

# **NANOTECHNOLOGIA**

**STAN OBECNY I PERSPEKTYWY**

**B. Dręzewski, A. Herman, P. Wroczyński**

**Gdańsk, 1997**

**SPIS TREŚCI**

	<b>PRZEDMOWA</b>	<b>3</b>
1.	<b>WSTĘP</b>	<b>7</b>
2.	<b>NANOTECHNOLOGIA MATERIAŁÓW</b>	<b>11</b>
2.1.	<b>Zalety ultra drobnych proszków</b>	<b>11</b>
2.2.	<b>Zastosowanie</b>	<b>12</b>
2.3.	<b>Otrzymywanie ultra drobnych proszków</b>	<b>14</b>
2.3.1.	<b>Metody zol-żel</b>	<b>14</b>
2.3.2.	<b>Reakcje w ciele stałym</b>	<b>14</b>
2.3.3.	<b>Reakcje ciecż-ciało stałe</b>	<b>15</b>
2.3.4.	<b>Metody odparowania i kondensacji</b>	<b>15</b>
2.3.5.	<b>Metody z użyciem plazmy</b>	<b>15</b>
2.3.6.	<b>Hydroliza w płomieniu</b>	<b>16</b>
3.	<b>NANOTECHNOLOGIA W MECHANICE PRECYZYJNEJ I OBRÓBCE MATERIAŁÓW</b>	<b>17</b>
3.1.	<b>Wprowadzenie</b>	<b>17</b>
3.2.	<b>Bariery precyzji obróbki i dokładność pomiarów</b>	<b>17</b>
3.3.	<b>Techniki obróbki</b>	<b>21</b>
3.3.1.	<b>Obróbka za pomocą diamentu</b>	<b>21</b>
3.3.2.	<b>Szlifowanie</b>	<b>22</b>
3.3.3.	<b>Obróbka luźnym ścierniwem</b>	<b>23</b>
3.3.4.	<b>Jony, elektrony i promieniowanie X</b>	<b>24</b>
3.3.5.	<b>Otrzymywanie cienkich warstw</b>	<b>28</b>
4.	<b>PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA NANOTECHNOLOGII W TECHNICIE</b>	<b>32</b>
4.1.	<b>Mechanika</b>	<b>32</b>
4.2.	<b>Optyka</b>	<b>38</b>
4.3.	<b>Elektronika</b>	<b>39</b>
5.	<b>NANOTECHNOLOGIA W RÓŻNYCH KRAJACH</b>	<b>43</b>
5.1.	<b>Wielka Brytania</b>	<b>43</b>

5.2.	Niemcy	46
5.3.	Japonia	50
5.4	USA	53
5.5	Hong-Kong	60
6.	<b>PRZYSZŁOŚĆ NANOTECHNOLOGII</b>	61
6.1.	Elektronika molekularna	61
6.2.	Inżynieria skaningowa efektu tunelowego	69
6.3.	Chemia supramolekularna	76
6.4.	Realizacja sieci neuronowych	77
6.5	Kropki kwantowe	78
6.6	Nanotechnologia obliczeniowa	81
	<b>UZUPEŁNIENIA</b>	87
A.	K. Eric Drexler - Jak studiować nanotechnologię	88
B.	Informacje o nanotechnologii w sieci Internet	101
C.	Literatura dotycząca nanoproszków	102
D.	Literatura dotycząca nanowarstw	103
E.	Literatura dotycząca nanokompozytów	104
F.	Literatura dotycząca nanofaz	123
G.	Zawartość pierwszych roczników czasopisma Nanotechnology	140
H.	Wykaz ważniejszych terminów i skrótów	163

## PRZEDMOWA

Przesłaniem opracowania jest zapoznanie studentów uczelni technicznych z problematyką nanotechnologii. Przyjęto w nim definicję przedmiotu podaną w przeglądowym artykule A. Franksa zatytułowanym "Nanotechnology", który ukazał się w *Journal of Physics E.: Scientific Instruments*, **20** (1987) 1442-1451. Franks jako jeden z pierwszych autorów podaje definicję oraz określa pole działania nanotechnologii. Obecnie istnieją dwie odmienne strategie rozwoju tej dziedziny wiedzy. Podejście Franksa polega na próbie budowy nanosystemów poprzez coraz większą miniaturyzację i zwiększanie precyzji wytwarzania w oparciu o już istniejące technologie takie jak na przykład litografia wysokorozdzielcza. Przed wielu laty, tego typu podejście zostało zaproponowane przez R. P. Feynmana w artykule zatytułowanym "There's Plenty of Room at the Bottom" opublikowanym w czasopiśmie *Engineering and Science*, **23** (1960) 22-36.

Zupełnie inne podejście prezentują uczeni amerykańscy skupieni wokół K. Erica Drexlera. W swojej książce wydanej w 1992 roku, zatytułowanej "Nanosystems" (WILEY-INTERSCIENCE) definiuje on nanotechnologię jako technologię przyszłości, polegającą na kontroli struktury na poziomie molekularnym, kiedy produkty są wytwarzane poprzez precyzyjne manipulowanie cząsteczkami, zgodnie z wymaganiami projektowanego urządzenia.

Prezentowane opracowanie jest przeglądem dokonań w zakresie nanotechnologii, opartym o bieżącą literaturę przedmiotu i opracowanym na użytek studentów studiów politechnicznych. Właśnie do nich zwraca się K. Eric Drexler w dodatku poświęconym problemowi kształcenia przyszłych nanotechnologów. Praca ta podjęta została w nadziei, że badania naukowe w tej nowej, szybko rozwijającej się

dziedzinie technologii, zostaną wkrótce podjęte w Politechnice Gdańskiej.

Według Franksa termin nanotechnologia wiąże się z wytwarzaniem elementów o rozmiarach lub tolerancji wymiarów w przedziale 0.1 - 100 nm. Tak rozumiana nanotechnologia odgrywa kluczową rolę w wielu dziedzinach takich jak przetwórstwo materiałów, mechanika precyzyjna, optyka czy elektronika. Technologie manipulacji materiałami na poziomie zbliżonym do molekularnego lub molekularnym wchodzi ostatnio w coraz większym stopniu w fazę praktycznego stosowania.

Definicja Drexlera jest nieco inna. Odnosi się ona nie do istniejących obecnie, lecz oczekiwanych w najbliższej przyszłości technologii opartych o kontrolę struktury materii na poziomie molekularnym. Sądzi on, że wytwarzanie nanostruktur będzie możliwe na drodze poddawania materiałów precyzyjnemu pozycjonowaniu i przekształceniom zgodnie z założonym projektem.

Niezależnie od tego, jaką przyjmujemy ostatecznie definicję, nanotechnologia w rozumieniu Franksa stała się już faktem, a wizja Drexlera może się w każdej chwili urzeczywistnić. Materiał zebrany w prezentowanym przez nas przeglądzie powinien ułatwić czytelnikowi wyrobienie sobie własnego rozeznania, co do zasięgu tej dziedziny wiedzy.

Pomysł napisania tego przeglądu zrodził się pod wpływem dyskusji pomiędzy profesorami Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej Jackiem Namieśnikiem i Wiesławem Wojnowskim. Dyskusja dotyczyła kształcenia studentów Wydziału w dziedzinie ochrony Środowiska. Profesor Wojnowski zwracał w niej uwagę na rosnącą rolę tak zwanych technologii proekologicznych w ochronie Środowiska. Nanotechnologie posiadają niewątpliwie wszelkie cechy technologii proekologicznych.

Miło jest w tym miejscu również wyrazić wdzięczność za pomoc i zachętę otrzymaną z wielu stron. Czujemy się szczególnie wdzięczni

doktorowi Wernerowi Marxowi z Instytutu Maxa Plancka w Stuttgarcie, za wszechstronne poszukiwania literaturowe w komputerowych bazach danych oraz doktorowi K. Ericowi Drexlerowi z Instytutu Foresight w Palo Alto, za wyrażenie zgody na przetłumaczenie i wydrukowanie jego artykułu pod tytułem “Studying Nanotechnology”.

Szczególne wyrazy wdzięczności należą się naszym recenzentom, zarówno tym formalnym jak i nieformalnym.

Żaden z nich nie kwestionował celowości podjętego opracowania, chociaż wielu wyrażało się krytycznie o jego realizacji. Krytyka ta przyczyniła się w znacznym stopniu do poprawy jakości opracowania pod wieloma względami.

Pierwszym z recenzentów był Profesor Wiesław Wojnowski z Politechniki Gdańskiej, który w całości przeczytał manuskrypt podsuwając nam wiele cennych uwag merytorycznych i stylistycznych. Profesor Mieczysław Chybicki z Politechniki Gdańskiej jako recenzent wydawnictwa PG swoimi uwagami przyczynił się do poprawy strony dydaktycznej opracowania. Kolejnym recenzentem był Profesor Jacek Namieśnik z Politechniki Gdańskiej, dzięki któremu opracowanie wzbogaciło się o nowe odnośniki literaturowe dotyczące aspektów analitycznych w nanotechnologii. Opinia Profesora Mariana Kryszewskiego z Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN w Łodzi zmusiła nas do ponownego przyjrzenia się koncepcji tego opracowania. Ostatecznie zrezygnowaliśmy z propozycji jego rozszerzenia na całą obszerną dziedzinę wiedzy, nazywaną w literaturze Światowej “Nanometer Scale Science & Technology”. Takie zadanie wydaje się przekraczać znacznie nasze siły i kwalifikacje. Na taką decyzję wpłynęła także opinia Profesor Aleksandry Sokołowskiej z Politechniki Warszawskiej, której w tym miejscu dziękujemy za podtrzymanie nas na duchu. Liczne uwagi i sugestie Pani Profesor przyczyniły się znacznie do decyzji utrzymania opracowania w

dotychczasowej, choć znacznie zmienionej w stosunku do pierwowzoru formie. Wreszcie nadzwyczaj wnikliwa praca nad tekstem wykonana przez Profesora Jerzego Błazejowskiego z Uniwersytetu Gdańskiego doprowadziła manuskrypt do obecnego kształtu.

Oczywiście nie wszystkie sugestie recenzentów mogły być uwzględnione, tym niemniej wszystkie były bardzo poważnie brane pod uwagę.

Wszystkim wymienionym wyżej osobom serdecznie dziękujemy za poświęcony trud pamiętając, że bez ich udziału praca zawierałaby znacznie więcej potknięć i usterek.

Gdańsk 1997

## 1. WSTĘP

Czym jest nanotechnologia? Termin ten wszedł pod koniec lat siedemdziesiątych do powszechnie stosowanego słownictwa techniki, chociaż został użyty po raz pierwszy już w 1974 roku, przez Taniguchiego<sup>1,2,3</sup>. Poprzedziło go wprowadzenie terminu nanometrologia, związanego z rozwojem precyzyjnych przyrządów pomiarowych opartych na metodach optycznych wykorzystujących między innymi promieniowanie rentgenowskie.<sup>4</sup> Definicja Franksa powstała około 1982 roku w Brytyjskim Narodowym Laboratorium Fizycznym. Nanotechnologię definiuje się jako technologię, gdzie wymiary lub tolerancje wymiarów w zakresie 0.1 - 100 nm (od rozmiarów atomowych do porównywalnych z długością fali Światła widzialnego) odgrywają kluczową rolę.

Taka definicja jest jednak zbyt ogólna i niepraktyczna, ponieważ może obejmować tak różne dziedziny jak krystalografię rentgenowską, fizykę atomową czy całą chemię! Pole zainteresowania nanotechnologii ograniczono zatem do technologii manipulacji materiałami oraz obróbki elementów w zakresie rozmiarów i tolerancji podanym powyżej. Nie zalicza się jednak do nanotechnologii metod rzemieślniczych takich jak: tradycyjne szlifowanie szkła, ze względu na brak powtarzalności. W obrębie zainteresowań nanotechnologii znajduje się również technologia bardzo drobnych proszków, z wykluczeniem jednak materiałów

---

<sup>1</sup> Taniguchi N (1974) On the basic concept of nanotechnology, *Proc. Int. Conf. Prod. Eng. Tokyo Part 2* (Tokyo: JSPE) 18-23

<sup>2</sup> Taniguchi N (1978) Nanotechnology. Materials processing with an atomic or molecular size working unit, *Kinzoku Hyomen Gijutsu* **29** (5) 220-31

<sup>3</sup> Taniguchi N (1990) Construction and idea of nanotechnology, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering* **56** 427-31

<sup>4</sup> Taniguchi N (1988) Fundamentals and Applications of Nanotechnology. *Ultraprecision and Ultrafine Machining and Energy beam Processing*, (Kogyo Chosokai Publishing Co., Ltd.: Tokyo, Japan)



gruboziarnistych lub o niekontrolowanej wielkości ziarna. Także różne klasyczne metody analizy powierzchni, proszków oraz mikroskopia optyczna nie są zaliczane do obszaru zainteresowań nanotechnologii. Nie ma najmniejszej wątpliwości, że w najbliższych latach należy spodziewać się bliższego sprecyzowania obszaru zainteresowań nanotechnologii, ale nawet już teraz widać wyraźnie, jakie zagadnienia ona obejmuje.

Nanotechnologia jest technologią nowych możliwości, w takim sensie, że tworzy podstawy dla rozwoju innych technologii. Znajduje ona wiele interdyscyplinarnych zastosowań i jest z niewielkimi zmianami wykorzystywana w różnych dziedzinach. Dobrym przykładem tego jest technologia otrzymywania ultra cienkich warstw, podstawowa dla rozwoju elektroniki i optyki.

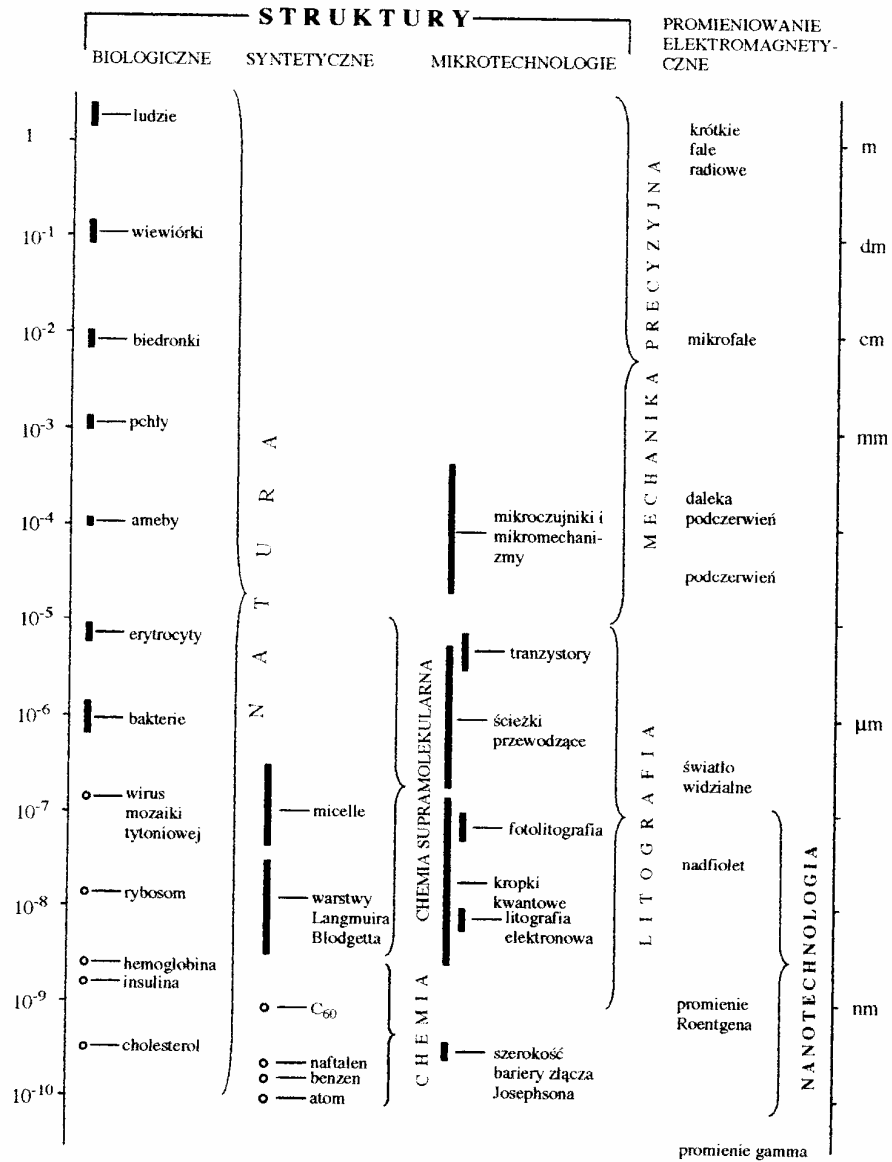
O znaczeniu nanotechnologii w Japonii można sądzić z faktu, iż jest ona jedną z sześciu technologii, które zostały uznane za kluczowe dla dalszego rozwoju i objęte patronatem w ramach projektu ERATO. Jest to program badań wyprzedzających. W jego ramach finansowane są nauki mogące mieć w nadchodzących latach szczególne znaczenie technologiczne oraz wymagające ścisłej współpracy pomiędzy przemysłem a japońskimi uniwersytetami i zagranicznymi instytucjami naukowymi. Również rząd Wielkiej Brytanii uznał nanotechnologię jako bardzo ważną dziedzinę rozwoju, udzielając jej poparcia w ramach programu LINK, który ma na celu wypełnienie luki pomiędzy czystą nauką, a nauką działającą na potrzeby rynku, poprzez popieranie wspólnych projektów pracowników uczelni i przemysłu.

Nanotechnologia wydaje się być szczególnie ważna i posiada bezpośredni związek z takimi dziedzinami jak nauka o materiałach, mikromechanika, optyka zintegrowana, elektronika czy sensoryka.

Obszar zastosowań nanotechnologii jest bardzo duży. W opracowaniu wybrano tylko niektóre z nich w celu zilustrowania

potencjalnych możliwości oraz interdyscyplinarnej roli tej technologii. Intencją autorów nie było szczegółowe wyliczenie urządzeń, których produkcję lub doskonałość zawdzięcza się nanotechnologii, a jedynie omówienie przykładów wytwarzania produktów przemysłu elektronicznego, mechanicznego, ceramicznego i optycznego takich jak: ceramiczne łopatkę turbin gazowych, półprzewodnikowe układy zintegrowane, czujniki ciśnienia hydrostatycznego i hydrodynamicznego, nowe generacje spalinowych silników ceramicznych czy też magnetyczne nośniki pamięci. Szerokie spektrum materiałów stosowanych w takich urządzeniach jak komputery, czy domowe zestawy audiowizualne wymaga użycia metod nanotechnologii. Przykładem tego może być produkcja głowic odczytu dysków magnetycznych, głowic obrotowych magnetowidów, dysków optycznych czy dysz drukarek atramentowych. W dziedzinie produkcji optycznej i półprzewodnikowej wymienić można ponadto zwierciadła żyroskopów laserowych, siatki dyfrakcyjne, elementy optyki rentgenowskiej czy elektroniki kwantowej ("quantum-well devices", GaAs FET i SQUID). Pewne urządzenia z wymienionych wyżej będą omówione w dalszej części opracowania.

Dla zorientowania czytelnika, co do skali "świata nanotechnologii" przeprowadzono na rys.1. porównanie rozmiarów struktur występujących w naturze, struktur syntetycznych i produktów mikrotechnologii. Skala rysunku jest logarytmiczna; dla porównania podano długości fali promieniowania elektromagnetycznego. Struktury biologiczne oraz wytwarzane za pomocą różnych technologii mieszczą się w zakresie od 1 nm do  $10^9$  nm (1 m). Obiekty otrzymywane na drodze syntezy chemicznej mają wymiary w zakresie 0,1 do 2 nm. Rozwój chemii supramolekularnej może umożliwić w najbliższym czasie syntezę struktur o rozmiarach od 10 do  $10^3$  nm.



Rys. 1. Porównanie rozmiarów struktur występujących w naturze, struktur syntetycznych oraz struktur wytwarzanych za pomocą mikrotechnologii

## **2. NANOTECHNOLOGIA MATERIAŁÓW**

Część ta poświęcona jest głównie technologii proszków. Szeroki obszar działania nanotechnologii uwiadcza się szczególnie w dziedzinie nowych materiałów, przy czym materiał musi być otrzymany lub wprowadzony w konkretne miejsce urządzenia z ogromną precyzją, w trakcie procesu wytwarzania. Przykładowo, w elektronice wprowadzane precyzyjnie domieszki określają granice nanometrowych struktur półprzewodnikowych, spełniających ważną rolę w konstrukcji układów scalonych. Inny przykład pochodzi z dziedziny technologii połączeń klejonych. Wiadomo na przykład, że im cieńsza jest wytworzona warstwa adhezyjna, tym silniejsze jest realizowane za jej pomocą połączenie.

### **2.1. Zalety ultradrobnych proszków**

Jak wiadomo właściwości mechaniczne, termiczne, elektryczne i magnetyczne ceramiek, spieków metali oraz kompozytów znacząco polepszają się wraz ze zmniejszeniem rozmiarów cząstek lub włókien, użytych do ich wytwarzania. Parametry materiałów, takie jak wytrzymałość, ciągliwość, kruchość, przepuszczalność światła, czy przenikalność dielektryczna mogą być modyfikowane poprzez ingerencję w mikrostrukturę materiału, na drodze zmiany rozmiarów cząstek lub poprzez dodatek ultradrobnych proszków.

Stosując procesy wytwarzania opisane w rozdziale **2.3**, można otrzymać czyste, homogeniczne proszki, które zachowują się w procesie produkcji w sposób bardziej kontrolowany i przewidywalny niż otrzymywane w klasyczny sposób, metodami mielenia i późniejszej segregacji cząstek o różnych wymiarach. Ważną zaletą bardzo drobnych proszków jest to, że w przypadku produkcji ceramiek i spieków metali

ich spoiłość może być znacznie zwiększona. W konsekwencji, zarówno defekty w produkcie finalnym jak i skurcz przy chłodzeniu są ograniczane, co zmniejsza zakres dalszej obróbki.

Lokalizacja kwantowa jest między innymi przyczyną różnego zabarwienia krystalicznych ziaren selenku kadmu, o rozmiarach kilku nanometrów (ziarna te zostały otrzymane przez Steigerwalda z AT&T Bell Laboratories). Elektryony znajdujące się w ziarnach półprzewodnika rozpraszają fotony, których energia jest mniejsza od pewnej minimalnej energii określonej przez rozmiary ziarna. Z kolei fotony, których energia jest większa od minimalnej, są absorbowane. Ziarna krystaliczne o największych rozmiarach mogą absorbować fotony niskoenergetyczne i w związku z tym mają barwę czerwoną. Ziarna o najmniejszej średnicy absorbują fotony wysokoenergetyczne i z tego powodu mają barwę żółtą.

## **2.2 Zastosowanie**

Ultradrobne proszki znajdują zastosowania w:

- (i) produkcji cienkich warstw i pokryć z materiałów spiekanych - im mniejsze są rozmiary cząstek materiału użytego jako substrat, tym cieńszą warstwę pokrycia można uzyskać,
- (ii) chromatografii - wzrost powierzchni właściwej, związany ze spadkiem rozmiarów cząstek wypełnienia, pozwala na redukcję wymiarów kolumny oraz na uzyskanie większej sprawności procesu rozdzielania mieszanin,
- (iii) ceramice elektronicznej - zmniejszenie rozmiarów ziarna daje w rezultacie polepszenie właściwości dielektrycznych i optycznych,
- (iv) produkcji spiekanych wypełnień uszczelniających - skuteczność uszczelnienia rośnie wraz ze zmniejszaniem się rozmiarów ziaren,

(v) produkcji narzędzi skrawających - zmniejszenie rozmiarów ziaren krystalitów daje w rezultacie precyzyjniejsze ostrza, te zaś pozwalają na lepszą obróbkę powierzchni skrawanych,

(vi) wytwarzania stali wysokotemperaturowych - drobniejsza mikrostruktura pozwala osiągnąć wyższą twardość i wyższą wytrzymałość,

(vii) produkcji cementów - im drobniejsze ziarno tym większa homogeniczność i gęstość betonu,

(viii) produkcji czujników gazów - im drobniejsze rozmiary ziarna tym większa selektywność czujnika,

(ix) wytwarzaniu powłok adhezyjnych - im drobniejsze rozmiary ziarna tym cieńsza powłoka może być zastosowana i silniej jest związana z podłożem,

(x) elektroforezie kapilarnej<sup>5,6</sup> - rozwój tej techniki separacji jest zależny w dużym stopniu od technologii warstw kapilarnych,

(xi) wytwarzaniu materiałów nanofazowych<sup>7</sup> - zmiana właściwości materiału wynika bezpośrednio z małych rozmiarów ziarna, gdzie duża procentowa zawartość niewysyconych atomów na powierzchni ziaren jest odpowiedzialna za oddziaływania międzyziarnowe. Ponieważ właściwości ziarna mogą być do pewnego stopnia modyfikowane w trakcie ich syntezy i późniejszej obróbki, materiały nanofazowe otrzymywane w oparciu o klaster atomów lub cząsteczek mogą mieć potencjalnie wiele zastosowań technologicznych.

