozwój nanotechnologii napotyka wiele trudności i ograniczeń, działające od milionów lat biologiczne nanosystemy pokazują, że możliwe jest ich przezwyciężenie.

Dużym wyzwaniem jest opracowanie technicznych systemów nanoinformatyki, niezbędnych w realizacji procesów nanotechnologicznych. Ze względu na swoją specyfikę trudno odnieść się do już istniejących, makroskopowych systemów informatycznych. Należy uwzględnić takie nowe własności, jak polimorfizm czy samoreplikacja. Podejmowane są pierwsze próby tworzenia nowych architektur logicznych, sposobów komunikacji, sterowania i wymiany danych. Jest to jednak pole do intensywnych badań dla specjalistów zajmujących się przetwarzaniem informacji.

LITERATURA

1. Feynman R. P.: There's Plenty of Room at the Bottom. Engineering and Science, California Institute of technology, 1960.
2. Węgrzyn S.: Techniczne, nano i kwantowe systemy informatyki. Automatyka 2000, t.4, z.2, Kraków 2000.
3. Węgrzyn S., Winiarczyk R: Nanosystems of Informatics Controlling the Molecular Nanotechnologies, Archiwum Informatyki Teoretycznej i Stosowanej, tom. 13 (2001), z.2, pp 205-216.
4. Drexler K. E.: Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation. John Wiley and Sons, Inc., New York 1992.
5. Drexler K. E.: Rod logic and thermal noise in the mechanical nanocomputer. in Proc. Third Int. Symp. on Molecular Electronic Devices, Elesevier/North-Holland, Amsterdam 1988.
6. Pecul M.: Nanorurki i nanotechnologia. www.mt.com.pl/num/6_98/nanorur.htm, 1998.
7. Ellenbogen J. C., Love J. C.: Architectures for molecular electronic computers: 1. Logic structures and an adder built from molecular electronic diodes" (MITRE Report) www.mitre.org/technology/nanotech/list_of_articles.html, 1999.
8. Goldhaber-Gordon D., Montemerlo M. S., Love J. C., Opiteck G. J.: Overview of Nanodevices. www.mitre.org/research/nanotech/downloads/Overview_of_Nanodevices.pdf, 1997.
9. Drexler K. E.: Nanosystems, Molecular machinery, manufacturing and computation. John Wiley & Sons, New York, 1992; http://www.zyvex.com/nanotech/nanosystems.html.
10. Babbage Ch.: On the Principles and Development of the Calulator. P. Morrison, E. Morrison, Dover Publications, 1961.
11. Drexler K. E.: Engines of Creation. Doubleday, 1986.
12. Merkle R. C.: Self Replicating Systems and Molecular Manufacturing. www.zyvex.com/nanotech/selfRepJBIS.html, 1992.

13. McKendree T.: The logical core architecture. Fifth Foresight Conference on Molecular Nanotechnology, 1998.
14. Yurke B., Turberfield A.J, Mills A.P.: A DNA-fuelled molecular machine made of DNA, Nature 406, 605 – 608, 2000.
15. Kelly T.R., De Silva H., Silva R.A.: Unidirectional rotary motion in a molecular system. Nature 401, 1999,150-152.
16. Koumura N., Zijlstra R.W., van Delden R.A., Harada N., Feringa B.L.: Light-driven monodirectional molecular rotor. Nature 401, 1999,152-155.
17. Merkle R. C.: Casing an assembler. Nanotechnology 10(1999):315-322; http://www.zyvex.com/nanotech/casing.
18. Merkle R. C.: Design-ahead for nanotechnology. Markus Krummenacker, James Lewis, eds., Prospects in Nanotechnology: Toward Molecular Manufacturing, John Wiley & Sons, New York 1995.
19. Adamatzky A., Melhuish C.: Towards the design of excitable lattice controllers for nanorobots. IASL, Faculcy of Engineering, University of the West England, 1998.
20. Regis E.: Nanotechnologia – narodziny nowej nauki, czyli świat cząsteczka po cząsteczce. Prószyński i S-ka, Warszawa 2001.
21. Drexler E.: Rod logic and thermal noise in the mechanical nanocomputer. Forrest L. Carter, Ronald E. Siatkowski i H. Wohltjen (red.): Molecular Electronic Devices, North-Holland, Amsterdam 1988.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Klamka

Wpłynęło do Redakcji 11 kwietnia 2002 r.

Abstract

Nanotechnology is not only theoretical domain. It is a rapidly developing science and in many countries is subsidized by significant financial resources.

To specify the technology which allowed us to create structures atom by atom scientists often use the term: molecular nanotechnology. Molecular nanotechnology is the name given to a specific sort of manufacturing technology. As its name implies, molecular nanotechnology will be achieved when we are able to build things from the atom up, and we will be able to rearrange matter with atomic precision, as well as molecular thermal movement . There are three objectives of nanotechnology. It should let us:

- Get essentially every atom in the right place;

- Make any structure consistent with the laws of physics and chemistry that we can specify in atomic detail;
- Have manufacturing costs not exceeding the cost of the required materials and energy.

The main idea for creating structures using nanotechnology is to develop an assembler. The assembler is defined as a general-purpose device for molecular manufacturing capable of guiding chemical reactions by positioning molecules. It includes a molecular computer and molecular constructor. Molecular computer have a selreplication software system and the constructor have a special manipulation device. The idea of creation process in a assembler controlled by external macrocontroler is presented (Fig. 1).

Another example is polymorphic architecture for nanosystem (see Fig. 2), as a system able to rapidly reconfigure into nearly any simple macroscopic object. The logical scheme for coordinating the polymorphic system is also presented (Logical Core Architecture, Fig. 3).

One of the primary field for development in nanotechnology is nanosystems of informatics, necessary for organizing, building, controlling and checking nanomechanisms and nanostructures and for realizing efficiently computational processes. It is important to take into consideration the specificity of nanosystems: selfrepliation, polymorphism, a large number of cooperating nanodevices, the location problem etc.

It is very probable that in nearly future our attitude to creation process will radically change: instead of having big structures creating small elements we will have small nanostructures creating elements in macroscale.