---

<sup>5</sup> Guzman N A i współpracownicy (1989) Analysis of brain constituents by capillary electrophoresis *Curr. Res. Protein Chem.: Tech., Struct., Funct.*, [Pap. Annu. Symp. Protein Soc.] **3** 203-16. Edited by: Villafranca JJ Academic San Diego, California

<sup>6</sup> Guzman N A i współpracownicy (1990) High-resolution nanotechnique for separation, characterization, and quantitation of micro- and macromolecules. *Capillary electrophoresis ACS Symp. Ser.* (Anal. Biotechnol.: Capillary Electrophor. Chromatogr.) **434** 1-35

<sup>7</sup> Siegel R W (1994) Nanophase materials: synthesis, structure and properties *Physics of New Materials* Edited by: Fujita F E Springer-Verlag

## 2.3. Otrzymywanie ultradrobnych proszków

### 2.3.1. Metody zol-żel

Technika ta jest stosowana do produkcji nieorganicznych tlenków z użyciem prekursorów, którymi są alkoholany metali lub roztwory koloidalne uwodnionych tlenków.<sup>8</sup> Wyjściowy materiał jest przetwarzany w formę zolu w środowisku wodnym lub rozcieńczonego roztworu wodnego kwasu (zol jest zawiesiną cząstek ciała stałego o rozmiarach od 1 nm do 1µm, w cieczy). Usuwanie cieczy z zolu przeprowadza go w żel, przy czym przejście zol-żel służy do kontroli kształtu i rozmiarów cząsteczek. Kalcynacja żelu daje odpowiedni tlenek. Typowe rozmiary cząstek ThO<sub>2</sub> i ThO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> otrzymywane tą metodą wynoszą 8 µm. Przykładowo, z tetraizopropoksytytanu wyprodukowano proszki TiO<sub>2</sub> o rozmiarach w zakresie 70 - 300 nm.<sup>9</sup>

### 2.3.2. Reakcje w ciele stałym

W tym wypadku, tlenki metali są otrzymywane metodą koagulacji odpowiednich soli. Przykładową reakcją jest rozkład siedmiowodnego siarczanu żelaza(II) (FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) do tlenku żelaza(III) (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). W procesie tym powstają zwykle kuliste cząstki o rozmiarach około 0.25 µm.

---

<sup>8</sup> Woodhead J L i Segal D L (1984) Sol-gel processing, *Chemistry in Britain* **20** 310-3

<sup>9</sup> Barringer E A i Bowen H K (1982) Formation, packing and sintering of monodispersed TiO<sub>2</sub> powders, *J. Am. Ceram. Soc.* **65** 199C-201C

### 2.3.3. Reakcje ciecz - ciało stałe

Ultradrobne proszki mogą być wytwarzane również w fazie ciekłej, przy czym proces ich otrzymywania zależy od obecności pożądaných zarodków.

Brus wraz ze współpracownikami z Bell Labs opracowali metodę otrzymywania koloidalnych zawiesin ziaren półprzewodników krystalicznych. Zawiesina taka powstaje w wyniku wytrącenia ziaren z roztworu zawierającego jony pierwiastków składowych. Ziarna rosną dzięki przyłączaniu pojedynczych jonów, aż do momentu wyczerpania lub usunięcia ich źródła. Przerywając wzrost cząstek w określonym momencie badacze otrzymywali ziarna odpowiedniego rozmiaru, między 1,5 a 50 nm. Rozrzut wielkości ziaren jednego typu nie przekraczał 15%.

### 2.3.4. Metody odparowania i kondensacji

Ultradrobne proszki można również otrzymywać poprzez odparowanie i kondensację par substancji na zimnym podłożu. Przykładowo, proszki tlenków o rozmiarach cząstek mniejszych niż 20 nm otrzymano tą metodą w wyniku odparowania tlenku pod działaniem zogniskowanej wiązki elektronów o odpowiedniej energii.<sup>10</sup>

### 2.3.5. Metody z użyciem plazmy

Proszki o wymiarach cząstek w zakresie 10-60 nm mogą być

---

<sup>10</sup> Ramsey J D G i Avery R G (1974) Ultrafine oxide powders prepared by electron beam evaporation, *J. Mater. Sci.* 1681-8



produkowane<sup>11</sup> przez odparowanie mikrometrowych cząstek w strumieniu plazmy argonowej w czasie od 0.01 s do 0.001 s. Ta technika była stosowana do otrzymywania klasterów takich metali jak Al, Mo, W, Zr i Ag, jak również proszków tlenków takich jak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Techniki plazmowe pozwalają również na otrzymywanie cienkich filmów azotku węgla.<sup>12</sup> Szczegółowe badania wykazują, że otrzymany tą drogą materiał jest mieszaniną amorficznej fazy policycjanoiminy i nanokryształów fazy diamentu. Warstwy te posiadają ciekawe właściwości elektryczne i optyczne.

### 2.3.6. Hydroliza w płomieniu

Hydroliza w płomieniu znalazła zastosowanie przy produkcji krzemionki aerozolowej. W tej technologii czterochlorek krzemu jest ogrzewany w płomieniu tlenowo-wodorowym dając wysoko rozdrobnioną krzemionkę.<sup>13</sup> Powstały biały amorficzny proszek składa się z cząstek o rozmiarach 7 - 40 nm.

- 
- <sup>11</sup> Fedorow V B i współpracownicy (1981) Production and some structural characteristics of ultrafine systems, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.* **20** 601-4
- <sup>12</sup> Szmidt J i współpracownicy 1996 Nanocrystalline C=N thin films, *Diamond and Related Materials* **5** 564-9
- <sup>13</sup> Kleinschmit P (1980) Silicas and related materials, *Specjality Inorganic Materials* ed. R. Thompson Special Publ. (London: Roy. Soc. Chem.) **40** 196-225

### **3. NANOTECHNOLOGIA W MECHANICE PRECYZYJNEJ I OBRÓBCE MATERIAŁÓW**

#### **3.1. Wprowadzenie**

Metody obróbki stosowane w mechanice precyzyjnej, optyce i elektronice wykazują wiele cech wspólnych. Precyzyjna obróbka w tych dziedzinach wykracza poza mechaniczne skrawanie, szlifowanie, trawienie i polerowanie z nanometrową precyzją. Są tu również stosowane strumienie takich cząstek jak jony, elektrony czy też fotony promieniowania X. Wiązki jonowe umożliwiają obróbkę dowolnego materiału, a wiązki elektronowe czy promieniowanie X jest często stosowaną metodą obróbki lub modyfikacji warstw polimerowych w technikach litograficznych. Oddziaływanie wiązki z materiałem maski indukuje w niej zmiany strukturalne, w wyniku czego rozpuszczalność polimeru w miejscach naświetlonych maleje.

Stan ultraprecyzyjnej mechaniki oraz mikroprzetwórstwa materiałów został szczegółowo przedstawiony w artykule przeglądowym napisanym przez Taniguchi'ego<sup>14</sup>. Autor ten, na podstawie analizy szerokiego zakresu produktów wytwarzanych przy udziale zaawansowanych technologii, przedstawił również kierunki rozwoju mechaniki ultraprecyzyjnej.

#### **3.2. Bariery precyzji obróbki i dokładność pomiarów**

Dane literaturowe odnoszące się do precyzyjnej obróbki i oceny gładkości powierzchni muszą być traktowane bardzo ostrożnie. Coraz

---

<sup>14</sup> Taniguchi N (1983) Current status in, and future trends, of ultraprecision machining and ultrafine materials processing *Ann. CIRP* 32 1-10

częściej można bowiem spotkać w literaturze stwierdzenie, że gładkość powierzchni została zmierzona jako, przykładowo 0.3 nm (Średni stosunek wierzchołków do dolin-RMS) lub jeszcze o rząd wielkości niżej. Ponieważ 0.3 nm jest wielkością rzędu rozmiarów atomów, można się zastanawiać, co taki parametr oznacza. Przede wszystkim jest on odbiciem zastosowanej metody pomiaru. Metody te generalnie można podzielić na dwie grupy: lokalne i nielokalne. Metody lokalne charakteryzuje wprawdzie lepsza niż 0.1 nm czułość na amplitudę powierzchni, lecz ich rozdzielczość pozioma (zdolność do pomiaru sfalowania powierzchni) jest niejednokrotnie 1000 razy niższa. Metody nielokalne, takie jak interferometria optyczna, posiadają rozdzielczość limitowaną przez długość fali Światła, użytą do pomiaru. W najlepszym przypadku daje to rozdzielczość rzędu 500 nm. Rozdzielczość 50 nm jest najlepszym wynikiem, jaki podaje literatura.<sup>15</sup> Z jednym lub dwoma wyjątkami zatem, większość danych podawanych w literaturze z dokładnością poniżej nanometra, odnosi się do bliżej nie zdefiniowanej wartości średniej zmierzonej lokalnie. Przykłady technik pomiarowych, w których lokalnie i nielokalnie osiąga się rozdzielczość poniżej 1 nm są rzadko spotykane.<sup>16,17</sup> Koncepcja amplitudy i długości fal powierzchni<sup>18</sup> posiada fundamentalne znaczenie dla interpretacji pomiarów topograficznych w nano skali.

Pewne podejścia do problemu budowy mechanizmów przesuwu w linii prostej na poziomie nanometrowym, w instrumentach pomiarowych, zostały ostatnio porównane i przedyskutowane przez

---

<sup>15</sup> Franks A (1984) X-ray optics - a challenge to precision engineering *Proc. Int. Symp. for Quality Control ing Production* (Tokyo: Japanese Soc. Prec. Eng.) 8-17

<sup>16</sup> Butler D W (1973) A stereo electron microscope technique for microtopographic measurements, *Micron* 4 410-24

<sup>17</sup> Dragoset R A i współpracownicy (1986) Scanning tunneling microscopy applied to optical surfaces, *Opt. Lett.* 11 560-2

<sup>18</sup> Stedman (1988) Mapping the performance of surface-measuring instruments *Proc. SPIE* 1009 62-7

Chetwynda.<sup>19</sup> Szczególnie przebadane zostały potencjalne zalety mechanizmów, których zasada pracy jest oparta na wykorzystaniu zjawiska odkształcenia przetworników piezoelektrycznych.

Problem kalibracji przyrządów dla zastosowań nanotechnologicznych był dyskutowany przez Bowena<sup>20</sup>. Szczególną uwagę zwrócił on na konieczność ustanowienia standardów bazowanych na łatwo odtwarzalnych naturalnych wzorcach, takich jak odległości międzypłaszczyznowe w kryształach. Przedyskutował on udane próby zastosowania interferometrii w zakresie promieniowania X, z użyciem kryształów krzemu, do pomiaru pikometrych przesunięć, oraz rozważył dalsze możliwości zastosowania tej techniki do kalibracji nanotechnologicznych przyrządów pomiarowych.

Whitehouse<sup>21</sup> analizował znane przyrządy pomiarowe pod względem wymagań stawianych przez nanotechnologię. Stwierdził on, że chociaż istniejące przyrządy mają rozdzielczość i rozmiary sondy w skali atomowej, większość z nich nie jest jednak przystosowana do nielokalnych pomiarów w takiej skali. Znaczne różnice pomiędzy skalą i rozmiarami badanych obiektów, a skalą ludzką (w przybliżeniu 10 rzędów wielkości) stwarzają liczne problemy pomiarowe. W pracy Whitehouse wysuwane są argumenty na rzecz budowy nowych przyrządów, składających się w znacznej części z podzespołów w nano skali, co zapewniłoby dostosowanie metod pomiarowych do cech mierzonych, zwiększenie szybkości i powtarzalności pomiarów oraz uchwycenie efektów w mikroskali.

---

<sup>19</sup> Chetwynd D G (1991) Linear translation mechanisms for nanotechnology applications *Measurement and Control* **24** 52-5

<sup>20</sup> Bowen D K (1991) Instrument calibration for nanotechnology *Measurement and Control* **24** 47-51

<sup>21</sup> Whitehouse D J (1991) Nanotechnology instrumentation *Measurement and Control* **24** 37-46

Smith<sup>22</sup> dyskutuje zastosowania systemów pozycjonujących w obrabiarkach numerycznych. Jest to główne zastosowanie takich systemów. Stałe poszukiwanie metod, pozwalających zwiększyć dokładność wytwarzania części maszyn i mechanizmów skłania wytwórców do stosowania nanotechnologii, a więc przejścia ku rozdzielczościom poniżej tysięcznych części mikrometra.

Clayton Teague<sup>23</sup> zaangażował się w projekt wysokiego ryzyka, którego celem jest budowa ultrawysokoprecyzyjnej maszyny pomiarowej, zdolnej do mierzenia pozycji w płaszczyźnie, z dokładnością atomową, na obszarze 25 cm<sup>2</sup>. Celem programu jest uzyskanie przestrzennej rozdzielczości pomiędzy dwoma punktami rzędu 0.1 nm, w ramach objętości mierzonej 50 mm x 50 mm x 100 μm, z nieoznaczonością netto 1 nm. Projekt ten, który jest nazywany Molecular Measuring Machine (M3) rozpoczął się w połowie 1987 roku i ma sprostać bieżącym i oczekiwanym wymaganiom metrologii w przemyśle elektronicznym i optycznym. Przyrząd M3 będzie mógł również służyć jako narzędzie badawcze w innych gwałtownie rozwijających się działach nanotechnologii, a mianowicie budowy struktur mechanicznych i elektrycznych w skali nanometrowej.

Różne rodzaje aktywności w dziedzinie precyzyjnej obróbki materiałów i nanotechnologii zostały przedyskutowane również przez Athertona<sup>24</sup>. Nanopozycjonowanie (pozycjonowanie w skali nanometrów lub jeszcze dokładniejsze) ma istotne znaczenie dla technologii mikromechanicznej, systemów optycznych oraz VLSI. Jest ono również niezmiernie ważne w technologiach mechaniki ultraprecyzyjnej. Autor przeanalizował kilka z szeroko stosowanych

---

<sup>22</sup> Smith M (1990) Encoders for high resolution *Design Engineering* Nov. 77-82

<sup>23</sup> Clayton Teague E (1990) The National Institute of Standards and Technology Molecular Measuring Machine Project: metrology and precision engineering design *Journal of Vacuum Science & Technology A* **8** 3876-7

<sup>24</sup> Atherton P (1988) Nano-positioning and control *Electro-Optics* **18** 15

technik wytwarzania czujników położenia oraz ich przyszłe możliwości rozwoju.

### 3.3. Techniki obróbki

#### 3.3.1. Obróbka za pomocą diamentu

Wielka obrabiarka tego typu dla potrzeb optyki (LODTM) w Lawrence Livermore National Laboratory reprezentuje szczytowe osiągnięcie na polu ultraprecyzyjnych narzędzi mechaniki.<sup>25,26</sup> Jest to maszyna z tarczą o Średnicy 1.6 m zamocowaną na pionowym wrzecionie, pozwalająca na obróbkę przedmiotów o rozmiarach do 0.5 m. Pomimo tak dużych wymiarów obiektów możliwe jest wytwarzanie powierzchni o sfalowaniu poniżej 27.5 nm RMS i gładkości około 3 nm. Precyzja obróbki zależy jednak od obrabianego materiału oraz zastosowanego noża.

W przeglądzie poświęconym ultraprecyzyjnej technice obróbki w Japonii, Kobayashi<sup>27</sup> dyskutuje najważniejsze części składowe maszyn, a mianowicie wrzeciono i suport - pokazując, że nie ma jeszcze ogólnie uznanego sposobu optymalnego konstruowania tychże. Wszystkie opisywane urządzenia posiadają poziome wrzeciono, co jest wadą, w przypadku, gdy cylindryczny przedmiot poddawany obróbce ulega odkształceniom w polu grawitacyjnym. Maszyny z pionowym wrzecionem mogłyby być lepszym rozwiązaniem. Z tego powodu rozważa się również rozwiązania teleskopowe kontrolowane za pomocą

---

<sup>25</sup> Donaldson R R , Patterson S R (1983) Design and construction of a large vertical axis diamond turning machine *Proc. SPIE* **433** 62-7

<sup>26</sup> McCue H K (1983) The motion control system for the large optics diamond turning machine (LODTM) *Proc. SPIE* **433** 68-75

<sup>27</sup> Kobayashi A (1983) Recent development of ultraprecision diamond cutting machines in Japan *Bull. Japanese Soc. Prec. Eng.* **17** 73-80

promieniowania X i sterowane numerycznie.<sup>28</sup>

### 3.3.2. Szlifowanie

W tej technice stosuje się tarcze z zamocowanym ścierniwem takim jak diament, regularna odmiana azotku boru lub węgiel krzemu. Ścierniwo jest unieruchomione w warstwie żywicy lub metalu. Siły generowane w trakcie szlifowania są większe niż w przypadku obróbki nożem diamentowym i z tego powodu szlifowanie nie może być przeprowadzone w tym samym urządzeniu co skrawanie. Pewne rozwiązania japońskie są awangardowe w dziedzinie precyzyjnego szlifierstwa i pozwalają na uzyskiwanie gładkości powierzchni rzędu 2 nm (wierzchołek względem doliny), w materiale takim jak monokryształ kwarcu.<sup>29</sup> Pomiary jakości uzyskiwanych powierzchni były wykonywane w National Physical Laboratory (UK) za pomocą urządzenia zabezpieczonego przed wpływem otoczenia, o rozdzielczości nielokalnej około 50 nm.<sup>30</sup>

Wszechstronna maszyna szlifierska do obróbki szklanych i ceramicznych zwierciadeł dla promieniowania X została opisana przez Lindseya i współpracowników.<sup>31</sup> Powierzchnie otrzymywane za pomocą tego urządzenia są nie mniej precyzyjne niż 10 nm (wierzchołek - dolina).

---

<sup>28</sup> Wills-Moren W J i współpracownicy (1982) Some aspects of the design and development of a large high precision CNC diamond turning machine *Ann. CIRP* **31** 409-14

<sup>29</sup> Yoshioka H i współpracownicy (1985) Ultraprecision grinding technology of brittle materials: applications to surface and centerless grinding processes *Proc. Milton C Shaw Grinding Symp., Florida Nov. 17-22* (New York: ASME) 209-27

<sup>30</sup> Lindsey K (1986) The assessment of ultra smooth substrates and overcoatings *Vacuum* **25** 499-500

<sup>31</sup> Lindsey K i współpracownicy (1982) A machine for figuring long x-ray optical elements *Proc. RAL Symp. New Tech. in X-ray and UV Opt.* ed. B J Kent i B E Patchett (SERC-RAL Publication RL-83-010) 77-83

### 3.3.3. Obróbka luźnym ścierniwem

W ramach tej technologii mieści się szlifowanie i polerowanie. Obrabiany twardy materiał, taki jak szkło jest pocierany materiałem mniej twardym, a między powierzchniami obrabiającą i obrabianą znajduje się ścierniwo. Stosowane w tej technice metody, używane materiały i teoria procesu polerowania zostały opisane przez Franksa.<sup>32</sup> W wielu przypadkach proces polerowania zachodzi w wyniku łącznego oddziaływania mechanicznego i chemicznego pomiędzy obrabianym przedmiotem, pastą szlifierską i powierzchnią polerującą. W przypadku polerowania miękkich materiałów, szczególnie gdy uszkodzenia powierzchni z powodu przetarcia muszą być minimalne (na przykład szlifowanie półprzewodników z GaAs lub InP), stosowane są zwykle metody chemiczno-mechaniczne. Mechaniczne polerowanie jest wymagane przy otrzymywaniu płaskich powierzchni, podczas gdy osiągnięcie powierzchni pozbawionych mechanicznych uszkodzeń wymaga trawienia chemicznego. Jednoczesne spełnienie powyższych wymagań jest osiągnięte przez konwencjonalne polerowanie z użyciem chemicznie aktywnej pasty polerskiej.<sup>33</sup> Autorzy cytowanej pracy poszli o krok dalej w kierunku ograniczenia uszkodzeń polerowanej powierzchni, stosując cienką warstwę rzadkiej zawiesiny polerskiej, podawanej hydrodynamicznie w miejscu poddawanych obróbce. Stosując podobne metody polerowania uzyskano powierzchnie o gładkości lepszej niż 0.1 nm RMS.<sup>34</sup>

Za pomocą past polerskich można, w specjalnych warunkach,

---

<sup>32</sup> Franks A (1975) Materials problems in the production of high quality optical surfaces *Mater. Sci. Eng.* **19** 169-83

<sup>33</sup> Gormley J V i współpracownicy (1981) Hydroplane polishing of semiconductor crystals *Rev. Sci. Instrum.* **52** 1256-9

<sup>34</sup> Bennett J M i współpracownicy (1987) Float polishing of optical materials *Appl. Opt.* **26** 696-703



osiągnąć niezrównane precyzje zarówno w kształcie jak i wykończeniu obrabianej powierzchni, jeśli jest ona płaska lub kulista. W tych przypadkach można zastosować technikę przesunięć statystycznych tarczy polerującej. Technika ta jest kluczowa w produkcji jednolitych powierzchni. Można tą drogą osiągnąć stopień dokładności rzędu kilku nm i gładkość lepszą niż 0.5 nm.<sup>35</sup> W przypadku, gdy w pełni statystyczne zmiany położenia tarczy są niemożliwe, przykładowo przy produkcji powierzchni asferycznych, stosuje się rozwiązania kompromisowe, polegające na odpowiedniej kombinacji zmian statystycznych i systematycznych. Problemy związane z generowaniem powierzchni o skomplikowanym kształcie są ważnym czynnikiem stymulującym rozwój superprecyzyjnych programowanych szlifierek numerycznych. Maszyny tego typu zostały opracowane przez Tsuwę i współpracowników (1979).<sup>36</sup> W tym rozwiązaniu ścierniwo zawieszono w płynie jest lokalnie kierowane na obrabianą powierzchnię przez nie będącą z nią w kontakcie poliuretanową kulę, obracaną z wielką prędkością. Kula ta zastępuje klasyczną tarczę polerską. Technika ta otrzymała nazwę "elastycznej emisji" środka polerskiego i została użyta z dobrym skutkiem w produkcji zwierciadeł dla promieniowania X, wykonanych z dokładnością 10 nm i gładkością 0.5 nm RMS.<sup>37</sup>

### 3.3.4. Jony, elektrony i promieniowanie X

Usilne dążenie do obniżenia wymiarów elementów obwodów scalonych stymulowało opracowanie technologii obróbki na poziomie

---

<sup>35</sup> Lindsey K (1984) The attainable limits in x-ray mirror fabrication *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **221** 14-9

<sup>36</sup> Tsuwa H i współpracownicy (1979) Numerically controlled elastic emission machining *Ann. CIRP* **28** 193-7

<sup>37</sup> Hongo T i współpracownicy (1984) Development of high accuracy profile measuring system for focusing mirror of SOR *Proc. Symp. Quality Control in Production* str (Tokyo: Japanese Soc. Prec. Eng.) 152-7

rozdzielczości "atomowej". Pojawiło się wiele takich technik. Ponad 20 lat temu wiązki jonowe zostały użyte do wytwarzania asferycznych powierzchni optycznych metodą epitaksjalną.<sup>38</sup> Trawienie wiązką jonową jest stosowane od wielu lat do produkcji siatek dyfrakcyjnych<sup>39</sup> dla promieniowania X oraz wzorców dla elektronowej spektroskopii transmisyjnej.<sup>40</sup> W przeglądzie poświęconym obróbce za pomocą wiązek jonowych i promieniowania Taniguchi<sup>41</sup> odsyła do przykładów wytwarzania przyrządów mierniczych, noży diamentowych i mikrotomów. Ostrza oraz ostre krawędzie, mogą być wprost uzyskane z dokładnością do kilku nanometrów, przez skierowanie wiązki jonowej pod kątem 45° do wstępnie naostrzonego mechanicznie obiektu.<sup>42</sup> Jednakże natrafiono na znaczne trudności podczas prób otrzymania gładkich powierzchni za pomocą wiązki jonowej, ponieważ erozja powierzchni w tych warunkach nie zachodzi niestety w sposób jednorodny, nawet w przypadku homogenicznych materiałów.<sup>43</sup>

Istnieje pewna analogia pomiędzy obróbką za pomocą wiązki jonowej i ścierniwem zawieszonym w cieczy. Jednak precyzja obróbki wiązką jonową jest nieporównywalnie większa. W związku z tym rozwinęły się technologie polegające na użyciu zogniskowanych wiązek jonowych do obróbki materiałów bez użycia masek. W kierunku równoległym do obrabianej powierzchni można tą drogą uzyskać

- 
- <sup>38</sup> Narodny L H i współpracownicy (1967) Paraboloid figured by ion bombardment *Appl. Opt.* **6** 2010
- <sup>39</sup> Franks A i współpracownicy (1975) Materials Problems in the production of high quality optical surfaces *Mater. Sci. Eng.* **19** 169-83
- <sup>40</sup> Franks J (1978) Ion beam technology applied to electron microscopy *Adv. Elec. Electron. Phys.* **47** 1-50
- <sup>41</sup> Taniguchi N (1985) Atomic bit machining by energy beam processes *Prec. Eng.* **7** 145-55
- <sup>42</sup> Dietrich H P i współpracownicy (1984) Ion beam machining of very sharp points *IBM Tech. Disclosure Bull.* **27** 3039-40
- <sup>43</sup> Motohiro T i Taga Y (1987) Characteristic erosion of silica by oblique argon ion bombardment *Thin Solid Films* **147** 153-65

atomową rozdzielczość, w kierunku prostopadłym do powierzchni rozdzielczość jest ograniczona do około 0.1  $\mu\text{m}$ , przy akceptowalnej praktycznie szybkości obróbki.<sup>44</sup> Zogniskowane wiązki jonowe (FIB) są stosowane w coraz większym stopniu w wielu procesach nanotechnologicznych.<sup>45</sup> Opisano system FIB, składający się z komputerowo sterowanej kolumny, "optyki" jonowej, wzorca obrazu, detektora cząstek oraz urządzeń do wizualizacji. Kolumna FIB pozwala na obróbkę obiektów o rozmiarach 250 nm przy zmiennej odległości od próbki 30-40 mm. Maksymalne rozmiary pola obrabianego przy oddaleniu rzędu 40 mm wynoszą 4x4 mm, a gęstość prądu jonowego jest równa 100  $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Przyrząd może pracować jako mikroobrabiarka, w celu ultrawysokoprecyzyjnego wybierania materiału, lub jako jonowy mikroskop skaningowy. Opisano także użycie tego przyrządu do modyfikacji i naprawy obwodów scalonych, wytwarzania mikrosensorów i w innych działach nanotechnologii. Opisano również pierwsze próby osadzania metali z bardzo wielką precyzją przestrzenną.

W pozostałej części tego podrozdziału dyskutowane są potencjalne możliwości litografii, a nie jej obecny stan, pozwalający na przemysłową produkcję tranzystorów polowych (FET) o rozmiarach 0.35  $\mu\text{m}$  przy użyciu litografii opartej na synchrotronowym promieniowaniu X.<sup>46</sup>

Litografia elektronowa i litografia wykorzystująca promieniowanie X są podobne do litografii optycznej, gdyż w każdym przypadku występuje oddziaływanie promieniowania z czułym materiałem w ten sposób, że następujący później proces wywoływania rozróżnia miejsca naświetlone i nienaświetlone, co pozwala na usunięcie części maski

---

<sup>44</sup> Watkins R E i współpracownicy (1986) Focused ion beam milling *Vacuum* **36** 961-7

<sup>45</sup> Clampit R i Mingay P W (1990-1991) Micromaching with focused ion beams *Sensors and Actuators* **A25** 15-20

<sup>46</sup> Gosch J (1987) West Germany grabs the lead in x-ray lithography *Electron.* **60** (2) 78-80

przez odmycie. Maska jest filmem fotoczułego polimeru, a energia elektronów lub fotonów musi być większa od wymaganej dla tworzenia lub rozrywania wiązań chemicznych. Lawina wtórnych elektronów, tworzona przez absorbowane w żywicy fotony, jest odpowiedzialna za zmiany chemiczne maski. Zasadnicza różnica pomiędzy naświetlaniem promieniowaniem X a elektronami polega na tym, że w normalnych warunkach ilość wtórnych elektronów wytwarzanych przez promieniowanie X jest znacznie mniejsza niż wytwarzanych przez wiązkę elektronów (10-50 keV). Z tej przyczyny litografię z użyciem promieniowania X cechuje większa rozdzielczość.<sup>47</sup> Dobre przeglądy poświęcone litografii z użyciem promieniowania elektromagnetycznego opublikowali Spiller i Feder<sup>48</sup> a następnie Heuberger.<sup>49</sup> Technika tą można bez trudu osiągnąć rozdzielczość poziomą 0.1  $\mu\text{m}$  a w szczególnych przypadkach nawet rzędu 10 nm.<sup>50</sup> Podjęto szereg prób dla poprawy rozdzielczości osiąganey za pomocą wiązki elektronów. W celu ograniczenia ilości powstających wtórnych elektronów ograniczono grubość warstwy (w celu obniżenia rozpraszania) oraz użyto zmodyfikowanych dwuskładnikowych materiałów do produkcji masek. Wiązka elektronów wytwarza wówczas dodatkowo amorficzną warstwę węgla w rezultacie oddziaływania z węglowodorowym dodatkiem. Rozmiar wytworzonej w ten sposób warstewki węgla wzrasta wraz z czasem ekspozycji, ale początkowo w nieznacznym stopniu różni się od średnicy wiązki elektronów. Poprzez odpowiednie ukierunkowanie wiązki elektronowej możliwe jest bezpośrednie zapisanie wzoru na obrobionej powierzchni. Odpowiednią strukturę uzyskuje się przez

---

<sup>47</sup> Spears D L i Smith H I (1972) High resolution pattern replication using soft x-rays *Electron. Lett.* **8** 102-4

<sup>48</sup> Spiller E i Feder R (1977) X-ray lithography *X-ray optics (Topics in Appl. Phys. 22)* 35-92

<sup>49</sup> Heuberger A (1986) X-ray lithography *Solid State Tech.* **29** (2) 93-101

<sup>50</sup> Smith H I (1986) A review of sub-micron lithography *Superlattices and Microstructures* **2** 129-42

trawienie wiązką jonową, zaś warstwa węgla służy jako zabezpieczenie miejsc nie przeznaczonych do trawienia. Tego typu techniki mogą być zastosowane do wytwarzania struktur przestrzennych o rozmiarach 10-20 nm<sup>51</sup> i ścieżek przewodzących o szerokości 40 nm, grubości 10 nm i długości 8-120  $\mu\text{m}$ .<sup>52</sup> W alternatywnej technice obróbki z zastosowaniem silnie zogniskowanej wiązki elektronowej zrezygnowano z użycia maski. Powierzchnia jest obrabiana bezpośrednio z rozdzielczością 1 nm. Bardzo regularne otwory o średnicy 0.2-2 nm oraz cienkie rowki zostały wytworzone w 200 nm warstwie tlenku glinu i materiałach organicznych.<sup>53</sup>

Technologiczna innowacja na polu litografii stała się nieodzowna dla dalszego rozwoju techniki mikrowytwarzania na poziomie submikronowym. W istniejącej litografii wzory obwodów formuje się metodą projekcji na pokrytą fotorezystorem powierzchnię krzemu, a obraz wytwarzany jest z użyciem przesłony na podłożu szklanym, za pomocą promieniowania o długości fali 436 nm. Aby polepszyć zdolność rozdzielczą wprowadza się źródła promieniowania o krótszej fali i uzyskuje w ten sposób wyższe apertury numeryczne zwierciadeł projekcyjnych. Litografia SR (Synchrotron Radiation) oraz wysoko energetyczne promieniowanie X wzbudza szerokie zainteresowanie badaczy. Kudo<sup>54</sup> opisuje litografię SR, stosowane przesłony oraz technologie lokalizacji i pozycjonowania obrazu w skali nanometrowej.

### 3.3.5. Otrzymywanie cienkich warstw

---

<sup>51</sup> Broers A N 1985 High resolution electron beam fabrication *J. Microsc.* **139** 139-52

<sup>52</sup> Smith C G i Ahmed H 1987 Fabrication and phonon transport studies in nanometer scale free-standing wires *J. Vac. Sci. Technol. B* **5** 314-17

<sup>53</sup> Humphreys C J i współpracownicy (1985) Nanometre scale electron beam lithography *Electron Microscopy and Analysis* (Inst. Phys. Conf. Ser. 78) 1-6

<sup>54</sup> Kudo Y (1990) Practical adaptation system of nanotechnology - synchrotron radiation lithography and related technologies *Journal of the Japan Society of Precision Engineering* **56** 456-60

Otrzymywanie cienkich warstw ciała stałego, jako pokrycia dla elementów optycznych, jest dobrym przykładem tradycyjnej nanotechnologii. Pokrywanie metodami chemicznymi ma długą historię, natomiast elektroosadzanie, napyłanie i osadzanie za pomocą wiązek molekularnych to sposoby nowsze.

Ze względu na ważną rolę w produkcji przyrządów półprzewodnikowych, specjalne znaczenie mają techniki wzrostu epitaksjalnego. Epitaksja jest wzrostem cienkiej warstwy krystalicznej na podłożu monokrystalicznym, kiedy to atomy narastającej warstwy oddziałują z atomami warstwy poprzedniej.

Stringfellow<sup>55</sup> opisuje dwie główne klasy wzrostu epitaksjalnego - epitaksję z fazy ciekłej i gazowej. Epitaksja z fazy gazowej obejmuje użycie wiązek molekularnych (MBE), który to proces w zasadzie polega na dokładnie kontrolowanym odparowaniu materiału, w ultrawysokiej próżni. Wiązki molekularne mogą być użyte do wytwarzania wysokiej jakości warstwowych struktur półprzewodników, z precyzją dochodzącą do jednej warstwy atomowej. Technika ta umożliwia kształtowanie poziomu pasma wzbronionego, poprzez śledzenie składu i zawartości domieszek. Kształt płaszczyzn wzrostu jest z kolei kontrolowany poprzez maski zapisane techniką wiązki elektronowej.

Osiągnięty ostatnio postęp w inżynierii molekularnej doprowadził do otrzymania nowych klas materiałów organicznych, do których należą warstwy elektropolimeryzowane, warstwy z polimerów elektroaktywnych, warstwy Langmuira-Blodgetta (L-B) oraz warstwy fotochromowe. Badania Gardnera i Bartleta<sup>56</sup> koncentrują się na elektrochemicznie syntezowanych warstwach z materiałów organicznych. Badali oni właściwości fizyczne wyżej wymienionych

---

<sup>55</sup> Stringfellow G B (1982) *Epitaxy Rep. Prog. Phys.* **45** 469-525

<sup>56</sup> Gardner J W i Bartlett P N (1991) Potential applications of electropolymerized thin organic films in nanotechnology *Nanotechnology* **2** 19-32

materiałów, na przykład morfologię i przewodność elektryczną oraz związek tychże z rodzajem użytego monomeru, domieszek i rozpuszczalnika. Dyskutują oni obecne zastosowania cienkich warstw organicznych w elektronice molekularnej i perspektywy wykorzystania tych organicznych materiałów w mikromechanice i nanotechnologii. Jednym z możliwych zastosowań jest użycie ultracienkich warstw organicznych jako powłok zmniejszających tarcie w mikrośiownikach.

Chociaż plazma niskotemperaturowa stanowi jedynie bardzo niewielki obszar poznanej dotychczas dziedziny czwartego stanu skupienia, to właśnie ona spowodowała w ostatnich latach szeroki rozwój różnorodnych technologii. Znaczące miejsce wśród nich zajmuje technologia cienkich warstw polimerów, tak zwanych polimerów plazmowych. Możliwe do uzyskania tą metodą grubości warstw wynoszą od kilku nanometrów do kilku (rzadko powyżej dziesięciu) mikrometrów. Stąd też w miejsce określenia “polimer plazmowy” pojawiło się ostatnio inne określenie - *cienka warstwa plazmowa*.<sup>57</sup>

Stwierdzenie różnych mechanizmów nukleacji i wzrostu (Stranski - Krastanov i Frank - van der Merwe) w procesach elektrokryształizacji i tworzenia cienkich warstw metali na podłożach niemetalicznych w warunkach osadzania poniżej potencjału rozkładowego, pozwoliło na otrzymywanie nanostruktur modyfikowanych w kierunku horyzontalnym i pionowym do powierzchni podłoża.<sup>58,59</sup> Struktury tego typu mogą być badane techniką STM w warunkach *in-situ*. Połączenie tej techniki z technologią polimerów plazmowych, jako niemetalicznych podłoży może okazać się bardzo interesującą strategią wytwarzania w najbliższej przyszłości.

---

<sup>57</sup> Tyczkowski J (1990) Cienkie warstwy polimerów plazmowych *WNT Warszawa*

<sup>58</sup> Staikov K i współpracownicy (1994) Metal deposition in the nanometer range *Electrochim. Acta* **39** 1019-29

<sup>59</sup> Brener N i współpracownicy (1995) Formation, stability and dissolution of clusters on electrodes monitored *in-situ* STM *Electrochim. Acta* **40** 1401-9

Rozwojowi technologii cienkich warstw ( $d = 10$  nm) towarzyszyły liczne odkrycia naukowe. Przykładem może być zaobserwowanie przez von Klitzinga<sup>60</sup> kwantowego efektu Halla. Odkrycie to pozwoliło na wprowadzenie “atomowego” wzorca  $\rho_{H0}$ <sup>61</sup> i dało fizyce współczesnej nową metodę dokładnego wyznaczania stałej struktury subtelnej.<sup>62,63,64</sup> Rozwój technologii cienkowarstwowych wywołał potrzebę dalszego udoskonalania metod analitycznych do badania tego typu struktur. W swoim przeglądzie Adams i współpracownicy<sup>65</sup> przedyskutowali metody analizy powierzchni, przestrzeni międzyfazowych oraz domen powstających wewnątrz struktur cienkowarstwowych. Stwierdzili oni znaczny postęp w metodach analizy powierzchni. Metody te opierają się na oddziaływaniu wiązek elektronów, jonów, promieniowania X lub laserowego z badaną powierzchnią. Jako przykłady można wymienić wykorzystanie wiązki jonowej do analizy mikrostruktury urządzeń elektronicznych oraz analiza zmodyfikowanej powierzchni azbestu.

---

<sup>60</sup> von Klitzing K (1980) New method for high-accuracy determination of fine-structure constant based on quantized Hall resistance *Phys. Rev. Letters* **45** 494-7

<sup>61</sup> Dietl T (1982) Kwantowy efekt Halla: “Atomowy” wzorzec  $\rho_{H0}$  i nowa metoda dokładnego wyznaczania stałej struktury subtelnej *Postępy Fizyki* **33** 195-200

<sup>62</sup> von Klitzing K (1986) Der quanten-Hall-effekt *Spektrum der Wissenschaft März* 46-57

<sup>63</sup> Landwehr G (1981) Präzisionsbestimmung der feinstrukturkonstanten aus magnetotransport-messungen an halbleiter-randschichten *Phys. Bl.* **37** 59-65

<sup>64</sup> Gerwin R (1981) Was die signale der atome prägt *MPG - Spiegel* **1** 2-5

<sup>65</sup> Adams F i współpracownicy (1993) Surface microanalysis *Anal. Chim. Acta* **283** 19-34



#### 4. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA NANOTECHNOLOGII W TECHNICE

We współczesnej technice nietrudno jest dostrzec wszechogarniające dążenie do coraz wyższej precyzji i miniaturyzacji. Wykazać to można najłatwiej na przykładzie mechaniki precyzyjnej, optyki i elektroniki. Należy jednak odnotować, że rozróżnienie pomiędzy mechaniką precyzyjną i optyką staje się trudne, gdyż maszyny takie jak precyzyjne szlifierki i obrabiarki są dziś często używane do produkcji elementów przyrządów optycznych przez personel posiadający wykształcenie raczej mechaniczne niż optyczne. Podobnie mechanika precyzyjna zaczyna wkraczać do elektroniki, szczególnie w dziedzinie produkcji półprzewodnikowych obwodów scalonych o wielkim stopniu integracji.

##### 4.1. Mechanika

Jednym z pierwszych zastosowań obrabiarek z ostrzem diamentowym była produkcja aluminiowych tarcz podłożowych do magnetycznych pamięci komputerowych (HD). Precyzja tych wyrobów stale rośnie, aby sprostać rosnącym wymaganiom na wielkość pamięci dyskowych. Obecnie osiągnęte są gładkości powierzchni rzędu 3 nm. W pokrewnej technologii dysków optycznych wymagania są jeszcze większe, gdyż krytyczna odległość między tarczą a głowicą odczytującą jest równa około 0.25  $\mu\text{m}$ . Tolerancje części w maszynach do ich produkcji, takich jak mechanizmy posuwu i uchwyty sięgają nanometrów.<sup>66</sup>

Niektóre precyzyjne części składowe posiadają przedział tolerancji

---

<sup>66</sup> Mc Keown P A (1986) High precision manufacturing and the British economy *Proc. Inst. Mech. Eng.* **200** 1-19

5 - 50 nm. Dotyczy to elementów pomiarowych, czujników położenia, noży i ultraprecyzyjnych łożysk tokarskich.<sup>67</sup> Przykładami precyzyjnych elementów cylindrycznych, które wytwarza się z tolerancją około 100 nm i stosuje w dwóch bardzo różnych dziedzinach, są części mechaniczne żyroskopów i wrzeciona wideomagnetofonów.

Teoretyczna koncepcja obróbki kruchych materiałów metodą skrawania była już od pewnego czasu znana.<sup>68</sup> Gdyby udało się zastosować ją w praktyce dla takich materiałów jak ceramika, szkło i kwarc, nie wywołując w nich zbyt wielkich naprężeń wewnętrznych, można by wówczas wyeliminować lub znacznie ograniczyć takie procesy jak szlifowanie i polerowanie. W przypadku tych materiałów spełnienie warunków dla obróbki skrawaniem wymaga, aby głębokość cięcia była zbliżona do 100 nm, a przyłożona siła mieściła się w zakresie 0.1 - 0.01 N. Takie warunki są osiągalne jedynie w przypadku zastosowania bardzo precyzyjnych narzędzi specjalnych, opisanych w pracy Yoshioki i współpracowników.<sup>69</sup> Opisali oni przykład obróbki powierzchni kwarcu do gładkości 2 nm (wzgórki względem zagłębień). Znaczenie ich eksperymentu polega na wskazaniu nowej drogi obróbki części optycznych z pominięciem polerowania. Zasada postępowania może być zastosowana do innych materiałów o komercyjnym znaczeniu, takich jak ceramiczne łopatki turbin, które obecnie muszą być poddawane skomplikowanym procesom wykańczania powierzchni, w celu usunięcia uszkodzeń, powstałych wskutek tradycyjnego szlifowania.

Krzem staje się zarówno budulcem jak i spoiwem wielkich

---

<sup>67</sup> Taniguchi N (1985) Atomic bit machining by energy beam processes *Prec. Eng.* **7** 145-55

<sup>68</sup> Puttick K E (1980) The correlation of fracture transitions *J. Phys. D: Appl. Phys.* **13** 2249-62

<sup>69</sup> Yoshioka H i współpracownicy (1985) Ultraprecision grinding technology for brittle materials: applications to surface and centerless grinding processes *Proc. Milton C Shaw Grinding Symp., Florida Nov. 17-22* (New York: ASME) 209- 27

zespołów przekładni mechanicznych, zaworów, pomp i czujników zmieniających powierzchnię układów scalonych w “fabryki” i “laboratoria” niezwykle małych rozmiarów.<sup>70</sup>

Możliwości zastosowań mikromechaniki są ogromne. Można wyobrazić sobie “sprytne” pigułki, które wewnątrz ciała pacjenta wstrzykiwałyby odpowiednie dawki leków, co pewien czas, z dokładnością do ułamka sekundy. Można zbudować ramię dźwigni, która dzięki swym mikrometrowym rozmiarom manewrowałaby na niezwykle małym obszarze dysku magnetycznego, zapisując i odczytując dane. Przy tej gęstości zapisu na jednym dysku zmieściłaby się cała Encyklopedia Britannica i jeszcze zostałoby sporo wolnego miejsca. Zaś dwudziestokilogramowy spektrometr mas, używany jako analizator gazu, zawierający pompy próżniowe, detektory i inne elementy mógłby mieć rozmiary kieszonkowego kalkulatora.

Technologia mikroobróbki została ostatnio użyta do budowy systemów analizy chemicznej na szklanych elementach o wymiarach około 1x2 cm. Systemy te wykorzystują siły osmozy w celu transportu płynu i zjawiska elektroforetyczne do analizy składników w próbce. Kapilary o długości od 1 do 10 cm trawione w szkle miały średnicę od 10 do 30  $\mu\text{m}$ . Pozwala to na separację aminokwasów metodą elektroforezy kapilarnej ze sprawnością 75000 póltek teoretycznych w czasie 15 sekund. W czasie 4 sekund można osiągnąć sprawność 600 póltek teoretycznych poprzez zmianę napięcia sterującego przepływem. Urządzenia skonstruowane według powyższych zasad nie posiadają żadnych części ruchomych.<sup>71</sup>

Długo można by wymieniać możliwe zastosowania mikromechaniki, a nie są to tylko marzenia futurologów. W 1991 roku

---

<sup>70</sup> Hesketh PJ i Harrison DJ (1994) Micromachining *Interface* 21-26

<sup>71</sup> Harrison D J i współpracownicy (1993) Micromachining a miniaturized capillary electrophoresis-based chemical analysis system on a chip *Science* 895-7

grupa ludzi zajmująca się tą dziedziną wydała dzieło, którego objętość jest większa niż książka telefoniczna Manhattanu.<sup>72</sup> Ponad tysiącstronicowy tom ustanowił swoisty rekord i można w nim znaleźć wszelkie możliwe zastosowania mikromechaniki: zawory otwierane i zamykane ciśnieniem pęcherzykowym, mikroskopowe pincety, urządzenia do zapisu sygnałów nerwowych, umieszczane wewnątrz mózgu oraz czujniki, które podobnie jak ludzka dłoń potrafią odróżniać przedmioty twarde od miękkich. Pewien rodzaj mikrosilników Mehregany'ego, które również znalazły się w tym dziele, może zostać użyty któregoś dnia, jako sztuczny mięsień lub jako urządzenie uruchamiające (serwomotor) do czujników, zaworów i urządzeń elektronicznych, umieszczonych na pojedynczym układzie scalonym. Stanowiłyby one podstawowe wyposażenie instalacji mikrochemicznych, czy też zestawów instrumentów badawczych w skali mikrometrowej.<sup>73</sup>

Obecnie produkcja tych maleńkich silniczków jest w początkowym stadium realizacji. Mają one moment obrotowy znacznie większy od momentu obrotowego rzęsek bakterii *Salmonella*, ale wciąż jeszcze daleko im do momentu obrotowego mechanizmu zegarka. Mehregany ocenia, że na dużej płytce krzemowej, z której wycina się układy scalone można by umieścić nawet milion mikrosilników. Zespół kilkuset tysięcy takich silniczków przepompowałyby prawie litr płynu w ciągu minuty. To już znacząca wydajność, chociaż nadal brak jest pomysłów, co zrobić z takim zespołem mikropomp.

Główne technologie masowej produkcji końca XX wieku, czyli wytłaczanie i odlewanie, ustąpiły już miejsca fotolitografii i chemicznemu czy też próżniowemu trawieniu. Dzięki tym nowym technologiom można umieścić  $10^9$  tranzystorów w jednym układzie

---

<sup>72</sup> Stix G (1993) Mikrouządzenia, *Świat Nauki* 79-87

<sup>73</sup> Ricco AJ (1994) SAW chemical sensors *Interface* 38-44

scalonym.<sup>74</sup> Obecnie te technologie pozwolą wytworzyć mikroskopijne struktury wirujące i wibrujące.

Niektórzy uważali, że zastosowania krzemu kończą się na mikroelektronice. Teraz okazuje się, że można z niego otrzymać na przykład małe przekładnie oraz czujniki przyspieszenia. W 1981 roku Petersen opublikował istotny artykuł zatytułowany "Krzem jako materiał mechaniczny". Wykazał w nim, że twardość krzemu zbliżona jest do twardości kwarcu i że jest tylko nieco niższa niż niklu, żelaza i większości szkieł konwencjonalnych. Ponadto jego wytrzymałość na rozciąganie przekracza nawet wytrzymałość stali, chociaż z drugiej strony kruchość krzemu nie czyni zeń materiału idealnego pod każdym względem.

Mikromaszyny budowane między innymi przez Mehreganyego są efektem ponad dwudziestoletnich badań. W tym czasie coraz bardziej powszechne stało się stosowanie czujników wykonanych głównie z krzemu. Dawny proces technologiczny polegał na tym, że powierzchnię monokrystalicznego krzemu pokrywano maską fotolitograficzną, a po naświetleniu trawiono chemicznie. W wyniku trawienia otrzymywano zagłębienia - wklęsłe lub piramidalne, zależnie od tego, która ze ścian kryształu była wystawiona na działanie czynnika trawiącego. Te wytrawione zagłębienia stawały się elementami wsporników, przesłon i innych elementów strukturalnych potrzebnych do wytworzenia urządzeń, takich jak czujniki ciśnienia czy przyspieszenia. Technika ta, stosowana w latach sześćdziesiątych, nazywana jest mikroobróbka masywną, ponieważ trawienie jest stosunkowo głębokie, a struktury, które powstają, wykorzystują całą objętość płytki krzemowej.

W czasie, gdy Petersen pisał swój artykuł, Howe wprowadził nową technologię, nazwaną mikroobróbka powierzchniową. Po wykonaniu

---

<sup>74</sup> Keyes RW (1993) Przyszłość tranzystora *Świat Nauki* 42-48

przez Howe'a czujnika gazu tą techniką, inni badacze zaczęli stosować ją do wytwarzania pomp, zaworów, silników i innych zadziwiających urządzeń, które bliższe są medycynie niż inżynierii mechanicznej. Elektronowy mikroskop skaningowy ukazuje te struktury jako szaro-czarne obrazy struktur pulsujących równoległoboków sieci rzeskowatych elementów, które wychylają się z płaszczyzny płytki oraz jako zazębiające się urządzenia, o wzorze przypominającym układ włókien mięśni.

W 1980 roku Ehrfeld wraz z zespołem z Karlsruhe w Niemczech wynalazł sposób wytwarzania mikrostruktur o grubości większej niż ich szerokość, na przykład niklowych urządzeń szerokości 5  $\mu\text{m}$  i wysokości 300  $\mu\text{m}$ . Ta technika została nazwana LIGA, co stanowi akronim słów Lithographie Galvanoformung Abformung.

Podobnie jak obróbka masywna i powierzchniowa, LIGA oparta jest na litografii. Zamiast światła ultrafioletowego, naświetlającego maskę fotolitograficzną, używa się w niej promieniowania rentgenowskiego o wysokiej energii. Wnika ono na kilkaset mikrometrów w grubą warstwę polimeru. Następnie za pomocą wywoływacza usuwa się naświetlone obszary pozostawiając podkład, który można napęlić niklem lub innym materiałem w procesie galwanizacji (Galvanoformung). To, co pozostaje, może być albo elementem strukturalnym albo wzorcem w procesie formowania (Abformung).

Podobnie jak w przypadku mikroobróbki powierzchniowej, w technice LIGA wytrawia się warstwę podłoża, pozostawiając w niej zawieszane lub ruchome struktury. Cały proces może być prowadzony na powierzchni krzemowego układu scalonego, co umożliwia integrację z elementami mikroelektronicznymi. Do tej pory w Karlsruhe skonstruowano metalowe czujniki przyspieszenia, turbiny, silniki, a także plastikowe elementy optyczne - trójwymiarowe wersje niektórych

elementów wytwarzanych metodami mikroobróbki powierzchniowej.

## 4.2. Optyka

W pewnych dziedzinach produkcji optycznej istnieje wyraźna różnica między podejściem technologicznym wprowadzającym robotyzację, a tradycyjnym rzemieślniczym. Z drugiej strony w szlifierstwie i polerstwie stosowane są oba te podejścia.

Znaczne wymagania względem optyki w podczerwieni, zwłaszcza od lat 70-tych, nie mogły być spełnione przez tradycyjnych producentów. Spowodowało to zapotrzebowanie na rozwój i zastosowanie automatów do obróbki elementów optycznych. Te nowe technologie rozwinęły się do tego stopnia, że oferują obecnie nanometrowe precyzje obróbki.

Ważnym zastosowaniem dla wyżej wymienionych jest wytwarzanie optyki o niekonwencjonalnej geometrii<sup>75</sup> takiej jak asferyczna czy paraboliczna.

Masowa produkcja (kilka milionów sztuk rocznie) miniaturowych asferycznych soczewek, używanych w odtwarzaczach płyt kompaktowych oraz obiektywów, jest przykładem przenikania się optyki z mechaniką precyzyjną. Dokładność wykonania tych wyrobów musi być wyższa niż  $0.2 \mu\text{m}$ , a gładkość powierzchni winna być poniżej 20 nm RMS, aby spełnić kryteria jakości, limitowane zjawiskiem dyfrakcji.<sup>76</sup> Zwierciadła dla wysokoenergetycznych wiązek laserowych stawiają przed optyką wymagania wytwarzania powierzchni o gładkości

---

<sup>75</sup> Arnold J B i współpracownicy (1977) Machining nonconventional-shaped optics *Opt. Eng.* **16** 347-354

<sup>76</sup> Andrea J (1986) Mass-production of diffraction limited replicated objective lenses for compact disc players *Proc. SPIE* **645** 45-8

rzędu 0.1 nm, w celu ograniczenia jej uszkodzenia<sup>77</sup> oraz minimalizacji rozpraszania w optyce żyroskopów laserowych<sup>78</sup> lub promieni X.<sup>79</sup> Ten poziom gładkości powierzchni można obecnie osiągnąć jedynie stosując technikę szlifowania i polerowania.

Przykładem wykorzystania technologii nanoszenia cienkich warstw z nanometrową lub subnanometrową precyzją jest produkcja lusterek dla żyroskopów laserowych oraz zwierciadeł dla promieniowania X, pokrywanych wielowarstwowo, celem minimalizacji rozpraszania promieniowania. Pokrycia wielowarstwowe umożliwiają stosowanie zwierciadeł dla długości fali nawet do 4 nm. Grubości warstw nie przekraczają zwykle kilku nm.<sup>80</sup> Nowym jest zastosowanie wiązki elektronowej do wytwarzania siatek dyfrakcyjnych dla mikroskopów pracujących z promieniowaniem X.<sup>81</sup> Są one produkowane drogą generowania wzorcowego rysunku w materiale maski lub bezpośrednio poprzez obróbkę płytki wiązką elektronów. Tą techniką można otrzymać linie odległe od siebie o 20 nm.

Problemy wytwarzania kropek i struktur kwantowych dla optyki zintegrowanej, podobnie jak udoskonalenia w tradycyjnej fotolitografii, kierują ostatnio uwagę badaczy zajmujących się mikroelektroniką w stronę elektroniki molekularnej.<sup>82</sup>

### 4.3. Elektronika

W dziedzinie wytwarzania półprzewodników, miniaturyzacja jest

- 
- <sup>77</sup> Bennett H E i współpracownicy (1984) Laser induced damage in optics materials: 14 th symposium *Appl. Opt.* **23** 3782-95
- <sup>78</sup> Thomas N L (1978) Low-scatter, low-loss mirrors for laser gyros *Proc. SPIE* **157** 41-8
- <sup>79</sup> Franks A (1977) X-ray optics *Sci. Prog.* **64** 371-422
- <sup>80</sup> Barbee T (1985) Multilayers for x-ray optics *Proc. SPIE* **563** 2-28
- <sup>81</sup> Michette A G (1986) *Optical Systems for Soft X-ray* (New York: Plenum)
- <sup>82</sup> Beaumont S P (1991) Quantum wires and dots: the challenge to fabrication technology *NATO ASI Ser., Ser. B* 281



powszechna. Precyzja wytwarzania obwodów scalonych warstwa po warstwie stale rośnie. Około jedna czwarta prac poświęconych fizyce półprzewodników dotyczy aspektów ich struktury.<sup>83</sup> W kierunku prostopadłym do warstwy, struktura ta jest wytwarzana metodą litografii. Tą techniką otrzymuje się nanometrowe elementy wykorzystywane głównie do celów badawczych, wykorzystując promieniowanie X oraz wiązki elektronowe.

Urządzenia, w których zastosowano arsenek galu cieszą się dużym zainteresowaniem ze względu na osiąganie najwyższych szybkości przełączania, wysokiej tolerancji temperaturowej oraz wysokiej odporności na zakłócenia. Urządzenia bazujące na efektach kwantowych wytwarzane są zwykle metodą epitaksji z wiązki molekularnej (MBE) i w typowych przypadkach zawierają wiele warstw GaAs oddzielonych amorficznymi warstwami AlGaAs. Grubość warstw jest mniejsza od 20 nm, a w skrajnych przypadkach są to warstwy monoatomowe. Również mogą być użyte inne materiały takie jak InP i InGaAs. Dwa urządzenia typu studni kwantowej tworzą układ typu HEMT i MQWL. Niska oporność tranzystora HEMT prowadzi do przyspieszenia operacji, podczas gdy w laserze MQWL ograniczenie ruchliwości nośników prowadzi do przesunięcia emisji w kierunku nadfioletu.<sup>84</sup> Przez odpowiedni dobór grubości warstwy i stosunku Al/Ga jest możliwe uzyskanie emisji promieniowania w zakresie widzialnym.

Mostek wykorzystujący złącze Josephsona pozwala na zupełnie nowe podejście do konstrukcji bardzo szybkich obwodów scalonych. Rozmiary mostka w takich obwodach muszą być rzędu odległości koherencji nadprzewodzących elektronów, to jest odległości bliskiej 40 nm w materiale takim jak niob, w temperaturze 4.2 K. Mostki o takich

---

<sup>83</sup> Kelly M J (1986) Nanometre physics and microelectronics *Phys. Bull.* **37** 67-9

<sup>84</sup> Kelly M J i współpracownicy (1986) Quantum semiconductor devices with microwave applications *GEC J. Res.* **4** 157-62

rozmiarach zostały wytworzone przy użyciu litografii z wykorzystaniem wiązki elektronów.<sup>85</sup> Metoda powyższa została również użyta do wytwarzania tranzystorów polowych MOSFET opartych o GaAs o rozmiarach mostka rzędu 55 nm.<sup>86</sup> Stwierdzono, że maksymalne napięcie przebicia dla tych urządzeń wynosi około 1V. Pewne rozważania wskazują, że napięcie przebicia sięga 2V, jeśli urządzenie wytwarzane jest metodą epitaksji z wiązki molekularnej, a nie z fazy gazowej. MBE pozwala otrzymać produkty wyższej jakości, w których przejście od obszaru domieszkowanego do niedomieszkowanego jest bardziej ostre.

Usprawnienia w technologii półprzewodników stwarzają obecnie możliwości wytwarzania urządzeń elektronicznych o rozmiarach mniejszych niż 100 nanometrów. Są to rozmiary porównywalne z długością fali de Broglie'a elektronu o energii zbliżonej do poziomu Fermiego. Timp<sup>87</sup> dokonał analizy zagadnień związanych z zależnością pomiędzy kwantowaniem energii, koherencją i rozpraszaniem elektronu na zanieczyszczeniach a opornością urządzenia w niskich temperaturach. Przedyskutował także wpływ powyższych czynników na wzajemną izolację urządzeń.

Postęp w technikach litograficznych stwarza możliwości wytwarzania gęsto upakowanych (ultra-large-scale of integration ULSI) obwodów scalonych. W takich obwodach połączenia są tak cienkie i blisko położone, że sygnały z jednej linii mogą łatwo sprzęgać się z

---

<sup>85</sup> Sugano T i współpracownicy (1984) Bridge type Josephson junction as high speed digital devices *Proc. Int. Symp. on Nanometre Structure Electronics, Toyonaka, Japan Microelectr. Eng.* **2** 175-82

<sup>86</sup> Patrick W i współpracownicy (1985) Very short gate length GaAs MESFETS *IEEE Electron. Devices Lett.* EDL - **6** 471-2

<sup>87</sup> Timp G (1991) Scanned probe microscopy *STM and Beyond Conference*, Santa Barbara, CA, USA, 6-11

innymi, powodując interferencję i zakłócenia. Bandyopadhyay<sup>88</sup> podał ogólną teorię modelowania sprzężeń pomiędzy połączeniami optycznymi (fallowody) oraz elektrycznymi w dielektrykach.

Kohler dokonał przeglądu ostatnich tendencji w zakresie wytwarzania mikrostruktur o wysokiej skali integracji.<sup>89</sup> Opisał on postęp, jaki dokonał się w wytwarzaniu układów DRAM i wzmacniaczy, ze szczególnym uwzględnieniem efektów związanych ze skończonym czasem ładowania i rozładowania, na działanie urządzenia. Autor zwrócił też uwagę na rysujące się możliwości zastosowań nanotechnologii w elektronicznej obróbce sygnałów. Scharf<sup>90</sup> dokonał przeglądu możliwości technologii submikronowych i nanotechnologii. Zwrócił też uwagę na możliwość integracji technologii opartych na krzemie (Si) oraz arsenku galu (GaAs) i budowy nowych urządzeń wykorzystujących efekty kwantowe. Zapotrzebowanie na miniaturyzację wymaga poprawy procesu wytwarzania oraz stosowania całkowicie nowych technik. Aby sprostać tym zadaniom opracowano metody litografii wykorzystujące synchrotronowe promienie X, co jednak wymaga lokalizacji urządzeń wytwórczych w bezpośrednim sąsiedztwie pierścienia synchrotronu. Z drugiej strony metoda powyższa znalazła wiele zastosowań poza mikroelektroniką. Międzynarodowe współzawodnictwo w tej dziedzinie jest jedną z sił wymuszających innowacje.

Aby przechowywać i przesyłać coraz więcej informacji konieczne jest zwiększenie gęstości upakowania, a co za tym idzie opracowywania coraz wyżej zintegrowanych urządzeń. Kluczem do sukcesu w tej

- 
- <sup>88</sup> Bandyopadhyay S (1992) Coupling and crosstalk between high speed interconnects in ultralarge scale integrated circuits *IEEE Journal of Quantum Electronics* **28** 6 1554-61
- <sup>89</sup> Kohler E (1989) From microelectronics to nanoelectronics *Radio Fernsehen Elektronik* **38** 615-19
- <sup>90</sup> Scharf A (1989) Microelectronics as a driving force for innovation *Hard and Soft* **4** 61-4

dziedzinie może być opracowanie technologii łączącej elektronikę, optykę i mechanikę precyzyjną, w której ważną rolę będą miały pomiary technologicznych. Półprzewodnikowe przyrządy scalone (CMOS, DRAM) już od lat podwajają swoje parametry.<sup>91</sup> Tworzone w nich struktury mają często wymiary mniejsze niż 1µm. Jeśli ta tendencja utrzymałaby się, to następnym etapem byłoby przejście do nanotechnologii, czyli wytwarzania z precyzją 1-10 nm.

## 5. NANOTECHNOLOGIA W RÓŻNYCH KRAJACH

### 5.1. Wielka Brytania

Prace prowadzone w Narodowym Laboratorium Fizyki (NPL) były stymulowane potrzebami optyki dla promieniowania X, które znajduje coraz większe zastosowania praktyczne. Zastosowania te to, badanie struktury polimerów metodą analizy promieniowania X rozpraszane pod małym kątem, analiza pierwiastków lekkich metodą dyfrakcji promieniowania na siatkach specjalnej konstrukcji, wytwarzanie zwierciadeł w celu wygodniejszego wykorzystywania promieniowania synchrotronowego, oraz teleskopów i mikroskopów pracujących w zakresie promieniowania X.<sup>92</sup> Dla wielu z tych zastosowań wymagana jest tolerancja wykończenia powierzchni elementów aparatury na poziomie subnanometrowym.<sup>93,94</sup> Nanotechnologia coraz powszechniej wkracza na takie pola jak wytwarzanie precyzyjnych manipulatorów czy

---

<sup>91</sup> Morimura M (1981) Current conditions and future perspectives of 3-dimensional nanotechnology *J. Soc. Inst. and Control Engineers* **25** 405-11

<sup>92</sup> Franks A (1977) X-ray optics *Sci. Prog.* **64** 371-422

<sup>93</sup> Franks A i Gale B (1984) Grazing incidence optics for x-ray microscopy *X-ray Microscopy* vol. 43 ed. G Schmahl and D Rudolph (Berlin: Springer, Ser. Opt. Sci.) 129-38

<sup>94</sup> Franks A i Gale B (1985) The development of single and multilayered Wolter x-ray microscopes *Proc. SPIE* **563** 81-9

produkcja obwodów scalonych i zwierciadeł żyroskopów laserowych.

Wytwarzanie precyzyjnych części urządzeń pociąga za sobą konieczność budowy odpowiednich urządzeń pomiarowych i z tej przyczyny skonstruowano wiele aparatów do pomiaru jakości powierzchni i struktur przestrzennych, z dokładnością często lepszą niż 0.1 nm.<sup>95</sup> Szczególnie godnymi uwagi są Nanosurf 2<sup>96</sup> (interferometr wykorzystujący światło spolaryzowane<sup>97</sup>), profilometr<sup>98</sup>, profilometr laserowy<sup>99</sup>, Nanorand 1<sup>100</sup> i interferometr wykorzystujący promieniowanie X<sup>101</sup>. Ta pokaźna liczba aparatów stwarza możliwości pomiaru gładkości powierzchni w zakresie od 50 pm do 15 nm oraz jej kształtu, z precyzją w przedziale od 50 nm do 250 nm. Umożliwiają one pomiar krzywizny powierzchni z dokładnością do 1 nm oraz precyzyjny pomiar przemieszczeń względem wzorca z precyzją 10 pm. Szczegółowe dane dotyczące wymienionych powyżej jak i kilku innych urządzeń podaje Stedman.<sup>102</sup> Pomiaru bardzo małych fragmentów powierzchni są najczęściej wykonywane z użyciem sond. Whitehouse i współpracownicy<sup>103</sup> zebrali dotychczasowe informacje dotyczące konstrukcji, zastosowania i perspektyw ich unowocześnień. Autorzy rozważają, jakie są granice możliwości pomiarowych oraz metod

---

<sup>95</sup> Franks A (1986) The metrology of grazing incidence optics at the National Physical Laboratory *Proc. SPIE* **640** 170-4

<sup>96</sup> Franks A (1991) Nanometric Surface Metrology at the National Physical Laboratory *Metrology* **28** 471-482.

<sup>97</sup> Downs M J i współpracownicy (1985) Optical system for measuring the profiles of super-smooth surfaces *Prec. Eng.* **7** 211-5

<sup>98</sup> Stedman M i Stanley V W (1979) Machine for the rapid and accurate measurement of profile *Proc. SPIE* **163** 99-102

<sup>99</sup> Ennos A E i Virdee M S (1983) Precision measurement of surface form by laser autocollimation *Proc. SPIE* **398** 252-7

<sup>100</sup> Franks A (1987) Nanotechnology *J. Phys. E.* **20** 1442-1445.

<sup>101</sup> Bowen D K i współpracownicy (1985) Calibration of surface roughness transducers at Angstrom levels, using x-ray interferometry *Proc. SPIE* **563** 412-9

<sup>102</sup> Stedman M (1986) The precision measurement of roundness *Wear* **109** 367-73

<sup>103</sup> Whitehouse DJ i współpracownicy (1988) Nano-calibration for stylus-based surface measurement *J. Phys. E* **21** 46-51.

kalibracji urządzeń. Przedstawiają również obecne tendencje pojawiające się w nanotechnologii. Są one ukierunkowane na precyzyjne wytwarzanie i badanie właściwości materiałów poczynając od poziomu atomowego. Artykuł pokazuje również możliwości kontrolowania i kalibracji topografii powierzchni z dokładnością subnanometrową. Autor proponuje również nowe techniki zdolne do pomiaru wielkości kątowych takich jak nachylenie.

Prace z zakresu nanotechnologii prowadzone w Narodowym Laboratorium Fizyki<sup>104</sup> cieszyło się od początku jego powstania znacznym zainteresowaniem przedstawicieli przemysłu, uniwersytetów oraz sfer rządowych. Laboratorium otrzymywało coraz więcej zamówień na pomoc techniczną i doradztwo od instytucji brytyjskich i innych. Stało się więc widoczne, że nadchodzi czas rozpoczęcia narodowego programu badań w dziedzinie nanotechnologii. W 1986 roku odbyło się konsultacyjne spotkanie przedstawicieli przemysłu i uniwersytetów, w którym wzięło udział 150 delegatów. W trakcie spotkania dokonano prezentacji zastosowań nanotechnologii oraz potwierdzono zainteresowanie tym programem. W efekcie powstało Forum i Komitet Strategii, których celem był nadzór nad programem, wyznaczanie priorytetów i tworzenie wspólnych programów badawczych.

Nanotechnologia została uznana za ważną dziedzinę i znalazła się w rządowym programie LINK, którego celem było wspomaganie ważnych nowych technologii.<sup>105</sup> Dążenie do miniaturyzacji i zwiększania precyzji stawiają przed przemysłem coraz większe wymagania odnośnie obróbki, pozycjonowania, sterowania i pomiarów z nanometrową tolerancją.<sup>106</sup> Określenie nanotechnologia oznacza

---

<sup>104</sup> Franks A (1987) Nanotechnology *NPL News* **367** 3-7.

<sup>105</sup> Franks A (1987) Nanotechnology opportunities *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **20** 237

<sup>106</sup> Kennell P i Robinson D W (1990) The UK National Initiative on Nanotechnology (Opportunities for collaborative research within the LINK Nanotechnology

technologię wytwarzania, kiedy rozmiary lub tolerancje wykonania mieszczą się w zakresie 0.1 do 100 nm i stanowią kluczowy problem. Brytyjska Narodowa Inicjatywa na rzecz Nanotechnologii (UK National Initiative on Nanotechnology - NION), która pojawiła się w 1986 roku była efektem szybkiego wzrostu znaczenia tej nowej technologii. Przyświecał jej cel promocji badań ukierunkowanych na przemysłowe wykorzystanie.

Kennell i Robinson dokonali przeglądu aktywności NION-u i LNP, perspektyw rozwoju nanotechnologii i możliwości zastosowań uzyskiwanych produktów.<sup>105</sup>

## 5.2. Niemcy

Po opanowaniu w latach osiemdziesiątych całego świata techniki przez mikroelektronikę, obecnie zaczyna się druga rewolucja - w dziedzinie tworzyw. Fachowcy są zdania, że decydującą rolę odegra tutaj Instytut Nowych Materiałów w Saarbrücken<sup>107</sup>. "Inaczej niż to było w przypadku mikroelektroniki - stwierdza prof. Helmut Schmidt, dyrektor Instytutu Nowych Materiałów - tym razem przemysł wykazuje od początku wielkie zainteresowanie tym kierunkiem rozwoju, nie tylko w Ameryce i na Dalekim Wschodzie, lecz również w Europie".

Owa nowa technologia, z zainteresowaniem obserwowana przez zagranicę wykazuje wiele cech wspólnych z techniką komputerową. Po trzydziestu latach doskonalenia "chipów", firmy elektroniczne zaczynają wytwarzać układy przełączające o wymiarach mniejszych od mikrometra. Specjaliści z dziedziny tworzyw w Saarbrücken zajmują się konstruowaniem elementów układów, które są jeszcze stukrotnie

---

Program) *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering* **1320** 370-6

<sup>107</sup> Ortner F (1994) Instytut Nowych Materiałów u progu ery tworzyw *Profil* **4** 32-35

mniejsze: nanocząsteczek wielkości zaledwie kilku nanometrów, a więc tylko kilkadziesiąt razy większych od przeciętnej cząsteczki.

Naukowcy z Saarbrücken wychodzą z założenia, iż nanocząsteczki stanowią fazę pośrednią pomiędzy podstawowymi elementami budowy materii - atomami i cząsteczkami - a ciałem stałym, w którym atomy i cząsteczki tworzą mniej lub bardziej uporządkowane struktury. Ze względu na ich specyficzną strukturę "już nie cząsteczki, a jeszcze nie ciało stałe", nanocząsteczki, połączone ze sobą, zaczynają nagle wykazywać nowe właściwości. Metale dają się na przykład przeobrażać w półprzewodniki lub tworzywa optyczne. Do pomyslenia byłaby tu niemal nieskończona liczba odmian, o ile nanocząstki byłyby wytworzone z substancji niemetalicznych i nieorganicznych i umieszczone wewnątrz innych materiałów, na przykład w szkłe, tworzywach sztucznych czy ormocerach (organically modified ceramics). Powstawałyby wówczas tak zwane nanokompozyty, które w przypadku tworzyw umożliwiają rozwiązania podobnie "szyte na miarę", jak indywidualnie projektowane mikrochipy w elektronice.

Gdy w 1993 roku na specjalistycznej sesji w USA prof. Schmidt oznajmił, że w jego instytucie powiodły się pierwsze próby wytworzenia ceramiki przy pomocy nanotechnologii, wiadomość ta zelektryzowała środowisko fachowców. Taka możliwość oznaczałaby rozwiązanie wielu dotychczasowych problemów, gdyż przy zastosowaniu nanocząstek uzyskuje się materiał wyjściowy tysiąckrotnie gęstszy od stosowanej obecnie ceramiki.

Mimo ogromnego zagęszczenia materiału, pierwsze ceramiczne próbki wytworzone w Saarbrücken wykazują w procesie formowania elastyczność jak wosk. Naukowcy dokonali tej sztuki przy pomocy technologii nowego typu. Wyprodukowali oni cząstki ceramiczne o niewiarygodnej średnicy, która wynosi 15 nm ( $10^{18}$  - biliard - takich cząstek zmieściłoby się w przestrzeni, jaką zajmuje główka od szpilki)



cząstki ceramiczne zachowują między sobą odstęp nie większy niż 0.4 nm.

Do niedawna nanoproszki można było nabyć - jeśli w ogóle było to możliwe - w cenie wielu tysięcy marek za kilogram. Naukowcy z Saarbrücken opracowali proces chemiczny, dzięki któremu można wytwarzać nanoproszek technologią zol-żel w cenie od pięćdziesięciu do stu pięćdziesięciu marek za kilogram. Okazało się, że wystarczy parę chemicznych sztuczek, by drogą procesu zol-żel produkować nanoproszek na skalę przemysłową.

W 1992 roku, Instytut w Saarbrücken zaprezentował swoje nanotworzywo - cieniutką, przezroczystą powłokę, którą można nanosić na takie materiały jak: szkło, sztuczne tworzywo, metal czy lakier, a nawet na oszlifowany marmur. Powłoka ta nie przyjmuje brudu, a ponadto jest odporna na zadrapania i ścieranie. W przemyśle doceniono natychmiast możliwości tego tworzywa, którym obecnie interesuje się już ponad sto przedsiębiorstw. Równie obiecujący wydaje się drugi typ powłoki, który w najbliższym czasie znajdzie zastosowanie w przemyśle. Chodzi tu o powłokę nanoszoną na zwykłe szkło okienne, która spełnia rolę osłony cieplnej, zaś w temperaturze przekraczającej 1000°C przeistacza się w szklisty materiał o znacznej wytrzymałości, chroniący powleczone nim elementy przed stopieniem. Ogólnie biorąc powłoki tego typu wykazujące całkiem inne właściwości niż lity materiał, z którego zostały wytworzone, prezentują wręcz nie dające się jeszcze dzisiaj przewidzieć możliwości zastosowania.

Nieoczekiwane perspektywy technologiczne otwierają się dzięki tak zwanym "inteligentnym" materiałom *smart materials*, zmieniającym swe właściwości pod wpływem warunków zewnętrznych - które są także przedmiotem badań w Saarbrücken. Trwają tam też prace nad doskonaleniem precyzyjnych filtrów, które automatycznie zamykają swoje pory, gdy zarejestrują obecność określonych gazów. Bada się

również nanokompozyty, których wytrzymałość - sterowana zdalnie przez czujnik - w ciągu milisekund dostosowuje się do warunków zewnętrznych. W laboratoriach Saarbrücken pierwsze nanokompozyty funkcjonują już jako optyczne przełączniki: zastosowany materiał zmienia swe właściwości pod wpływem światła, a sygnały są przesyłane w różnych kierunkach, chociaż żaden element urządzenia nie został wprowadzony w ruch.<sup>108</sup>

Inna technologia, nad którą pracuje się w Saarbrücken, związana jest z problematyką energetyki i ochrony Środowiska. Tradycyjny akumulator ołowiowy jest - jako magazyn energii dla samochodów o napędzie elektrycznym - zbyt ciężki i ma zbyt krótki okres eksploatacji. Dzięki nanokompozytom można by zastąpić ciężkie płyty ołowiowe elementami ceramicznymi, w które zostałyby wtopione biliardy nanocząsteczek ołowiu. Taki akumulator nowego typu byłby wielokrotnie lżejszy i odznaczałby się nieograniczoną żywotnością, gdyż tkwiące w ceramicznym tworzywie cząsteczki ołowiu nie mogłyby się z niego uwolnić.

Technologia LIGA jest na czołowej pozycji przedsięwzięć finansowanych przez rząd. Ma to zapewnić państwu niemieckiemu wiodącą rolę w mikroobróbce i zrekompensować nieudane próby usytuowania się w czołówce światowego rynku mikroelektroniki. Karlsruhe planuje skierowanie ponad 200 naukowców do prac nad LIGA i mikromechaniką.

Ośrodek w Karlsruhe pomógł również w transferze tej technologii do prywatnego przemysłu. Udostępnił swoje patenty firmie MicroParts - prywatnemu koncernowi firm metalurgicznych, chemicznych i innych, które jako jedyne na świecie sprzedają elementy LIGA.

Mikromechanika w Niemczech to nie tylko technologia LIGA.

---

<sup>108</sup> Fischer A (1993) New plastic/ceramic composites show promise as optical materials  
*Photonics Spectra* 39 24

Rząd przeznacza rocznie 70 milionów dolarów na tak zwane mikrosystemy, czyli różne technologie w skali mikro, które obejmują zarówno mikromechanikę, jak i mikroelektronikę. Ten program prowadzi niemieckie Centrum Technologii VDI/VDE, które koordynuje wydatki na mikromechanikę. Program Technologii Mikrosystemów skupia setki małych i średnich firm oraz instytutów badawczych z całego kraju. Karlsruhe i VDI/VDE zaproponowały stworzenie w ramach Wspólnoty Europejskiej programu o miliardowym budżecie, który skupiałby się na technologiach miniaturyzacji.

### 5.3. Japonia

Jednym z projektów dotyczących nanotechnologii w Japonii był Yoshida Nanomechanism Project.<sup>109</sup> W ramach tego przedsięwzięcia badania prowadzono w trzech różnych zespołach. Pierwszy z nich zajmował się udoskonalaniem mikroskopów skaningowych oraz ich zastosowaniami w obróbce powierzchni, manipulacji materiałami biologicznymi i wytwarzaniem podzespołów dla mikroskopii rentgenowskiej. Druga grupa badaczy zajmowała się problemami pomiaru i kontroli przesunięć oraz budową urządzeń pozycjonujących. Ostatnia z grup zatrudnionych w projekcie studiowała problematykę związaną z wytwarzaniem wielowarstwowych lusterek dla promieniowania X oraz ich obróbką za pomocą wiązek jonowych.

W tym czasie pierwszy japoński narodowy projekt w dziedzinie nanotechnologii był już na etapie realizacji. Projekt bazował na programie badań innowacyjnych ERATO (Exploratory Research for

---

<sup>109</sup> Nakagiri N (1991) *Nanomechanism Scanned Probe Microscopy STM and Beyond Conference* Santa Barbara, CA, USA 6-11

Advanced Technology). W swojej publikacji Yoshida i Iizuka<sup>110</sup> opisują podstawy programu ERATO oraz działania na polu nanotechnologii. Yoshida Nano-Mechanism Project był jednym z projektów realizowanych w ramach programu ERATO kierowanego przez JRDC (Research & Development Corporation of Japan). JRDC jest korporacją statutową rządu japońskiego powołaną przez Agencję Nauki i Technologii. JRDC administruje i w pełni finansuje program ERATO. Pole badań i ich kierownicy są wybierani i wspierani przez JRDC, naukowcy pracujący w każdym z projektów są zatrudnieni przez JRDC. Projekt Yoshida posiadał budżet 12 milionów dolarów USA na pięć lat. Rozpoczął się on w 1985 roku. W ramach tego projektu studiowano nowe podejścia naukowe w zakresie pomiarów, kontroli i wytwarzania z precyzją nanometrową oraz zjawisk fizycznych i właściwości mechanicznych materii o nanometrowych rozmiarach. Osiągnięto pewne z wyznaczonych celów takich jak budowa przyrządów i podzespołów. Dalszy rozwój technologii wytwarzania tychże uznano za ważny, ale jeszcze ważniejsza okazała się wiedza zdobyta w trakcie realizacji badań.

Firmy japońskie przystąpiły ostatnio do ofensywy w dziedzinie mikromechaniki. Badacze japońscy przedstawili, na najważniejszych konferencjach z tej dziedziny w 1992 roku 21 prac, natomiast Amerykanie tylko 12. Miniaturowe czujniki i serwomotory budzą zrozumiałe zainteresowanie przemysłu japońskiego, gdyż kraj ten zajmuje czołową pozycję w elektronice użytkowej, robotyce, mikroelektronice i przemyśle samochodowym.

Rząd japoński przyznał priorytet rozwojowi technologii budowy mikrouządzeń. Ministerstwo Handlu Międzynarodowego i Przemysłu (MITI) przeznaczyło 200 milionów dolarów na dziesięcioletni program

---

<sup>110</sup> Yoshida S i Iizuka K (1990) Approaches to nanometr technology - a review of the Yoshida Nano-Mechanism Project *Nanotechnology* **1** 13-18

badawczy. Celem tego programu jest między innymi opracowanie wytwarzania serwowmotorów i czujników, które można by wykorzystać w robotach kontrolujących rurociągi oraz inteligentnych cewnikach połączonych z urządzeniami w rodzaju skalpela do mikrochirurgii. Ten projekt jest pierwszym programem MITI, w którym mogą uczestniczyć firmy amerykańskie. W jego ramach SRI International z Menlo Park w Kalifornii dostała zlecenie z MITI na wykonanie sztucznych włókien mięśni bez elektrostatycznych serwowmotorów czy elastomerów, takich jak poliuretan.

MITI prowadzi negocjacje z Texas Instruments w sprawie kontraktu dotyczącego systemów kontrolnych małych urządzeń. Firma z Dallas wykonała prawdopodobnie najlepszy prototyp systemu mikromechanicznego: strukturę złożoną z dwóch milionów mikroskopijnych metalowych zwierciadeł na krzemowym układzie scalonym. Każde ze zwierciadeł w kształcie kwadratu o boku 16 mikrometrów, może być nachylone tak, aby była sterowana ilość światła kierowanego na ekran.

Program MITI obejmuje nie tylko masową produkcję litograficzną opartą na krzemie, ale również wiele innych metod obróbki małych elementów z metalu i tworzyw sztucznych za pomocą cięcia i szlifowania każdego pojedynczego elementu. Sumitomo Electric Industries, pierwsza firma japońska stosująca technologię LIGA, wykorzysta tę technikę do produkcji małych mikrofonów ceramicznych, dla robotów sprawdzających rurociągi.

Chociaż sto różnych firm starało się włączyć w projekt MITI, udało się to jedynie, co czwartej z nich. Wiele znanych firm japońskich podchodzi do tego projektu powściągliwie, dalej jednak rozwija procesy obróbki krzemu. Niektórzy badacze japońscy głoszą, że MITI chce w ten sposób odeprzeć zarzut, iż Japonia kopiuje i komercjalizuje się badania zapoczątkowane w USA, co jest źródłem potencjalnych napięć w

stosunkach handlowych między obydwojoma krajami. MITI zaprzecza takiej sugestii.

Wielki koncern elektroniczny Hitachi, również uczestniczy w badaniach, ale jego zainteresowania nadal skupiają się na krzemie. Firma zwiększyła liczbę badaczy, zajmujących się mikromechaniką, z czterech do dziesięciu, zorganizowała odpowiednie laboratorium wysokiej czystości (clean room) i zbudowała linię produkcyjną półprzewodników na potrzeby projektu mikromechanicznego. Projekt ten jest już częściowo realizowany, ponieważ Hitachi produkuje prototypy czujników przyspieszenia, przeznaczonych dla firm samochodowych.

Kazuo Sato, kierownik laboratorium, pomaga badaczom zrozumieć niuanse zagadnienia. Co dwa tygodnie organizuje seminaria, na których kolejno referuje się ostatnio opublikowane artykuły. W odróżnieniu od działalności uniwersyteckiej ich prace są ściśle związane z możliwościami technologicznymi firmy. Na początku 1992 roku Sato przedstawił na konferencji pracę, w której opisał nowy typ mikrozaworu, pozwalający precyzyjnie dozować ilość gazu wstrzykiwanego do komory próżniowej. Jest to niezwykle ważne podczas osadzania pojedynczych warstw atomowych na podłożu półprzewodnikowym. Dzięki temu można będzie uzyskiwać struktury półprzewodnikowe wykorzystujące efekty kwantowe.

#### **5.4. USA**

Magazyn *Science* obdarzył Erica K. Drexlera tytułem "Mr. Nanotechnology". Przez całe lata Drexler wywoływał kontrowersje deklarując, że molekularna nanotechnologia może wywołać rozległą rewolucję technologiczną, umożliwiając ogromny postęp w miniaturyzacji, otrzymywaniu nowych materiałów, konstrukcji

komputerów i wytwarzaniu wielu innych urządzeń.

Eric Drexler opublikował pierwszą pracę z nanotechnologii molekularnej w 1981 roku. Ponadto, prowadził pierwszy kurs z tej dziedziny (na Uniwersytecie Stanford) oraz był organizatorem i przewodniczył dwu pierwszym konferencjom. Obecnie jest prezydentem Foresight Institute oraz kieruje badaniami w Institute for Molecular Manufacturing. Przebywając w Stanford na Wydziale Computer Science napisał podstawową w tej dziedzinie książkę pod tytułem "Nanosystemy".<sup>111</sup> Obecnie wykłada na uniwersytetach w USA, Europie i Japonii. Doktorat z nanotechnologii obronił w MIT.

Kierując Foresight Institute w Palo Alto Drexler znacznie spopularyzował problematykę nanotechnologii. Instytut wydaje cały szereg publikacji informujących o nowościach i bieżącej sytuacji w zakresie nanotechnologii. Postęp badań nad kontrolą struktury materii stale wzrasta, co zwiększa szansę wprowadzenia pomysłów Drexlera w życie. W ciągu najbliższych kilku dziesięcioleci zostanie rozstrzygnięte na ile nanotechnologia molekularna rozwinie się. W przypadku sukcesu można spodziewać się spektakularnych efektów na polu medycyny i ochrony środowiska naturalnego. Jednak mogą pojawić się zjawiska negatywne, jak próby wykorzystania nanotechnologii do celów zbrojeniowych czy trudne do przewidzenia przemiany socjalne. Instytut Foresight pracuje na rzecz przygotowania społeczeństwa do nadchodzących zmian. Na pytanie, co dalej?, Drexler odpowiada: "Postęp w nanotechnologii wydaje się być coraz szybszy. Obserwujemy zarówno stały postęp techniczny jak i coraz szerszą obecność nanotechnologii w środkach masowego przekazu. Patrząc ostrożnie w przyszłość można powiedzieć, że nanotechnologia i jej zastosowania zwracają na siebie uwagę, a czasami zajmują nawet centralną pozycję w

---

<sup>111</sup> Drexler E K (1992) *Nanosystems Molecular machinery, manufacturing and computation* (Wiley)

dyskusjach na takie tematy jak energooszczędność, biodegradowalność, efekt cieplarniany, czy medycyna, obronność, etyka lekarska lub inne. Dzisiaj tego typu tematy są podejmowane przez Instytut Foresight “.

Precyzując bieżące cele działania Instytutu, Drexler pisze: ”Dzisiejsze działania powinny zwiększyć prawdopodobieństwo pożądanego wyniku. Wielu przedstawicieli świata nauki i techniki ciągle odczuwa brak podstawowej wiedzy na temat możliwości nanotechnologii. Przedstawiciele życia publicznego potrzebują precyzyjnej informacji w celu właściwej oceny tej nowej technologii. Decydenci w rządzie i przemyśle potrzebują przewodnika, wiedzącego jak podejść do problemów pojawiających się w wyniku rozwoju nanotechnologii. Wreszcie obywatele muszą poznać dostateczną ilość faktów związanych z nanotechnologią, aby wspierać sensowne rozwiązania prawne i stworzyć większe poparcie dla inicjatyw liderów”.

Zdaniem Drexlera wyżej wspomniana organizacja ma do spełnienia następującą misję: “Polepszyć warunki ludzkiej egzystencji poprzez ochronę środowiska naturalnego, przestrzeganie praw człowieka, zapewnienie stabilnego pokoju, rozwój przestrzeni życiowej, polepszenie systemu informacji, zwiększenie stopnia edukacji, zmniejszenie zakresu ubóstwa, poprawienie opieki medycznej i wolności osobistej. Zadaniem Foresight jest wytyczenie bezpiecznej drogi rozwoju, pomimo potencjalnych zagrożeń oraz wskazanie korzyści, jakie może dać nanotechnologia. Będziemy w posiadaniu potężnych, nowych narzędzi, które mogą być użyte do osiągnięcia wspomnianych wyżej celów. Lecz jeśli zawiedziemy, jeśli popełnimy błąd na drodze tej dokonującej się rewolucji przemysłowej, przez niewłaściwą ocenę tego, co się może wydarzyć, cały postęp może zostać zaprzepaszczony. Naszą misją jest przygotowanie przyszłości dla nanotechnologii”.

“Twoja pomoc w tym dziele jest licząca się”, twierdzi Drexler



zwracając się do każdego, kto chciałby pomóc.

“Za czym jesteś?” zapytuje.

“Która z wymienionych powyżej możliwości stanie się rzeczywistością, będzie zależało w dużej mierze od tego, kto rozwinie nanotechnologię i jak to uczyni. Czy jesteś zwolennikiem rozwoju dokonywanego przez przemysłowe laboratoria lub w ramach specjalistycznych projektów militarnych? A może preferujesz otwarte, międzynarodowe programy badawcze? Czy prawo powinno chronić wartościowe zastosowania? Czy też nie? Poprzez twoją przynależność do Instytutu Foresight możesz dotrzymać kroku postępowi i tym samym wpływać na rozwój tej obiecującej technologii. Jest to ambitne zadanie, lecz dotychczasowe osiągnięcia uzasadniają nasze wysiłki”.

Instytut Foresight stara się w swej pracy wyjść naprzeciw wspomnianym wymaganiom, ponieważ muszą one być podjęte, jeśli chce się osiągnąć korzyści i zmniejszyć ryzyko, związane z rozwojem nanotechnologii. Konferencje organizowane przez Instytut cieszą się zainteresowaniem naukowców, inżynierów i szerokiej publiczności, gdyż skupiają uwagę na nowych kierunkach badań i rozwiązaniach prawnych. Publikacje tej instytucji ukazują najświeższe prace wiodących uczonych na temat znaczenia nanotechnologii dla społeczeństwa i pojedynczych ludzi. Organizacja stawia sobie cele globalne, nie ograniczone jedynie do kraju, w którym powstała. Stara się ona dostarczać jasnych, precyzyjnych informacji użytecznych w nauczaniu i kształtowaniu opinii publicznej.

Mówiąc o nanotechnologii w sensie definicji Franksa, trzeba wspomnieć jeszcze o jednym uczonym zajmującym się tymi zagadnieniami w USA, mianowicie o Henry Guckel, profesorze elektrotechniki z University of Wisconsin-Madison. Na początku lat osiemdziesiątych Guckel używał polikrystalicznego krzemu jako materiału do konstrukcji ruchomych struktur czujników.

Grupa Guckela, jako pierwsza, wykonała zespoły niklowych przekładni zębatych, o średnicy od 50 do 200  $\mu\text{m}$  i wysokości od 200 do 300  $\mu\text{m}$ , które można było łączyć w zespoły. Ostatnio Guckel zbudował mikrosilnik poruszany polem magnetycznym, jak zwykle silniki.

Głównym celem Guckela jest wytworzenie produktu rynkowego. Armia Stanów Zjednoczonych wyraziła zainteresowanie małą turbiną i generatorem, które z ruchu powietrza czerpałyby energię wystarczającą do zasilania układu scalonego. Jeszcze bardziej atrakcyjne z punktu widzenia handlowego są napędy dysków magnetycznych. W IBM Almaden Research Center w San Jose w Kalifornii powołano specjalny zespół, który prowadzi badania nad małymi serwowatorami do ustawiania głowicy dysku oraz mikrosilnikami obracającymi dysk. Firma IBM pracuje nad tym problemem wspólnie z University of Wisconsin. Guckela fascynuje 50 miliardów dolarów, które przemysł produkujący napędy dyskowe zarabia co roku.

W czasie, gdy firma Hitachi zajmowała się budowaniem nowych pomieszczeń wysokiej czystości, amerykański lider mikromechaniki opuścił "pole walki". AT&T Bell Laboratories były jedną z pierwszych dużych firm, które zainteresowały się mikromechaniką, a także jedną z pierwszych, która to zainteresowanie straciła. Naukowcy z Holmed (New Jersey) zbudowali jeden z pierwszych mikrosilników, wykonali jako pierwsi badania nad polikrystalicznym krzemem i skonstruowali "chyboczący się" silnik, w którym rotor obraca się nieregularnie w łożyskach, co zmniejsza tarcie.

Decyzja o rezygnacji AT&T z badań w zakresie mikromechaniki miała charakter polityczny. Była podyktowana chęcią zyskania popularności dzięki ograniczeniu zbyt szerokiego frontu badań naukowych. Ostatni ze specjalistów zajmujących się mikromechaniką Kaigham J. Gabriel odszedł z AT&T w 1991. Wcześniej pięciu jego kolegów zostało przesuniętych do innych badań lub odeszło z firmy. To

właśnie było przyczyną jego rezygnacji. Gabriel w połowie lat osiemdziesiątych jednoczył wysiłki wszystkich badaczy w Bell Laboratories. W rok po odejściu z AT&T Gabriel objął kierownictwo programu rządowego, a więc mógł wyznaczać kierunek rozwoju mikromechaniki. Rozpoczął pracę w Defence Advanced Research Project Agency (DARPA) i usiłował skłonić badaczy uniwersyteckich do rozwiązywania konkretnych problemów. “Dobre czasy minęły - mówi Gabriel. Ludzi nie fascynują już niepotrzebne ciekawostki”.

Program DARPA jest największym amerykańskim programem badań mikromechanicznych, chociaż jego trzyletni budżet, wynoszący 20 milionów dolarów, to niewiele w porównaniu z wydatkami Japonii czy Niemiec na ten cel. Gabriel potrafi tchnąć ducha w każdą wykonywaną przez siebie pracę, czego nie można się spodziewać po zwykłym biurokracie. Pracując w AT&T organizował liczne seminaria, aby przybliżyć pracownikom tematykę mikromechaniki i pomóc im w zrozumieniu kluczowych kwestii. Jeszcze ważniejszy był dla niego czas, który spędzał w laboratorium.

Budując mikrosilnik w Bell Labs, Gabriel zetknął się z problemem dwuwymiarowości mikroserwomotorów. Znał trudności, jakie napotymano przy próbach uzyskania użytecznej mocy z urządzeń, w których zasadnicze elementy były mniejsze niż główka szpilki. Zamiast miniaturyzować zwykle urządzenia mechaniczne, tak jak to czynił Henry Guckel, Gabriel starał się wykorzystać dwuwymiarowość mikroobróbki powierzchniowej.

Wiele z tych pomysłów zostało zrealizowanych w ciągu roku, który Gabriel spędził na stażu naukowym w Institute of Industrial Science na Uniwersytecie w Tokio. Burzliwe dyskusje z Hiroyukim Fujitą i innymi czołowymi japońskimi badaczami zajmującymi się mikromechaniką doprowadziły do powstania wielu nowych urządzeń. Były to membrany o średnicy kilkuset mikrometrów, drgające w pobliżu

powierzchni układu scalonego w kierunku do niej prostopadłym, a także rozszerzające się serwomechanizmy. Gabriel uważa, że w dziedzinie mikromechanizmów nauka nie powiedziała jeszcze ostatniego słowa. Niedawno został zaproszony do Bell Labs, aby przedstawić szczegóły programu DARPA.

Swoim poprzednim szefom zaproponował nowy program badań naukowych. Badacze, którzy przez kilka lat zajmowali się ulepszaniem technologii mikroobróbki, powinni teraz zająć się zastosowaniami mikromechanizmów, projektowaniem urządzeń lub też konstrukcją czujników. Wiele tego typu kontraktów już zawarto. Są to między innymi kontrakty na:

- (i) Superczuły czujnik przyspieszenia. Już od ośmiu lat badacze z Cornell University pracują nad udoskonaleniem skomplikowanych czujników i serwomotorów, które mogłyby precyzyjnie sterować stolikiem mikroskopu. Jeżeli to się uda, powstanie urządzenie zaopatrzone w czujniki wykrywające ruch w dowolnym kierunku, wywoływany przez bardzo małe siły - od kilku milionowych do kilku dziesiątych części siły grawitacji. Takie urządzenie może stanowić podstawę kieszonkowych systemów nawigacji.
- (ii) Urządzenie wielkości zegarka ręcznego, mierzące różne parametry, na przykład ciśnienie powietrza, jego temperaturę i wilgotność, współrzędne geograficzne oraz wykrywające obecność pewnych gazów, na przykład dwutlenku węgla. Urządzenia tego typu znajdują zastosowanie w aparatach służących do opieki medycznej, sterowania i kontroli przemysłowej oraz zdalnego monitorowania stanu środowiska naturalnego. Ten projekt jest realizowany w University of Michigan i może zapoczątkować zupełnie nową erę czujników gazu lub mikropomp, stanowiących nieodłączne elementy

układów scalonych, jakimi są obecnie tranzystory i kondensatory.

- (iii) Serwomotor budowany w Stanford University, który zapewnia ruch w kierunku prostopadłym do powierzchni układu scalonego.

W innym programie DARPA prowadzone są próby wytwarzania w jednej z fabryk w Północnej Karolinie wszystkich struktur mikromechaniki, dotychczas produkowanych w różnych ośrodkach w USA. Ma to być sprawdzian, czy dziedzina ta jest już na tyle rozwinięta, aby warto było inwestować w produkcję krótkich serii systemów mikromechanicznych i dzięki temu uzyskiwać je względnie tanio. Postęp w tej dziedzinie może nastąpić bardzo szybko, jeśli zostaną wykorzystane doświadczenia mikroelektroniki. “Nie musimy budować infrastruktury od podstaw” - mówi Gabriel.

Ostatnio<sup>112</sup> można dostrzec wzrost zainteresowania nanotechnologią na wielu amerykańskich uniwersytetach. Przykładem tego może być Rice University, który uruchomił wspólnie z drobnym biznesem amerykańskim program kształcenia studentów na potrzeby nanotechnologii.

### 5.5. Hong-Kong

Według Younga<sup>113</sup> współczesne technologie wytwarzania pociągają za sobą wzrost zapotrzebowania na nowe prace projektowe oraz inżynieryjne. Na polu tych ostatnich, można wyróżnić dwa główne kierunki rozwoju:

---

<sup>112</sup> Crenson M (1994) Novel Program III Undergraduate Nanotechnology *Science* **266** 864-5

<sup>113</sup> Young K L (1988) Precision servo systems. A vehicle towards higher-value-added manufacture *Hong Kong Engineer* **16** 35-42

- (1) automatyzację coraz ściślej zintegrowaną z techniką komputerową, prowadzącą do coraz większej wydajności produkcji, oraz
- (2) wzrost precyzji wytwarzania komponentów, od których zależy szeroka gama wyrobów o wysokim stopniu przetworzenia.

Z powyższych względów istotne znaczenie zaczynają odgrywać takie dziedziny jak mechanika ultraprecyzyjna, mikromechanika i nanotechnologia, z którymi większość wytwórców z Hong Kongu nie miała dotychczas do czynienia. Autor szkicuje współczesne procesy technologiczne prowadzące do wyrobów ultraprecyzyjnych, ważnych dla przemysłu w Hong Kongu i techniki wymagane do kontroli tych procesów.

## 6. PRZYSZŁOŚĆ NANOTECHNOLOGII

Nawet z niewielką dozą wyobraźni nietrudno przewidzieć, jakie są perspektywy rozwoju nanotechnologii, niezależnie od dziedziny jaka nas bezpośrednio interesuje.<sup>114</sup> Opisane poniżej dwa przykłady ilustrują, w jaki sposób może przebiegać postęp zarówno w dziedzinie nowych zastosowań znanych technologii jak i w rozwoju nowych.

### 6.1. Elektronika molekularna

Litografia i technologia cienkich warstw są kluczowymi technikami, które umożliwiają kontynuację zmniejszania rozmiarów obwodów scalonych, w celu zwiększenia zarówno stopnia upakowania jak i szybkości operacji. Miniaturyzacja została osiągnięta przez

---

<sup>114</sup> Taniguchi N (1992) Expected development of nanotechnology-super nanotechnology *J. Japan Soc. Prec. Eng.* **58** 238-40

konstruowanie coraz mniejszych urządzeń od makro- do mikroskopowych. Poprzez prostą ekstrapolację można oszacować, że w ciągu dwudziestu lat pojedynczy układ przełączający może być sprowadzony do wymiarów molekularnych. Wpływ biologii molekularnej i inżynierii genetycznej może stymulować prace nad budową "biochipów" i biokomputerów (BCCs), wychodząc od pojedynczych molekuł pełniących funkcje pojedynczego przyrządu elektronicznego (MED) poprzez ich zgrupowanie metodami biotechnologii. Enzymatyczne reakcje replikacji DNA, transkrypcja i translacja w systemach biologicznych wydają się być najbardziej naturalnym podejściem do elementów liczących. Ilość energii zużywanej na jedną prostą operację w omawianych systemach jest rzędu 10 - 100 kT, co należy porównywać z energią rzędu  $10^{10}$  kT, zużywaną na analogiczną operację w komputerach najnowszej generacji. Problem wydzielanego ciepła, postawi granicę mikrominiaturyzacji komputerów, wytwarzanych według obecnie stosowanych technologii.<sup>115,116</sup>

Jak na razie nie pokonano jeszcze zasadniczych trudności stojących na przeszkodzie praktycznej produkcji urządzeń tą drogą. Pewne rozwiązania, jakie sugerowano<sup>117</sup>, to wytwarzanie molekularnych przewodników z poliazotku siarki (-(NSNS)-, których łańcuch byłby formowany na podłożu krzemowym) lub formowanie trójwymiarowych struktur, drogą epitaksjalnego osadzania molekuł na podłożu zbudowanym z aminokwasów o dowolnej, wymaganej sekwencji. Obie techniki mogą być łączone w taki sposób, że w serii reakcji przewodzące molekularne przewodniki byłyby wbudowane w pewnym obszarze, podczas gdy w innym dodawano by izolatory. Następnie wbudowywano

---

<sup>115</sup> Bennett C H (1982) Thermodynamics of computation - a review *Int. J. Theor. Phys.* **21** 905-40

<sup>116</sup> Feynman R P (1985) Quantum mechanical computing *Opt. News* **11** (2) 11-20

<sup>117</sup> Carter F L (1983) Molecular level fabrication techniques and molecular electronic devices *J. Vac. Sci. Technol. B* **1** 959-68

by funkcje sterowania oraz przełączające a sąsiednie komponenty łączono by ze sobą, formując stałe zespoły aktywnych i pasywnych elementów. Carter przedyskutował trzy możliwe drogi wytwarzania adresowalnych elementów przełączających. Jedną z nich jest uzyskanie elementu przełączającego opartego na efekcie tunelowania elektronu, kiedy to przełączanie następuje poprzez zmianę wysokości bariery potencjału w cyjaninie, za pomocą wejściowego sygnału optycznego lub ruchu solitonu.

Koncepcja wytwarzania elementów elektronicznych, poczynając od najprostszych elementów funkcjonalnych poprzez ich łączenie w większe układy funkcjonalne, ma zasięg interdyscyplinarny i obejmuje fizykę, chemię, elektrotechnikę i biologię.<sup>118</sup> Pierwsza konferencja poświęcona tej problematyce wykazała pewien entuzjazm wśród uczestników.<sup>119</sup> Jednakże podstawowe trudności muszą zostać przezwyciężone, zanim tego typu technologie znajdą zastosowania. Niektóre z tych trudności zostały przedyskutowane przez Haddona i Lamolę<sup>120</sup> i są skrótowo omówione poniżej:

- (i) Istnieje niewielka strukturalna analogia pomiędzy systemami biologicznymi takimi jak mózg, a dzisiejszymi komputerami. Wydaje się jasnym, że mózg wykorzystuje ścieżki przewodzące, w których aktywnymi elementami są jony i cząsteczki. Z tego względu realizacja jednego cyklu (taktu) w mózgu jest bardzo powolna (szybkość propagacji sygnału jest rzędu  $25 \text{ ms}^{-1}$ ). Zdolność układu nerwowego do szybkiego przetwarzania jest zwykle przypisywana architekturze równoległej. Ponieważ nasza znajomość molekularnych

---

<sup>118</sup> Je Y T i Companion A L (1992) On the cobalt (111) surface as template for hydrocarbon chain formation in Fischer-Tropsch synthesis *Surf. Sci.* **271** (1-2) L345-9

<sup>119</sup> Carter F L (1982) *Molecular Electronic Devices* (New York: Dekker)

<sup>120</sup> Haddon R C i Lamola A A (1985) The molecular electronic device and the biochip computer: present status *Proc. Natl. Acad. Sci.* **82** 1874-8



podstaw działania układu nerwowego, takich jak myślenie praktycznie nie istnieje, nie mamy idei przewodniej dla konstrukcji biokomputera.

- (ii) Neuron jest bardziej skomplikowany niż układ elektroniczny komputera. Przełączenie wywołuje zmiany w cząsteczkach białek lub ich syntezę za pomocą skomplikowanych mechanizmów, które nie są całkowicie poznane.
- (iii) Nawet gdyby to było możliwe, jest mało prawdopodobne, aby posiadające dużą masę jony i cząsteczki mogły pełnić rolę nośników w komputerze biologicznym (BCC). Polipeptydy cechują się szerokim pasmem wzbronionym, charakterystycznym dla izolatorów i z tego powodu istnieje mało przykładów na wykorzystywanie transportu elektronów w układach biologicznych.
- (iv) W miarę jak gęstość upakowania rośnie, występują coraz większe problemy z połączeniami i adresowaniem pojedynczych elementów oraz z zapobieganiem przesłuchom (cross-talk). Tego rodzaju oddziaływania zachodzą poprzez tunelowanie i jeżeli urządzenie jest elektroniczne z natury, to raczej wzajemna bliskość jego elementów składowych a nie ich wymiary stanowi granicę miniaturyzacji.

Postęp technologiczny w chemii, biochemii i mikromanipulacji zwraca uwagę naukowców na nowe możliwości budowy złożonych struktur cząsteczkowych, a w tym molekularnych mechanizmów i urządzeń elektronicznych.<sup>121</sup> Elektroniczne komputery molekularne powinny być łatwiejsze do zbudowania i analizy. Ich możliwości wskazują dolną granicę możliwości przyszłych systemów superkomputerowych opartych o nanotechnologię.

---

<sup>121</sup> Drexler K E (1988) Nanotechnology and future supercomputing *ICS 88 Third International Conference on Supercomputing* St. Petersburg FL, USA 512-16

Na czoło wysunęła się koncepcja konstruowania elektroniki molekularnej, wychodząc z makroskali. Jednym z obiecujących podejść, jest technologia warstw Langmuira-Blodgetta (LB).<sup>122</sup> Wielowarstwowa struktura (LB) składa się z sekwencji organicznych warstw monocząsteczkowych, wytwarzanych przez powtarzalne zanurzenie podłoża do naczynia zawierającego warstwę materiału, pływającą na powierzchni cieczy (najczęściej wody). Za każdym cyklem nakładana jest jedna warstwa. Klasycznym materiałem do wytwarzania takich warstw są kwasy tłuszczowe takie jak kwas stearynowy i jego sole. Rok 1950 był pierwszym, w którym zastosowano warstwy LB w pomiarach spektroskopowych i dyfraktometrycznych, w zakresie promieniowania X.<sup>123,124</sup> Ważną właściwością warstw była ich jednolita grubość każdej warstwy to znaczy monomolekularna. Warstwy o grubości od 5 do 15 nm uzyskiwano poprzez zmianę składu osadzanego materiału. Stosy zbudowane z pięćdziesięciu lub więcej warstw były formowane na płaskich lub niepłaskich podłożach. Można więc było tą metodą uzyskiwać siatki dyfrakcyjne dla promieniowania X, wykorzystywane między innymi w odpowiednich analizatorach.

Technologię tą ponownie zastosowano dziesięć lat później, kiedy zauważono potencjalne możliwości wykorzystania jej w elektronice. Problem ten opisał Roberts<sup>125</sup> w swoim przeglądowym artykule, którego treść jest skrótowo podana poniżej.

Jednym z aspektów prac w tej dziedzinie było otrzymywanie warstw z materiałów bardziej stabilnych niż kwasy tłuszczowe, które

---

<sup>122</sup> Blodgett K B (1935) Films built by depositing monomolecular layers on a solid surface *J. Am. Chem. Soc.* **57** 1007-22

<sup>123</sup> Henke B L (1964) X-ray fluorescence analysis for sodium, fluorine, oxygen, nitrogen, carbon and boron *Adv. X-ray Anal.* **7** 460-88 (New York: Plenum)

<sup>124</sup> Henke B L (1965) Some notes on ultrasoft x-ray fluorescence analysis - 10 to 100 Å region *Adv. X-ray Anal.* **8** 269-84 (New York: Plenum)

<sup>125</sup> Roberts G G (1985) An applied science perspective of Langmuir-Blodgett films *Adv. Phys.* **34** 475-512

topnieją w temperaturze około 70°C oraz zawierających interkalowane cząsteczki, w celu zapewnienia produktom specyficznych właściwości.

Cztery dziedziny, w których technologia LB odgrywa ważną rolę, to optyka nieliniowa, elektronika, kwantowo-mechaniczne tunelowanie i sensoryka. Są one omówione poniżej.

- (i) W wysokim stopniu nieliniowe parametry wynikające z unikalnej architektury molekularnej warstw mogą być wykorzystane w optoelektronice, elektroakustyce oraz w konstrukcji detektorów promieniowania dla zakresu podczerwieni.
- (ii) W urządzeniach elektronicznych wysokiej jakości, wysoki stopień integracji wymaga cienkich warstw oporowych o niskiej liczbie defektów. Warstwy LB spełniają te wymagania w kategoriach wysokiej rozdzielczości i czułości: rozdzielczość lepszą niż 10 nm stwierdzono w przypadku wielowarstwowych soli kwasów tłuszczowych.<sup>126</sup> Dalsze prace winny być ukierunkowane na poprawę ich odporności na uszkodzenia mechaniczne i obniżenie ilości defektów. Warstwy LB znalazły zastosowanie między innymi jako materiały izolacyjne lub pasywujące półprzewodników złożonych, na przykład otrzymanych na bazie GaAs.
- (iii) Ponieważ grubość warstw LB może być kontrolowana aż do poziomu molekularnego, wydają się one być obiecujące jako materiały izolujące w urządzeniach wykorzystujących zjawisko tunelowania kwantowo-mechanicznego. W ogniwach fotowoltaicznych przykładowo, zastosowanie

---

<sup>126</sup> Broers A N i Pomerantz M (1983) Rapid writing of fine lines in Langmuir-Blodgett films using electron beams *Thin Solid Films* **99** 323-9

warstw LB zwiększa sprawność urządzeń o 50%.<sup>127</sup> Zastosowanie tego typu warstw powinno rozszerzyć zakres lub poprawić sprawność rządzeń przełączających, tranzystorów oraz urządzeń iniekcyjnych.

- (iv) Warstwy LB znalazły zastosowanie w czujnikach do określania temperatury lub rodzaju gazu, gdzie wykorzystano efekty polowe.

Istnieją związki organiczne zmieniające budowę pod wpływem zmian temperatury, ciśnienia czy otoczenia chemicznego, a wywołane zmiany można wykorzystać w celu modulacji prądu pomiędzy źródłem a drenem urządzenia.<sup>128</sup> Zaletą warstw LB stosowanych do tego celu jest to, że ich objętość jest mała i dlatego, przy ich stosowaniu szybkość działania urządzenia rośnie.

W elektronicznych biosensorach wyjściowy sygnał elektryczny jest zależny od stężenia, a ściślej aktywności substancji chemicznej lub biochemicznej. Sensor jest układem posiadającym zdolność rozpoznawania molekuł. Enzymy i przeciwciała są przykładami złożonych makromolekuł zdolnych do "rozpoznawania" określonych cząsteczek i z tego względu są rozpatrywane jako składniki biosensorów.<sup>129</sup> Zarówno pierwsze jak i drugie są białkami i posiadają zdolność do specyficznego wiązania na swej powierzchni określonych cząsteczek. Takie wiązanie zachodzi na drodze reakcji, która może być śledzona. Przykładowo, jeżeli enzym znajduje się w roztworze, reakcja może zmienić jego pH, co jest mierzalne za pomocą czułego na pH tranzystora CHEMFET (jest to konstrukcja przypominająca tranzystor

---

<sup>127</sup> Roberts G G i współpracownicy (1981) Photovoltaic properties of cadmium-telluride/Langmuir-film solar cells *Proc. IEE Part I* **128** 197-201

<sup>128</sup> Kaszyfski P, Michl J (199?) Staffanes: a molecular size "Tinkertoy" construction set for nanotechnology. Preparation of end-functionalized telomers and polymer of [1.1.1] propellane *J. Am. Chem. Soc.* **110** 5225-6

<sup>129</sup> Marshman C E (1986) Electronic biosensors *Phys. Bull.* **37** 296-9

MOSFET pozbawiony elektrody bramki). Podobnie jak w sensorach fizycznych, cienka warstwa izolatora działa jako bariera pomiędzy półprzewodnikiem i otoczeniem. Działanie polega na absorpcji protonów z roztworu na warstewce izolatora, co wywołuje jej dodatnią polaryzację, która moduluje prąd płynący pomiędzy źródłem a drenem. Warstwa LB nie spełnia w procesie żadnej znaczącej roli, lecz ze względu na jej małą objętość zapewnia wysoką czułość oraz szybką odpowiedź przynajmniej w przypadku, gdy biomolekuły są wbudowane w warstwę i kontaktują się z półprzewodnikiem.

Goepel opublikował pracę przeglądową na temat sensorów chemicznych oraz ich znaczenia w elektronice molekularnej i nanotechnologii.<sup>130</sup>

Inną koncepcją jest użycie pojedynczych lub podwójnych nici kwasów nukleinowych DNA lub RNA do konstrukcji sieci połączeń urządzeń elektronicznych. Sieć mogłaby być użyta bezpośrednio jako ścieżka przewodząca poprzez wykorzystanie właściwości kompleksujących względem jonów metali, interkalatów lub protein), jako szkielet dla ścieżek wytwarzanych z innych materiałów lub jako maska do wytwarzania urządzeń z użyciem technik fotolitograficznych.<sup>131, 132</sup>

Rozpoznawanie molekuł przez sensory chemiczne może być osiągnięte poprzez specyficzne oddziaływania typu "klucz-zamek", występowanie, których znane jest z badań nad układami biologicznymi w naturze oraz sztucznie wytworzonymi. Aby uzyskać specyficzną detekcję molekuł lub jonów, wymagane jest dokładne poznanie

---

<sup>130</sup> Goepel W (1991) Chemical sensing, molecular electronics and nanotechnology: interface technologies down to the molecular scale *Sens. Actuators, B*, **B4** (1-2) 7-21

<sup>131</sup> Hollenberg C P i Di Mauro E (1989,1991) The use of DNA and DNA technology for the construction of networks for use in chip construction and production (DNA chips) *Ger Offen*.

<sup>132</sup> Douglas K i współpracownicy (1992) Transfer of biologically derived nanometer-scale patterns to smooth substrates *Science* **257** 642-4

procesów zachodzących na powierzchni oddziaływania molekuly lub jonu z układem rozpoznającym. Pod tym względem, wiedza dotycząca układów organicznych jest znacznie bardziej zaawansowana. Badania i rozwój skupiają się obecnie na problemach związanych z właściwym doбором materiałów pod względem możliwości mikrofabrykacji.

## 6.2. Inżynieria skaningowa efektu tunelowego

W paragrafie pierwszym tego przeglądu zostało powiedziane, że takie techniki obserwacyjne jak mikroskopia nie wchodzi w zakres zainteresowań nanotechnologii. Jednakże obecnie staje się oczywiste, że mikroskopia skaningowa wykorzystująca efekt tunelowy (STM) może dać podstawy nowej technologii, którą można nazwać inżynierią skaningowego efektu tunelowego.

W mikroskopie STM<sup>133,134</sup> ostrze sondy przesuwane jest w nanometrowej odległości od badanej powierzchni. Niewielka różnica potencjałów pomiędzy próbką a sondą wywołuje przepływ prądu przez cienką warstwę nieprzewodzącego medium (na przykład powietrze, próżnia, warstwa tlenkowa).<sup>135</sup> Jest to prąd tunelowanych elektronów, który zależy w sposób wykładniczy od odległości pomiędzy próbką a ostrzem sondy. Jeżeli próbka jest skanowana równoległe do powierzchni a prąd tunelowania utrzymywany na stałym poziomie poprzez zmiany odległości sondy w taki sposób, że prąd jest stały, wówczas przesunięcia sondy są dokładną reprezentacją topografii próbki.

Mikroskopia wykorzystująca efekt tunelowy jest przykładem znacznego postępu, jaki dokonał się w dziedzinie pomiaru gładkości

---

<sup>133</sup> Binning G i Rohrer H (1985) The scanning tunneling microscope *ISci. Am.* **253** 40-6

<sup>134</sup> Binning G i Rohrer H (1986) Scanning tunneling microscopy *IBM J. Res. Dev.* **30** 355-69

<sup>135</sup> Behm R J i współpracownicy (1990) Scanning tunneling microscopy and related methods *Kluwer Academic Publishers Dordrecht, Boston, London*

powierzchni w ostatnich latach. Otworzyły się dzięki niej nowe drogi budowy podzespołów o niewielkich rozmiarach. Baro<sup>136</sup> przedyskutował możliwe zastosowania tej techniki na polu mechanicznej obróbki powierzchni, mikroelektroniki oraz inżynierii materiałowej. W przyszłości przewiduje on zastosowanie jej w nanolitografii.<sup>137</sup>

W związku z zastosowaniami, które będą dyskutowane ważne jest podkreślenie, że tą metodą można odróżnić nawet pojedyncze atomy, ponieważ ostrza sondy STM mogą być tak małe jak pojedyncze atomy.<sup>138</sup>

Tersoff<sup>139</sup> poddał analizie zjawisko tunelowania w kierunku sferycznego metalowego ostrza. Stwierdził on, że odwzorowanie metodą STM powierzchni metali odpowiada konturowi o stałej lokalnej gęstości stanów elektronowych. Jednakże w przypadku półmetali lub półprzewodników, odwzorowanie jest bardziej złożoną funkcją gęstości stanów.

Przesunięcia sondy z dokładnością nanometrową realizuje się za pomocą piezoelektrycznych pozycjometrów.

Ważnym rozszerzeniem możliwości technologii STM okazało się odkrycie różnych możliwości modyfikacji powierzchni próbki za pomocą sondy.

Sonda mikroskopu STM może być użyta do wytwarzania dokładnych wzorów o nanometrowej strukturze, co otwiera nową drogę dla litografii o nanometrowej rozdzielczości.<sup>140,141</sup> Zasada działania

---

<sup>136</sup> Baro A M (1988) Tunnel-effect microscopy *Metalurgia y Electricidad* **52** 41-4

<sup>137</sup> Schneiker C (1988) Nanotechnology with Feynman machines: scanning tunneling engineering and artificial life *SFI Studies in the Sciences Complexity*, Edited by Langton C Addison-Wesley Publishing Company

<sup>138</sup> Fink H-W (1986) Mono-atomic tips for scanning tunneling microscopy *IBM J. Res. Dev.* **30** 460-5

<sup>139</sup> Tersoff J (1990) Role of tip electronic structure in scanning tunneling microscope images *Phys. Rev. B* **42** 1235-8

<sup>140</sup> Ringger M i współpracownicy (1985) Nanometer lithography with the scanning tunneling microscope *Appl. Phys. Lett.* **46** 832-4

urządzenia nie jest do końca poznana, choć można sądzić, że pod wpływem ostrza sondy na podłożu powstaje przewodząca nitka węgla wskutek katalizowanego przez wolfram rozkładu warstwy węglowodoru. Poprzez ekstrapolację wyników eksperymentów autorzy ocenili możliwość osadzania cienkich przewodzących linii na warstwie izolatora. Ostrze sondy powinno być umieszczone w gazowym środowisku zawierającym atomy metalu w takiej formie, aby były one uwolnione od ligandów lub generowane jako wolne rodniki w pobliżu jej ostrza, któremu nadano odpowiedni potencjał.

Bardziej subtelna modyfikacja powierzchni została opisana przez Beckera i współpracowników.<sup>142</sup> Zastosowali oni STM do badania powierzchni germanu, a poprzez zmianę potencjału ostrza od normalnej wartości STM 1V do 4V wytworzyli rysę o szerokości 0.8 nm i wysokości około 0.1 nm, na powierzchni o pierwotnie atomowej gładkości (to znaczy takiej, na której pofalowanie ma amplitudę około 0.015 nm). Mechanizm procesu nie jest jasny. Możliwa do przyjęcia interpretacja zakłada transport materii z ostrza sondy lub rekonfigurację atomów na powierzchni pod działaniem wysokiego pola elektrycznego. Pierwszy z procesów wydaje się być bardziej prawdopodobny, gdyż może on być powtarzany, gdy ostrze poddane zostanie "rozładowaniu" poprzez kontakt z sąsiednim obszarem germanu.

Kilka innych podejść do problemu modyfikacji powierzchni zostało również opisanych w literaturze.<sup>143,144,145</sup>

- 
- <sup>141</sup> Lershin A M, Sumetskii M Yu (1991) Potential relief induced by metallic nanoelements in a thin semiconductor film *Soviet Technical Physics Letters* **17** 335-6
- <sup>142</sup> Becker R S i współpracownicy (1987) Atomic-scale surface modifications using a tunneling microscope *Nature* **325** 419-21
- <sup>143</sup> McCord M A i Pease R F W (1986) Lithography with the scanning tunneling microscope *J. Vac. Sci. Technol.* **B4** 86-8
- <sup>144</sup> Abraham D W i współpracownicy (1986) Surface modification with the scanning tunneling microscope *IBM J. Res. Dev.* **30** 492-9
- <sup>145</sup> Ringger M i współpracownicy (1986) STM activity at the University of Basel *IBM J. Res. Dev.* **30** 500-8



Jednym z nich jest litografia nanometrowej rozdzielczości, bazująca na transformacjach chemicznych, inicjowanych ostrzem sondy. Dołki o średnicy 1 nm i większe, otrzymano poprzez modyfikację struktury powierzchni. Wzgórki o średnicy 20 nm i wysokości 2 nm zostały wytworzone w odpowiednich warunkach elektrycznych, poprzez transport materiału zdeponowanego na ostrzu. Zanotowano przy tym zniszczenia powierzchni w skali atomowej przez siły elektrostatyczne, jeśli potencjał ostrza przekraczał wartość krytyczną.

Dogata<sup>146</sup> i współpracownicy pokazali jak praktycznie generować wzory w skali nanometrowej, na wstępnie spasywowanej powierzchni półprzewodników za pomocą mikroskopu skaningowego efektu tunelowego (STM). Powierzchnia krzemu pasywowana była wodorem, a powierzchnia arsenku galu siarką.

Gomer<sup>147</sup> przeprowadził rozważania teoretyczne mechanizmów procesów, które mogą wystąpić podczas nagłego transferu atomu z ostrza lub na ostrze. Stwierdza on, że termiczna desorpcja jest prawdopodobnym mechanizmem, który może być wzmacniany polem elektrycznym. Bezpośrednie przeniesienie atomu bez udziału tunelowania jest również możliwe przy odległościach poniżej 0.02 nm. Taki mechanizm jest również możliwy, gdy powierzchnię od ostrza dzieli odległość 0.2-0.4 nm, a są one w quasi-kontakcie za pośrednictwem zaadsorbowanych lub sterzących ponad powierzchnią atomów. Wyżej wymienione prace eksperymentalne i teoretyczne ukazują możliwości modyfikacji powierzchni na poziomie atomowym, w kontrolowany sposób i we wskazanym miejscu. Jest warto odnotowania, że przewidywania teoretyczne w pełni się sprawdziły.

---

<sup>146</sup> Dogata J A i współpracownicy (1991) Pattern generation on semiconductor surfaces by a scanning tunneling microscope operating in air *J. Vac. Sci. Technol.*, **B9** 1384-8

<sup>147</sup> Gomer R (1986) Possible mechanisms of atom transfer in scanning tunneling microscopy *IBM J. Res. Dev.* **30** 428-30

Wzory nanometrowych wymiarów na powierzchni metali można dziś uzyskiwać w powietrzu za pomocą mikroskopu skaningowego efektu tunelowego. Przyrząd posiada obecnie dostateczną stabilność, aby pod kontrolą komputera rejestrować i analizować ważne dla obróbki sygnały. Wyniki te uzyskano stosując różne materiały podłoża oraz odpowiednio do nich dobrane materiały ostrza sondy. Powierzchnia obrabiana może być analizowana w sposób ilościowy przed i po obróbce. Kontrola natężenia pola elektrycznego pomiędzy ostrzem a próbką pozwala na usuwanie z powierzchni pojedynczych atomów w optymalny sposób.<sup>148</sup> W niedalekim horyzoncie czasowym można spodziewać się konstrukcji pamięci o wielkiej gęstości upakowania, które mogłyby być zapisywane i odczytywane przez urządzenie pracujące na zasadzie STM. Opracowano nowe technologie trawienia i osadzania metali w obszarze sub-mikronowym z użyciem roztworów elektrolitów.<sup>149</sup> Potwierdzono możliwość trawienia spiętrzeń i grzbietów o rozmiarach mniejszych niż 300 nm na powierzchni GaAs. Podobnie zademonstrowano submikronową metalizację kropek i linii o rozmiarach mniejszych niż 100 nm szerokości, poprzez bezpośrednie zapisywanie elektrolityczne, z użyciem ostrej igły STM-u. Oba procesy wydają się być obiecujące dla realizacji i dalszego udoskonalenia urządzeń mezoskopowych.

Ważnym udoskonaleniem, które może mieć znaczne implikacje w przyszłości, jest zmiana konstrukcji mechanizmu skanowania ostrzem STM. Zamiast mocowania ostrza do piezoelektrycznego elementu pozycyjnego, który przesuwają ostrze sondy tylko w jednym kierunku, jest ono przytwierdzone do piezoelektrycznej rurki, której koniec może być przemieszczany w dowolnym kierunku poprzez przyłożenie

---

<sup>148</sup> Wetsel G C Jr, McBride SE (1991) Stable nanometer-scale patterns produced by high electric fields *AIP Conference Proceedings* **241** 467-79 Scanned Probe Microscopy - STM and Beyond Conference Santa Barbara CA USA

<sup>149</sup> Grub A i współpracownicy (1991) Electrolytic processes for etching and metal deposition towards nanometre quantum structures *Electronic Letters* **27** 306-7

odpowiedniego napięcia do trzech zespołów elektrod w nią wbudowanych.<sup>150</sup> Przemieszczenia skanera przypominają wówczas ruchy palca. Możemy wtedy kombinować precyzyjną zdolność przemieszczeń i możliwości modyfikacji powierzchni w sposób kontrolowany, na poziomie atomowym. Takie rozwiązania zbliżają nas do momentu realizacji koncepcji budowy urządzeń mechanicznych w skali atomowej, którą prawdopodobnie po raz pierwszy sformułował Feynman.<sup>151</sup> Zaproponował on użycie precyzyjnych maszyn do wyrobu mniejszych urządzeń, które następnie byłyby użyte do wyrobu jeszcze mniejszych, itd., aż do osiągnięcia poziomu atomowego. Maszyny te powinny być sterowane komputerowo w skali nanometrowej, z użyciem mikroskopii elektronowej wysokiej rozdzielczości, w celu obserwacji i kontroli procesu. Technologia STM pozwala obejść tę skomplikowaną koncepcję pozostawiając zalety jej potencjalnej aplikacji. Zalety te były dyskutowane przez Feynmana i kolejnych autorów, a następnie temat ten został rozwinięty i streszczony przez Hameroffa i Schneikera.<sup>152,153</sup> Koncepcja ta była nadal rozwijana np. przez Hanna.<sup>154</sup> Analizował on możliwe zastosowania mikrorobotów do montażu i inspekcji urządzeń w przestrzeni kosmicznej. Analizował on możliwości wytwarzania mikromotorów napędzanych energią elektrostatyczną lub uzyskiwaną przez utlenienie glukozy. Mikroroboty te mogłyby być także użyte do utrzymywania w ruchu i wymiany urządzeń w przestrzeni kosmicznej także w trakcie badania powierzchni planet. Mikroroboty odznaczają się

---

<sup>150</sup> Binning G i Smith D P E (1986) Single-tube three-dimensional scanner for scanning tunneling microscopy *Rev. Sci. Instrum.* **57** 1688-9

<sup>151</sup> Feynman R P (1960) There's plenty of room at the bottom *Eng. and Sci.* **23** (2) 22-36

<sup>152</sup> Hameroff S R i Schneiker C (1987) *Ultimate Computing: Biomolecular Consciousness and Nanotechnology* (Amsterdam: Elsevier)

<sup>153</sup> Hameroff S R i współpracownicy (1987) Scanning tunneling microscopy (STM) applications to molecular electronics *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE* vol. 2 Edited by: Harris G i Walker C

<sup>154</sup> Hanna J C (1992) Micro and nanotechnologies *Systems* **10** 35-7

większą precyzją pracy i mniejszą wagą w stosunku do człowieka, a w stanie “uśpionym” nie wymagają zasilania.

Podjęto już pierwsze kroki w zapisywaniu i czytaniu informacji zapisanej w skali atomowej i jeśli technologia ta da się w pełni wdrożyć, wówczas doprowadzić może do konstrukcji komputerów o niespotykanej dotąd mocy i szybkości działania. Inżynieria skaningowego efektu tunelowego może znakomicie nadawać się do wytwarzania miniaturowych połączeń pomiędzy ultradrobными elementami obwodów oraz do ich reperacji. Byłoby interesujące prowadzenie doświadczeń w dziedzinie chemii kwantowej i biologii molekularnej, w których następuje fizyczne przenoszenie atomów, molekuł czy enzymów z ostrza sondy na podłoże. Na konferencji poświęconej technice STM w 1991 roku, tematyka ta była szczególnie szeroko reprezentowana. White podał wiele możliwości zastosowania mikrochemicznych sensorów i manipulatorów dla usprawnienia techniki mikroskopii skaningowej. Mikromechaniczne struktury są wytwarzane dzisiaj technikami stosowanymi początkowo w wytwarzaniu obwodów o wysokim stopniu integracji. Te mikrouządzenia mogą być sterowane elektrycznie i wykonywać ruchy liniowe i obrotowe. Można je użyć do transportu mikroilości ciał stałych, cieczy lub substancji pochodzenia biologicznego, a także do pomiaru takich wielkości jak przesunięcie, prędkość, przyspieszenie, stężenie par lub gęstość, czy lepkość cieczy.<sup>155</sup>

Koncepcja palco-podobnej sondy jest atrakcyjna, dlatego, że kilka miniaturowych sond może być zestawionych razem w celu zgodnego działania i manipulacji materiałem w kontrolowany sposób. Sondy byłyby używane zarówno jako mikroskop, STM jak i jako manipulatory. Ekstrapolując dalej, może być możliwa produkcja, technologiami VLSI,

---

<sup>155</sup> White R M (1991) Possible applications of micromechanics to scanned nanoprobe *AIP Conference Proceedings* **241** 443-58 Scanned Probe Microscopy - STM and Beyond Conference Santa Barbara CA USA

setek lub tysięcy miniaturowych sond na pojedynczej płycie.

### 6.3. Chemia supramolekularna

Chemia supramolekularna jest bardzo młodą dziedziną. Jej zasadniczą bazę tworzą postęp w dziedzinie chemii eterów koronowych i kryptandów oraz badania nad samoorganizacją molekuł (np. membrany, micelle, półprzewodniki oraz przewodniki organiczne).<sup>156</sup> W taki sam sposób jak kombinacje atomów tworzą molekuly, kombinacje składników molekularnych prowadzą do układów supramolekularnych (supramolekuł). Bieżąca literatura jasno pokazuje, że badania w chemii gwałtownie przeorientowują się w kierunku układów supramolekularnych. Istnieją conajmniej cztery powody uzasadniające tę tendencję:

- (i) wysoki stopień rozwoju chemii molekularnej
- (ii) wielki postęp metod syntezy
- (iii) stałe poszukiwanie nowych zjawisk chemicznych
- (iv) potrzeba wypełnienia luki pomiędzy chemią i biologią

Nagroda Nobla z chemii przyznana w 1987 C. J. Pedersenowi, D. J. Cramowi i J. M. Lehnou "for their development and use of molecules with structure-specific interactions of high selectivity" była nowym impulsem dla badań w dziedzinie chemii supramolekularnej.<sup>157,158</sup>

Samoorganizacja molekuł w większe nanostruktury bazuje na oddziaływaniach pomiędzy związkami organicznymi lub biomolekułami. Tamulis i współpracownicy usiłują wykryć reguły wyboru dla tych

---

<sup>156</sup> Vogtle F (1991) *Supramolecular chemistry* (John Wiley & Sons)

<sup>157</sup> Balzani V i Scandola F (1991) *Supramolekular photochemistry* (Ellis Horwood)

<sup>158</sup> Canceill J i współpracownicy (1993) *Supramolecular Chemistry I - Directed Synthesis and Molecular Recognition* Edited by: Weber E Springer Berlin

oddziaływań w celu przewidywania symetrii i topologii agregatów.<sup>159</sup>

W ostatnim czasie opracowano wiele wartościowych technik kontroli pozycji i prędkości obojętnych elektrycznie cząstek. Jako przykłady nowych możliwości wynikających z użycia laserów do konstrukcji różnych pułapek, Steven Chu<sup>160</sup> podaje: ochładzanie atomów do temperatury poniżej  $3 \cdot 10^{-6}$  K lub możliwość dziesięciokrotnego poprawienia dokładności zegarów atomowych. Obiekt tak mały jak bakteria, może być tą techniką utrzymywany w polu widzenia mikroskopu optycznego z możliwością manipulowania organellami w jej wnętrzu, bez uszkodzania ściany komórkowej. Pojedyncze makromolekuły DNA mogą być tym sposobem wydzielone z bakterii, w roztworze wodnym, za pomocą pułapek optycznych. Te nowe możliwości mogą być w najbliższym czasie zastosowane do rozstrzygnięcia całego szeregu problemów naukowych tak różnych jak, precyzyjne pomiary podstawowych symetrii w fizyce czy też badań biochemicznych nad pojedynczymi molekułami.

#### 6.4. Realizacja sieci neuronowych

Perspektywy nanotechnologii są bardzo często analizowane przez przedstawicieli innych dyscyplin. Między innymi Schempp<sup>161</sup> wykazał, w sposób ścisły matematycznie, nowe możliwości zastosowań tej technologii w realizacji sieci neuronowych opartych o foniczne synapsy.

---

<sup>159</sup> Tamulis A i współpracownicy (1990) Selection rules for self-formation in the molecular nanotechnology *Macromol. Chem., Macromol. Symp.*, (Eur. Conf. Organ. Org. Thin Films) **46** 181-5

<sup>160</sup> Chu S (1991) Laser manipulation of atoms and particles *Science* **253** 861-8

<sup>161</sup> Schempp W (1992) Bohr's indeterminacy principle in quantum holography, adaptive neural networks, cortical self-organization, molecular computers, magnetic resonance imaging, and solitonic nanotechnology *Proc. of the SPIE - The International Soc. for Optical Engineering* **1658** 297-343

Integracja badań nad sztuczną inteligencją, bioniką, inżynierią genetyczną, nanotechnologią i telekomunikacją może doprowadzić zdaniem J. C. Glenna<sup>162</sup> do wytworzenia zupełnie nowej sytuacji w dziedzinie wykorzystania ludzkiej wiedzy w technologii. Ta przyszła era zwana “Conscious Technology” może być scharakteryzowana jako okres celowego działania na rzecz integracji technologii z pozostałą wiedzą ludzką.

## 6.5 Kropki kwantowe

Inżynieria półprzewodników o niewielu wymiarach (poniżej trzech) została zapoczątkowana we wczesnych latach siedemdziesiątych, gdy grupy badawcze z AT&T Bell Laboratories i IBM uzyskały pierwsze dwuwymiarowe “studnie kwantowe”.<sup>163</sup>

Struktury te wykonywane są przy użyciu technik epitaksjalnych, w których półprzewodnik rośnie warstwowo: jedna warstwa atomowa po drugiej. Studnie kwantowe stały się obecnie czymś całkiem zwyczajnym, znajdują się w diodach laserowych, stosowanych w odtwarzaczach płyt kompaktowych i w czułych odbiornikach mikrofalowych, używanych w zestawach telewizji satelitarnej. Tymczasem naukowcy nauczyli się lokalizować elektrony nie tylko w płaszczyźnie, czy w linii, ale również w punkcie - stąd pochodzi nazwa “kropki kwantowe”.

Odkrycie kropek kwantowych otwiera ogromne możliwości badawcze i zapowiada bardzo interesujące wyniki naukowe. Nowe właściwości otrzymanych struktur znajdują zastosowanie w elektronice i optyce.<sup>164</sup> Kropki kwantowe mogą być również stosowane jako materiały

---

<sup>162</sup> Glenn J C (1991) Early 21-st century impact of artificial intelligence *12-th national Online Meeting* ed. Williams M E (Medford)

<sup>163</sup> Reed M A (1993) Kropki kwantowe *Świat Nauki* 40-6

<sup>164</sup> Simon V i współpracownicy (1993) The application of Au<sub>55</sub> clusters as quantum dots *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **32** 250-4

absorbujące lub emitujące światło o dowolnej długości fali. Dzięki nim będzie można skonstruować bardziej wydajne i precyzyjniej strojone lasery półprzewodnikowe. W typowym półprzewodniku, charakterystyczną odległością jest tak zwana droga swobodna (odległość między kolejnymi rozproszeniami) elektronu. Typowa droga swobodna elektronu w paśmie przewodnictwa wynosi około 10 nm. Tak więc elektron w kostce półprzewodnika o boku długości 10 nm pozostaje w zasadzie uwięziony w punkcie, będąc zdelokalizowany wokół niego, zgodnie z zasadą nieoznaczoności.

Gueret oraz jego współpracownicy z IBM w Zurychu uzyskali “kurczące się” kropki kwantowe, gdy w procesie produkcji umieścili bramkę elektryczną wokół kropki. Zwiększanie potencjału elektrycznego na bramce zmniejsza wymiary kropki (powoduje jej “kurczenie się”), co prowadzi do wzrostu energii stanów elektronowych w kropce. Jedną z korzyści osiąganych przy tego typu rozwiązaniach jest bardzo łatwa lokalizacja dowolnej liczby (dużej lub małej) elektronów w kropce, wskutek zmiany napięcia bramki. W rezultacie otrzymujemy coś, co można by nazwać atomem dającym się modyfikować: lokalizujący potencjał działa jak przyciągające jądro, a walencyjność (liczba elektronów) jest ustalana z zewnątrz przez potencjał bramki.

W atomach elektrony lokalizowane są przez przyciągający potencjał elektrostatyczny jądra, a rozkład gęstości elektronów jest sferycznie symetryczny. W kropkach kwantowych kształt elektrod-bramek decyduje o wielkości, kształcie i symetrii potencjału lokalizującego.

Grupa badawcza z Instytutu Maxa Plancka w Stuttgarcie oraz zespoły z IBM i AT&T wykonały duże, periodyczne sieci kropek kwantowych, konstruując bramkę w postaci elektrody siatkowej - jest to mikrostruktura równoważna tzw. window screen. Napięcie przyłożone do elektrody siatkowej tworzy regularną sieć potencjałów, lokalizujących



elektrony w warstwie materiału studni. Rozmiary każdej kropki i liczba znajdujących się w niej elektronów mogą być łatwo sterowane, podobnie jak wysokość i szerokość bariery pomiędzy kropkami. W widmach absorpcyjnych takich struktur pojawiają się wyraźne piki. Ashoori i Stömer z AT&T zmierzili w 1993 roku pojemność elektryczną pojedynczych kropek i wykazali, że można umieścić w każdej kropce po jednym elektronie. Elektrony mogą być następnie dodawane jeden po drugim. Pozwoliło to na tworzenie płaskich, sztucznych sieci, w których prawie wszystkie właściwości budujących je “atomów” mogą być kontrolowane. Podobnie jak pojedyncza kropka kwantowa posiada poziomy energetyczne, będące odpowiednikiem poziomów elektronowych, tak sieć kropek kwantowych ma energetyczną strukturę pasmową, analogiczną do struktury pasmowej kryształu półprzewodnikowego. Takie struktury kropek mogą być stosowane do wytwarzania oscylatorów elektronicznych, pracujących na niezwykle dużych częstotliwościach.

Inaczej niż w naturze, w przypadku sztucznych struktur wspomnianego wyżej typu, jednorodność osiąga się dzięki doskonałości technologii. Znaczące osiągnięcia w dziedzinie kropek kwantowych są efektem dwudziestu lat badań, w czasie których nauczono się właściwego wykorzystywania technologii elektronicznych. Przed rokiem 1970 badania w fizyce ciała stałego ograniczały się do materiałów danych przez naturę. Postęp w dziedzinie technologii ultracienkich warstw epitaksjalnych w latach siedemdziesiątych umożliwił badaczom wytwarzanie struktur dwuwymiarowych, które są najważniejsze w dzisiejszej technologii. Rozwój tej technologii pozwolił z kolei badać struktury jedno- i zerowymiarowe. Zanim jednak te odkrycia będzie można zastosować na skalę masową, trzeba rozwinąć nowe technologie.

Najistotniejsza przeszkoda, to brak możliwości kontroli wymiarów i czystości mikrostruktur. Obecne sposoby ich wytwarzania są

niewystarczająco precyzyjne, a ulepszenie ich wymaga przełomu w dziedzinie materiałów i technologii. Dzisiejsze prototypowe urządzenia działają tylko w niskich temperaturach i są względnie duże (aktywne elementy urządzeń mają rozmiary kwantowe, jednak elektrody i kontakty zajmują ogromną przestrzeń).

Ponadto urządzenia te są wytwarzane przy użyciu litografii elektronowej, czyli technologii, która nie nadaje się do masowej produkcji skomplikowanych układów, a tylko masowa produkcja może zapewnić im sukces ekonomiczny. Potrzebne są nowe technologie litografii (np. strukturalny wzrost epitaksjalny), które umożliwiłyby trójwymiarową kontrolę w skali atomowej. Prawdopodobnie trzeba będzie także sięgnąć do nowych materiałów i technik syntezy, które połączą tradycyjne technologie półprzewodnikowe z alternatywnymi. Przykładowo naukowcy z Fujitsu Laboratories w Japonii otrzymali druty i kropki kwantowe z organicznych polimerów.

## 6.6. Nanotechnologia obliczeniowa

W 1991 roku Merkle<sup>165</sup> zauważył, że jednym z głównych celów badań w nanotechnologii jest projektowanie, modelowanie i wytwarzanie maszyn i urządzeń molekularnych. Ponieważ ostatecznym celem jest ekonomicznie uzasadnione wytwarzanie, obecne możliwości nie pozwalają na produkcję nawet najbardziej podstawowych struktur molekularnych. Jednakże projektowanie i modelowanie maszyn molekularnych jest całkowicie możliwe nawet przy stosowaniu współczesnych technologii. Ponadto, takie modelowanie jest tanie i stosunkowo łatwą drogą badania szerokiej gamy możliwych maszyn molekularnych. Pozwala to na szybkie stwierdzenie i eliminację

---

<sup>165</sup> Merkle R C (1991) Computational nanotechnology *Nanotechnology* 2 134-41

oczywistych ograniczeń projektu a następnie jego poprawę i bardziej wnikliwą analizę nowej wersji. O ile możemy długo dyskutować, ile dokładnie potrzeba będzie czasu na opracowanie urządzeń do wytwarzania maszyn molekularnych, to jest rzeczą jasną, że przy pomocy współczesnych technik komputerowych można znacznie ten czas skrócić. Za pomocą odpowiedniego oprogramowania (CAD) modelowania molekularnego (włączając w to dostępne w chwili obecnej pakiety chemii obliczeniowej, jak na przykład mechanikę molekularną oraz programy półempiryczne i *ab initio*), można komputerowo planować rozwój systemów wytwarzania na poziomie molekularnym, podobnie jak współczesne Boeingi są “budowane” i testowane w “locie” za pomocą komputerów, zanim się je rzeczywiście zbuduje.

Hołdując tej filozofii bada się proste układy molekularne, co może pomóc w budowie większych struktur.

Jednym z takich pomysłów jest idea budowy większych nanostruktur w oparciu o molekuly dendrymerów<sup>166</sup>, otrzymane za pomocą genealogicznie ukierunkowanej syntezy (Genealogically Directed Synthesis; GDS). Zdaniem Kroto podobną rolę mogą odegrać w przyszłości cząsteczki buckminsterfullerenów na przykład C<sub>60</sub>, o których wiadomo, że tworzą klastery, gdzie minimalna odległość pomiędzy atomami węgla w dwu różnych cząsteczkach wynosi ~ 0.3 nm. Rysunek 2 przedstawia prostą strukturę regularną, zawierającą cztery cząsteczki C<sub>60</sub> w komórce elementarnej.<sup>167</sup>

Agregaty atomów i struktury warstwowe o rozmiarach rzędu nanometrów mają często specjalne właściwości fizyko-chemiczne. Badania

---

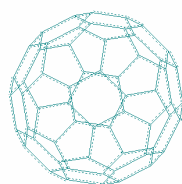
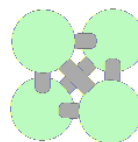
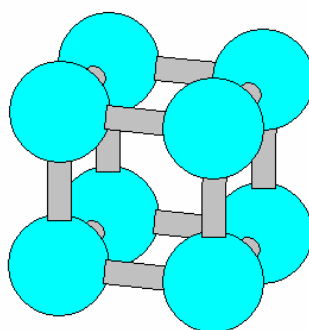
<sup>166</sup> Tomalia D A i współpracownicy (1990) Starburst dendrimers: molecular-level control of size, shape, surface chemistry, topology, and flexibility from atoms to macroscopic matter *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **29** 138-75

<sup>167</sup> Vashishta P i współpracownicy (1994) Computer simulation of materials using parallel architectures *Comp. Mat. Sci.* **2** 180-208

teoretyczne takich struktur są już obecnie w pełni możliwe.<sup>168</sup> Rysunek 3 przedstawia Nanołożysko 2 zaprojektowane przez Drexlera i Merkle. Jest to przykład struktury, której właściwości można już z powodzeniem badać, chociaż nie potrafimy jak dotąd jej zbudować.

---

<sup>168</sup> Moran Lopez J L 1994 Theoretical studies and modelling of nanostructured materials. A challenge for the 1990s *Comp. Mat. Sci.* **2** 72-80

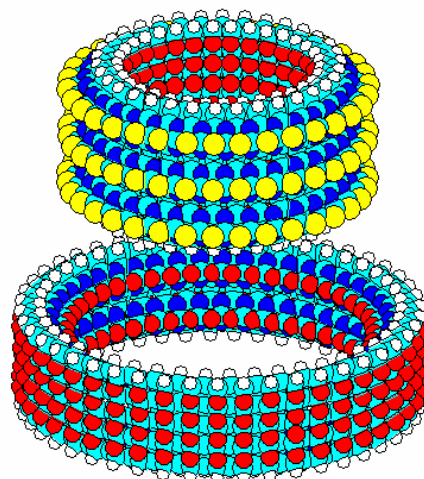
**A****B****C**

Rys. 2. Struktura cząsteczek  $C_{60}$  w stanie stałym.

**A** Pojedyncza cząsteczka  $C_{60}$  o średnicy  $\sim 1$  nm (maksymalna odległość CC  $\sim 0.71$  nm)

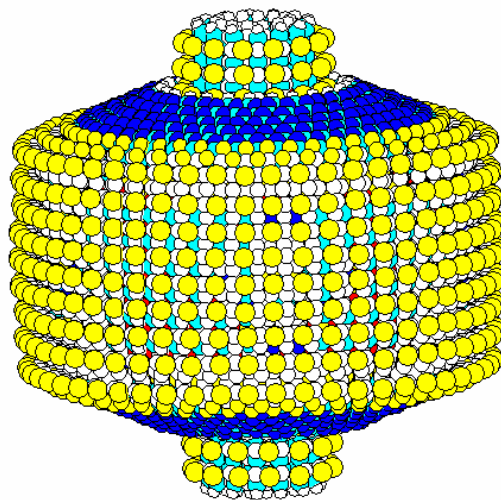
**B** Klaster czterech cząsteczek  $C_{60}$  (minimalna odległość CC pomiędzy różnymi molekułami  $\sim 0.3$  nm)

**C** Sieć regularna stałego  $C_{60}$  (symetria  $\overline{Pa}3$ ,  $a = 1.405$  nm)



Rys. 3. Konfiguracja atomów w Nanołożysku 2 według projektu Drexlera i Merkle (obiekt składa się z dwóch molekuł o wzorach sumarycznych  $C_{782}H_{136}O_{204}N_{204}S_{102}$  i  $C_{736}H_{184}O_{276}N_{184}$ , razem 2808 atomów).

Na rysunku 4 przedstawiono większy i bardziej skomplikowany projekt nanołożyska. W chwili obecnej układy tej wielkości są nie tylko niemożliwe do zbudowania, ale również trudne do analizy teoretycznej.



Rys. 4. Przekładnia planetarna według projektu Drexlera i Merkle (obiekt składa się z ośmiu molekuł, zbudowanych z 8297 atomów C, F, H, N, O, P, S i Si)

Tym niemniej istnieją poważne przesłanki, aby sądzić, że sytuacja ta może zmienić się w najbliższej przyszłości.<sup>169</sup>

---

<sup>169</sup> Chelikowsky J R i Binggeli N (1994) Doing materials science with a supercomputer: on the road to 1000 atom systems *Comp. Mat. Sci.* 2 111-26

## **UZUPEŁNIENIA**

Opracowanie, które oddajemy czytelnikom może być potraktowane jako wstęp do nanotechnologii. Przedstawiliśmy w nim podstawowe problemy tej nowej dziedziny wiedzy. Opracowanie jest przeznaczone przede wszystkim dla studentów uczelni technicznych, ale także dla młodych pracowników naukowych, inżynierów i projektantów, których być może zainteresują możliwości tej rozwijającej się dziedziny.

Uzupełnienia, które zamieszczamy powinny być pomocne zarówno w studiowaniu przedmiotu jak i prowadzeniu seminariów. Sądzimy bowiem, że takie dziedziny jak technologia nanoproszków, nanowarstw, czy też nanokompozytów pozwalają na włączenie się polskich uczelni technicznych w badania nanotechnologiczne.



## **DODATEK A**

### **Jak studiować nanotechnologię**

K. Eric Drexler  
Foresight Institute  
PO Box 61058  
Palo Alto, CA 94306 USA

Wielu studentów pyta, co powinno się studiować, aby osiągnąć sukces w nanotechnologii. Odpowiadając należałoby przedstawić różne dziedziny wiedzy, jakie składają się na nanotechnologię, włączając zagadnienia podstawowe.

***One can't master everything relevant to so broad a field?***

Wydaje się zatem sensowne, aby zasygnalizować różne aspekty istotne dla tak szerokiej interdyscyplinarnej dziedziny, jaką jest nanotechnologia i pokazać sposoby ich opanowywania. Poniżej przedstawiony jest mój osobisty pogląd, oparty na tym, czego uczę (czego chciałbym uczyć) i jaki sposób uczenia się wydaje się być najefektywniejszy.

#### **Obszar zainteresowań**

Nanotechnologia oznacza możliwość kontroli struktury materii oraz budowy złożonych obiektów z molekularną precyzją. Takiego poziomu zaawansowania jeszcze nie osiągnęliśmy, ponieważ nie dysponujemy molekularnymi montownikami. Natura jednak od dawna realizuje procesy na tym poziomie. Zainteresowania nanotechnologii dzielą się zatem odpowiednio na dwa szerokie kierunki: badawczy (który w chwili obecnej jest bardziej teoretyczny) i technologiczny prowadzący do

budowy nanomontowni w przyszłości.

Studia teoretyczne w tym obszarze dotyczą wielu różnych gałęzi wiedzy. Obejmują one podstawy inżynierii nanomechanicznej (zajmującej się maszynami molekularnymi) i inżynierii nanoelektrycznej (zajmującej się molekularnymi i atomowo precyzyjnymi elektronicznymi systemami w skali nanometrowej), a także systemy kompleksowe, takie jak montownie, replikatory i nanokomputery. Ujmując szerzej nanotechnologia interesuje się problematyką obiektów w makro skali, takich jak duże systemy budowane przez zespoły montowni.

Ponieważ nie ma w chwili obecnej możliwości wykorzystania osiągnięć teoretycznych z zakresu nanotechnologii stanowią one jakby zamki na lodzie. W związku z taką sytuacją trudno jest pozyskać fundusze na prowadzenie doświadczeń, a towarzyszy temu powątpiewanie i sceptycyzm odnośnie wartości przewidywań teoretycznych. Tym nie mniej studia teoretyczne wnoszą nowe elementy do zasobu wiedzy ogólnoludzkiej, rozwijają nas i pozwalają na lepsze zrozumienie naszego postępowania jako społeczeństwa. Te studia teoretyczne zrodziły obecne zainteresowanie nanotechnologią, a wierzę również, że doprowadzą one do umocnienia wspomnianych zamków na lodzie stałymi i solidnymi fundamentami.

Analiza tego, co mogą wykonać przyszłe montownie dostarcza więcej przewidywań niż czyni postępu, zaś badania nad rozwojem montowni czynią więcej postępu niż dostarczają przewidywań. Stąd też więcej środków przeznaczają się na wdrożenia niż na teorię. Rozwój technologii daje efekty w stosunkowo krótkim czasie, zaś w przypadku studiów teoretycznych są one znacznie oddalone. Praktycznie nie ma dziś możliwości budowy montowni, ale jest sens wytwarzania narzędzi, które ułatwią budowę tychże w przyszłości. Rozwój technologii wytwarzania narzędzi można określić mianem “technologii umożliwiających” (*“enabling technologies”*).

Te nowe obiecujące technologie dotyczą kilku pokrewnych dziedzin. Zaliczamy do nich:

- inżynierię protein (zajmującą się projektowaniem i budową urządzeń molekularnych na bazie protein),
- inżynierię makromolekularną (zajmującą się projektowaniem i otrzymywaniem urządzeń molekularnych z odpowiednich prostych materiałów),
- techniki mikromanipulacyjne (zajmujące się możliwościami wykorzystania technologii skaningowej mikroskopii tunelowej STM i mikroskopii sił atomowych AFM (Atomic Force Microscopy) do syntez chemicznych, a następnie konstrukcji urządzeń molekularnych).

Wyżej wymienione technologie mają swoje zalety i wady. Inżynieria protein bazuje na wielu przykładach i prototypach znanych w przyrodzie, a także próbuje wykorzystywać samo powielające się układy (bakteryjne), do taniego wytworzenia produktów. Podejście to ma wielu zwolenników, gdyż pożądany efekt widoczny jest w krótkiej perspektywie czasowej, przy stosunkowo niskich nakładach. Inżynieria makromolekularna unika głównego problemu związanego z inżynierią protein (białka nie będąc zaprojektowane dla celów nanotechnologicznych są trudne do zastosowania), zaś jako cenę odejścia od naturalnych prototypów wymaga ona droższych technik syntezy chemicznej dla otrzymania w krótkim czasie produktów (redukuje to potencjalny rynek). Techniki mikromanipulacyjne mogą ułatwić projektowanie oraz konstruowanie obiektów molekularnych, jednak ich wadą jest konieczność znacznych nakładów, gdyż w typowych reakcjach chemicznych powstają jednocześnie tryliony cząsteczek, podczas, gdy w manipulatorze w porównywalnym czasie tylko jedna cząsteczka. Można się więc spodziewać, że produkty otrzymane tą drogą będą kosztowały tryliony razy więcej, co drastycznie ogranicza potencjalny zbyt. Ponadto mikromanipulacja nie osiągnęła nawet pojedynczego, chemicznie

specyficznego etapu w syntezie molekularnej, podczas gdy chemicy potrafią budować określone cząsteczki zawierające tysiące atomów.

***Nanotechnology is fundamentally a branch of engineering***

Wszystkie powyższe dziedziny badań wykazują luki i wszystkie będą zmuszone je w pewnym stopniu wypełnić, niezależnie od tego, która z nich ostatecznie udowodni, że ma największe sukcesy. Szczególnie interesujące wydają się być podejścia, integrujące różne obszary wiedzy (jako przykład można przytoczyć mikromanipulacje z udziałem maszyn molekularnych). Ważną rolę w procesie badawczym odgrywa też dziś modelowanie systemów molekularnych. Można je nazwać technologią nowych możliwości.

### **Podstawowe dyscypliny: nauka i technologia molekularna**

Dotychczas nie ma programu, którego celem byłoby przygotowywanie studentów do pracy w zakresie nanotechnologii. Mój wykład w Stanford dotyczył ogólnego przeglądu dotychczasowych dokonań w tej dziedzinie. Wydaje się, że zamiast poszukiwać wykładów, czy książek lub czasopism z zakresu nanotechnologii powinno się raczej zwrócić uwagę na ogólne aspekty badań i technologii molekularnych.

Znanych jest dotąd tylko kilka szkół, które traktują badania i technologie molekularne w sposób ujednolicony. Istnieje więc pilna potrzeba opracowania programów traktujących kwestie naukowe i technologiczne w sposób zintegrowany. Zaliczenie takich przedmiotów dawałoby podstawy do podjęcia dalszych studiów w zakresie nanotechnologii. Nierzadko zdobycie tej podstawowej wiedzy wymaga wyboru przedmiotów na kilku wydziałach. To, jakie przedmioty są ważne

dla wglębnienia się w nanotechnologię zostanie omówione w dalszej części artykułu.

Aby zrozumieć jakiegokolwiek problemy naukowe i technologiczne należy zapoznać się z podstawami matematyki. Ważna jest znajomość podstawowych zagadnień matematyki, a szczególnie rachunku różniczkowego i algebry liniowej. Problemy napotymane w nanotechnologii wymagają często zastosowania zaawansowanej matematyki do ich rozwiązania.

Kolejny ważny przedmiot to fizyka. Kluczowa jest znajomość podstaw mechaniki klasycznej, elektromagnetyzmu czy mechaniki kwantowej. Każdy, kto zamierza podjąć się zaawansowanej pracy w chemii, a szczególnie w dziedzinie maszyn molekularnych winien zapoznać się głębiej z mechaniką kwantową. Natomiast osoby zainteresowane elektroniką molekularną powinny potraktować mechanikę kwantową jako jeden z najważniejszych przedmiotów. Mechanika kwantowa jest dziś obszernym działem wiedzy. Obejmuje ona elektrodynamikę kwantową, chromodynamikę kwantową, czy teorię superstrun. Z punktu widzenia potrzeb nanotechnologii interesująca jest mechanika kwantowa stanów elektronów w materii, a więc wykorzystywana przez chemików czy fizyków zajmujących się problematyką ciała stałego. Zarówno chemia kwantowa jak i fizyka ciała stałego mają znaczne powiązania z nanotechnologią.

Wykorzystanie tak matematyki jak i fizyki w nanotechnologii jest różne i zależy od złożoności problemu czekającego na rozwiązanie.

Na pracę nanomaszyn oraz przyrządów nanoelektronowych znaczny wpływ ma szum termiczny. Aby zrozumieć jego oddziaływanie niezbędna jest znajomość termodynamiki i mechaniki statystycznej. Termodynamika zajmuje się przepływem energii i ciepła w skali makro w materii. Zasady termodynamiki obowiązują powszechnie i są traktowane jako podstawowe przy opisie zjawisk. Mechanika statystyczna opisuje ten

sam obszar bardziej szczegółowo na poziomie molekularnym. Wszystkie wyżej wymienione zagadnienia są omawiane na wydziałach chemii czy fizyki.

Nanotechnologia może być postrzegana jako wynik ewolucji chemii, nauki podstawowej dla rozwoju technologii molekularnych i manipulacji molekularnej. Każdy zamierzający zająć się nanotechnologią powinien opanować podstawy chemii, skupiając się na jej strukturalnych i molekularnych aspektach. Osoby zainteresowane montowniami i urządzeniami molekularno mechanicznymi powinny zapoznać się z chemią organiczną, powinny zaznajomić się z syntezą organiczną i tajnikami pracy w laboratorium chemicznym.

Wiele innych gałęzi wiedzy ma powiązania z nanotechnologią. I tak kinetyka chemiczna i teoria stanów przejściowych jest ważna dla zrozumienia teorii montażu. Wiedza w zakresie mechaniki molekularnej jest istotna dla projektowania maszyn molekularnych. Wreszcie wiedza o materiałach uważanych często za wytwory chemii ułatwia zrozumienie zachowania układów makromolekularnych.

Również biologia jest nauką ważną dla zrozumienia istoty działania maszyn molekularnych. Reakcje enzymatyczne stanowią przykłady naturalnych nanomechanizmów. Zwijanie układów białkowych oraz inne procesy prowadzące do samoorganizacji białek dają wyobrażenie jak maszyny molekularne pierwszej generacji mogłyby być zbudowane. Znajomość tych obszarów nauki jest bardzo ważna dla każdego, kto interesuje się technologiami nowych możliwości.

Mimo, że nanotechnologia bazuje na naukach podstawowych, jest ona w istocie gałęzią inżynierii. Być dobrym inżynierem oznacza nauczyć się myśleć kategoriami praktyka. Od inżyniera wymaga się znajomości wiedzy i umiejętności jej praktycznego wykorzystania.

***Learn the fundamentals of molecular science and technology***

---

Nanosystemy są układami przewidzianymi do praktycznego wykorzystania i dlatego wymagają podejścia inżynierskiego. Wiele nanosystemów zawiera elementy mechaniczne i dlatego należy do nich stosować zasady inżynierii mechanicznej. Wiedza w zakresie mechaniki, dynamiki systemów, działania mechanizmów oraz teorii sterowania jest niezbędna zarówno dla rozwoju nanotechnologii jak i technologii nowych możliwości. Studia inżynierskie umożliwiają zdobycie wiedzy w zakresie specjalistycznych przedmiotów powiązanych z nanotechnologią takich jak projektowanie obwodów VLSI (niezbędnych dla produkcji nanokomputerów) i ich wytwarzania. Znane dziś zasady projektowania obwodów elektronicznych mogą mieć zastosowanie do wytwarzania względnie dużych systemów nanoelektronicznych, podczas gdy zasady elektroniki kwantowej będą odgrywały rolę przy produkcji małych systemów.

Niezwykle istotny dla nanotechnologii jest rozwój technik informatycznych. Podstawowa wiedza o komputerach i zasadach programowania (raczej nie w BASIC-u) jest ważna dla każdego niezależnie od reprezentowanej dziedziny nauki czy technologii. Zainteresowani oprogramowaniem dotyczącym nanotechnologii powinni zwrócić szczególną uwagę na symulację numeryczną w mechanice molekularnej i systemach elektroniki kwantowej oraz na tworzenie programów dla systemów komputerowych pracujących równolegle, ponieważ jest to kierunek, w którym rozwój techniki komputerowej będzie podążał w najbliższych latach. Systemy wektorowe pomogą projektantom w rozwoju nanotechnologii, a nanokomputery, będą następnie wykorzystane do wytwarzania jeszcze większych systemów komputerowych pracujących równolegle. Podsumowując, jeżeli potężne systemy obliczeniowe mają być użyteczne w projektowaniu

molekularnym, powinny być dostępne poprzez szybkie terminale, które pozwolą projektantom “widzieć” i manipulować modelowanymi układami.



## Poziomy wiedzy

Z powyższych wywodów wynika, iż aby stać się dobrym nanotechnologiem należałoby opanować wiedzę z zakresu fizyki, chemii, inżynierii molekularnej, mechaniki kwantowej i wreszcie tajniki informatyki i technik komputerowych.

Na szczęście, nie do końca jest to prawdą. Oczywiście głębsza wiedza daje większe możliwości działania w pewnych granicach. Uceniem się nie można jednak zastąpić działania. W tak szerokiej dziedzinie, jaką jest nanotechnologia nie można opanować wszystkiego.

Co można i powinno się uczynić, to wyspecjalizować się w kilku dyscyplinach, a mieć wyobrażenie o innych. Urządzenia molekularne mogą zachowywać się różny sposób, na przykład mogą wibrować, rozrywać się na części, odrywać się jedno od drugiego, deformować, transformować, ulegać działaniu światła, czy wpadać w różne stany. Każde z tych zachowań może pojawić się w jakiegokolwiek mechanicznej części, a następnie zaniknąć. Realne układy fizyczne zachowują się w trakcie użytkowania w pewien charakterystyczny sposób. To jak się zachowają winniśmy potrafić przewidzieć w oparciu o posiadaną wiedzę. Im będzie ona gruntowniejsza, tym łatwiej poradzimy sobie z pojawiającymi się problemami.

Można wyróżnić trzy poziomy zaawansowania w zdobywaniu wiedzy w danej dziedzinie:

- poziom I daje rozeznanie czego dotyczy dziedzina i umożliwia formułowanie problemów oczekujących wyjaśnienia
- poziom II umożliwia jakościowe wyjaśnienie zjawisk jak i ocenę, które z nich są bardziej, a które mniej ważne
- poziom III umożliwia samodzielne rozwiązywanie problemów w ramach rozważanej dziedziny

Ktoś, kto posiada wiedzę na poziomach (I) i (II) w kilku dziedzinach,

może uniknąć problemów na tych polach wykonując pracę w dziedzinie pokrewnej, w której ma wiedzę na poziomie (III). I to jest dobra metoda postępowania, ponieważ opanowanie wiedzy na poziomie (I) i (II), wymaga dużo mniej czasu. Ale aby właściwie wykorzystać wiedzę na poziomie (I) i (II) wymagana jest surowa dyscyplina: zakładaj najgorsze o tym czego nie wiesz. Nie zakładaj, że słabo zrozumiane zjawisko fizyczne w jakiś sposób oszczędzi twój projekt; załóż (aż nie stwierdzisz, że jest wręcz przeciwnie), że może go całkowicie zniszczyć. Bez tej samodyscypliny staniesz się intelektualnym ryzykantem, a z tą dyscypliną będziesz zdolny do wniesienia prawdziwego wkładu.

### **Sposoby uczenia się**

W jaki sposób zdobyć wiedzę z różnych dyscyplin? Kursy są pomocne, jednak umożliwiają opanowanie zwykle wąskiego wycinka wiedzy. Głębszą wiedzę można osiąść studiując czasopisma, które gromadzą wszystko, co dzieje się i dzieje w nauce i technologii. Do wiodących czasopism można zaliczyć *Science*, *Nature*, *Science News*, *Scientific American* i *IEEE Spectrum*. Innym ważnym źródłem wiedzy są książki i monografie, których wiele pojawia się na półce nowości w bibliotekach naukowych. Aby być dobrym specjalistą należy zaznajamiać się z szerokim spektrum czasopism dotyczących danej dyscypliny. Jeśli czegoś nie rozumiemy nie należy załamywać się i poddawać. Winniśmy stłamsić “wewnętrzne nie”, które podsuwa nam “ja nic nie rozumiem i nie dam sobie rady, lepiej dać sobie z tym spokój”. Czytając to, czego nie rozumiemy poznajemy tajniki dziedziny, najważniejsze problemy i związki pomiędzy nimi, a także rozeznajemy, co powinniśmy przestudiować, aby zrozumieć więcej.

***Ideas about real systems must somehow be disciplined by reality***

Prowadzi to do coraz wyższych szczebli wtajemniczenia. Dobra znajomość przedmiotu powoduje, że swobodnie radzimy sobie z literaturą. Łatwo rozeznajemy też istotne problemy oraz luki w naszej wiedzy, które powinniśmy uzupełnić dalszym studiowaniem. Głęboka wiedza rodzi zwykle pytania, które mobilizują nas do pracy i które stają się czasami motorem postępu.

Kursy (studia) są nieodzowne do zdobycia wiedzy podstawowej. Jeśli nie ma możliwości uczestniczenia w takowych, wówczas można tę samą wiedzę osiągnąć studiując podręczniki.

Praca w dziedzinach interdyscyplinarnych wymaga zdobywania wiedzy z książek i czasopism. Stąd każdy, kto chce dziś coś osiągnąć musi osiągnąć umiejętność korzystania z bibliotek, dziś są one jeszcze tradycyjne, ale w przyszłości będą oparte o systemy hypertext. Do każdej przeczytanej informacji winno się podchodzić krytycznie, gdyż książki i czasopisma mogą zawierać błędy. Bywają też publikacje mało lub wręcz bezwartościowe, co niestety miewa miejsce w dziedzinach interdyscyplinarnych, to znaczy nie mieszczących się w żadnej dyscyplinie.

Ważnym problemem jest, u kogo pracujemy. Jeżeli istnieje możliwość współpracy z grupą (profesorem) realizującym ciekawą tematykę, weź pod uwagę możliwość pozostania uczniem tego badacza. Jeżeli nie, sami powinniśmy rozwiązywać problemy techniczne, które nas interesują. Najlepszą metodą zdobywania wiedzy jest szukanie odpowiedzi na rodzące się pytania. Bowiem tylko w ten sposób możemy wnieść własny oryginalny wkład.

Ważną jest umiejętność krytycznej oceny szczególnie własnych idei. Wiele bowiem nowych pomysłów jest naiwnych lub wręcz

bezwartościowych. Zaniechanie weryfikacji własnych pomysłów grozi utratą wiarygodności. Błędne idee skazają naszą wiedzę i wprowadzają zamęt. Zanim więc coś opublikujemy, winniśmy szczegółowo i krytycznie zweryfikować wyniki i postawione hipotezy. Ważną jest umiejętność przyjmowania krytyki pochodzącej od innych.

Należy doskonalić umiejętność prezentowania swoich idei w dyskusjach, publikacjach i na odczytach oraz korzystania z rad innych, szczególnie reprezentujących pokrewne dziedziny. Jeżeli podważają oni nasze idee i udokumentują to, wówczas albo zdołamy obalić zarzuty, albo przyznamy im rację i zweryfikujemy nasz punkt widzenia. Może się zdarzyć, że nasze poglądy i idee nie są przyjmowane. Należy się wówczas zastanowić czy należycie rozpoznaliśmy problem i czy nie popełniliśmy podstawowych błędów. Jeżeli po początkowej nieufności udaje się nam przekonać słuchaczy (społeczność naukową) do swoich idei - to jest to powód do dumy. Możemy nawet sądzić, że udało się nam odkryć coś nowego i ważnego.

Wszystkie idee winny być odnoszone do otaczającej nas rzeczywistości. Doświadczenie z natury dotyka otaczającego nas świata. Teoria, przynajmniej w pierwotnej formie, niekoniecznie musi bazować na czymś realnym. Jednak wartościową teorią jest tylko ta, która opisuje wyniki doświadczeń. Tworząc więc teorię musimy bezwzględnie sprawdzić, czy tak jest. Weryfikacja teorii jest obowiązkiem każdego szanującego się badacza. Jeśli to możliwe, wskazane jest weryfikowanie teorii na różne sposoby. Im wszechstronniej będzie ona tłumaczyła zachowanie otaczającego nas świata tym będzie wartościowsza.

Analizując różne idee należy wychwycić wszystkie ich słabości. Publikować czy podawać do wiadomości można tylko te, które obroniły się przed atakiem z różnych stron, a ponadto zostały wszechstronnie przebadane. Dzielenie się niepewnym wynikami, czy pomysłami grozi

utrata wiarygodności. Nie należy i nie można bazować na wynikach, czy teoriach, które nie zostały sprawdzone. Nie można dzielić się z innymi wynikami, czy pomysłami niepewnymi - jeśli nawet zdarza się, że inni tak czynią.

Krótko mówiąc, należy uczyć się podstaw wiedzy i technologii molekularnej, badania innych pokrewnych dziedzin, studiowania książek i czasopism, a także śledzenia nowości i krytycznego myślenia.

Jeśli uda się wyżej wymienione działania połączyć, to jest to droga do sukcesu i autentycznego wniesienia wkładu do światowej skarbnicy wiedzy.

Copyright 1988 Foresight Institute. P.O. Box 61058, Paolo Alto, CA 94306 USA

## **DODATEK B**

### **Informacje o nanotechnologii w sieci Internet**

Najobszerniejszy zestaw informacji dotyczących nanotechnologii w sieci Internet został opracowany przez Dr. J. Storrsa Halla z Rutgers University we współpracy z Foresight Institute.

Zawiera on:

- (i) **Newsgroup.sci.nanotech** Dr Hall jest moderatorem tej technicznej grupy dyskusyjnej od 1988 roku;
- (ii) **ftp planchet.rutgers.edu** under nanotech/papers. W tym miejscu można znaleźć wiele publikacji Instytutu Foresight;
- (iii) **ftp planchet.rutgers.edu** under nanotech/archives. Materiały archiwalne;
- (iv) **World Wide Web:http://planchet.rutgers.edu** World Wide Web to system, w którym hypertext i hypermedia są osiągalne poprzez Internet. Dr Hall utworzył zbiory dla tych, którzy poszukują informacji o nanotechnologii.

Osoby poszukujące dodatkowych informacji o nanotechnologii mogą zwracać się do Foresight Institute poprzez: **foresight@cup.portal.com**

**DODATEK C****Literatura dotycząca nanoproszków zebrana w oparciu o Current Contents (Physics, Chemistry & Earth)****1994 rok**

Depero, L.E.; Levrangi, P., Rigid-Disordered Models for Inorganic Structures - The Case of Zirconia Nanopowders *J Solid State Chem* **110** (1994) 190-2

Costa, J.; Roura, P.; Sardin, G.; Morante, J.R.; Bertran, E., Unusual Photoluminescence Properties in Amorphous Silicon Nanopowder Produced by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition *Appl Phys Lett* **64** (1994) 463-5

Zhao, X.Q.; Zheng, F.; Liang, Y.; Hu, Z.Q.; Xu, Y.B., Preparation and Characterization of Single Phase beta-Fe-Nanopowder from cw CO<sub>2</sub> Laser Induced Pyrolysis of Iron Pentacarbonyl *Mater Lett* **21** (1994) 285-288

**1995 rok**

Liu, H.W.; Feng, L.B.; Zhang, X.S.; Xue, Q.J., ESR characterization of ZrO<sub>2</sub> nanopowder *J Phys Chem* **99** (1995) 332-334

Aumann, C.E.; Skofronick, G.L.; Martin, J.A., Oxidation behavior of aluminum nanopowders *J Vac Sci Technol B* **13** (1995) 1178-1183

**DODATEK D****Literatura dotycząca nanowarstw zebrana w oparciu o Current Contents (Physics, Chemistry & Earth)****1994 rok**

Keilonat, C.; Camus, E.; Wanderka, N.; Wollenberger, H. Diffusion in Nanolayers as Measured by Atom Probing *Appl Phys Lett* **65** (1994) 2007-8

Green, W.A.; Green, E.R. Wave Propagation in Polar Elastic Superlattices *Geophys J Int* **118** (1994) 459-65

Tolstoi, V.P.; Molotilkina, E.V. Synthesis of Copper Peroxide Nanolayers on Silicon and Melted Quartz Surface by the Ion Layering Technique *Zh Neorg Khim* **39** (1994) 388-91

Gabe, D.R. Protective Layered Electrodeposits *Electrochim Acta* **39** (1994) 1115-21

Tolstoi, V.P.; Molotilkina, E.V. Synthesis of Nanolayers of Y, La, and Eu Hydroperoxides by Ionic Layering on the Silicon Surface *Inorg Mater-Engl Tr* **30** (1994) 201-3

Kung, H.; Jervis, T.R.; Hirvonen, J.P.; Mitchell, T.E.; Nastasi, M. High-temperature structural stability of MoSi<sub>2</sub>-based nanolayer composites *J Vac Sci Technol B* **13** (1995) 1126-9

Kung, H.; Jervis, T.R.; Hirvonen, J.P.; Embury, J.D.; Mitchell, T.E.; Nastasi, M. Structure and mechanical properties of MoSi<sub>2</sub>-SiC nanolayer composites *Phil Mag A* **71** (1995) 759-79



**DODATEK E****Literatura dotycząca nanokompozytów zebrana w oparciu o Current Contents (Physics, Chemistry & Earth)****1991 rok**

Johnson, L.M.; Pinnavaia, T.J. Hydrolysis of (gamma-Aminopropyl)Triethoxysilane-Silylated Imogolite and Formation of a Silylated Tubular Silicate-Layered Silicate Nanocomposite *Langmuir* **7** (1991) 2636-41

Wang, Y.C.; Sasaki, M.; Hirai, Thermal Properties of Chemical Vapour-Deposition SiC-C Nanocomposites *J Mater Sci* **26** (1991) 5495-5501

Roy, S.; Chakravorty, D. Nanocomposites by Fractal Growth of Electrodeposited Silver in Ion-Exchanged Oxide Glasses *Appl Phys Lett* **59** (1991) 1415-17

Colomban, P.; Mazerolles, L. Nanocomposites in Mullite-ZrO<sub>2</sub> and Mullite-TiO<sub>2</sub> Systems Synthesised Through Alkoxide Hydrolysis Gel Routes - Microstructure and Fractography *J Mater Sci* **26** (1991) 3503-10

Devaux, X.; Laurent, C.; Brieu, M.; Rousset, A. Microstructural and Mechanical Properties of Ceramic Matrix Nanocomposites *C R Acad Sci Ser II Mec Phys* **312** (1991) 1425-30

Yamanaka, S. Design and Synthesis of Functional Layered Nanocomposites *Amer Ceram Soc Bull* **70** (1991) 1056-58

Sawaguchi, A.; Toda, K. Mechanical and Electrical Properties of Silicon Nitride Silicon Carbide Nanocomposite Material *J Amer Ceram Soc* **74** (1991) 1142-44

Shull, R.D.; Ritter, J.J.; Swartzendruber, L.J. Change in Magnetic State of Fe - Silica Gel Nanocomposites Due to Low Temperature Treatment in Ammonia *J Appl Phys* **69** (1991) 5144-46

Chow, G.M.; Pattnaik, A.; Schlesinger, T.E.; Cammarata, R.C.; Twigg, M.E.; Edelstein, A.S. Sputtering Synthesis and Properties of Molybdenum Nanocrystals and Al/Mo Layered Nanocomposites *J Mater Res* **6** (1991) 737-43

Lyons, A.M.; Nakahara, S.; Marcus, M.A.; Pearce, E.M.; Waszczak, J.V. Preparation of Copper Poly(2-Vinylpyridine) Nanocomposites *J Phys Chem* **95** (1991) 1098-105

Niihara, K.; Izaki, K.; Kawakami, T. Hot-Pressed Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-32-Percent SiC Nanocomposite from Amorphous Si-C-N Powder with Improved Strength Above 1200-Degrees-C *J Mater Sci Lett* **10** (1991) 112-14

Ishida, Y.; Matsuzaki, J.; Kizuka, T.; Ichinose, H. Structure and Properties of a Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>-Ag Nanocomposite *Physica C* **190** (1991) 67-9

Wang, Y.; Sasaki, M.; Hirai, T. Density and Microstructure of CVD SiC-C Nanocomposites *J Mater Sci* **26** (1991) 6618-24

Niihara, K.; Nakahira, A. Strengthening and Toughening Mechanisms in Nanocomposite Ceramics *Ann Chim-Sci Mat* **16** (1991) 479-86

### **1992 rok**

Ambrose, T.; Gavrin, A.; Chien, C.L. Formation and Magnetic Properties of Nanocomposite Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Using High-Energy Ball Milling *J Magn Magn Mater* **116** (1992) L311-14

Devaux, X.; Laurent, C.; Brieu, M.; Rousset, A. Iron Alumina Interface in Ceramic Matrix Nanocomposites *J Alloys Compounds* **188** (1992) 179-81

Spanhel, L.; Arpac, E.; Schmidt, H. Semiconductor Clusters in the Sol-Gel Process - Synthesis and Properties of CdS Nanocomposites *J Non-Cryst Solids* **147** (1992) 657-62

Randall, C.A.; Miyazaki, S.; More, K.L.; Bhalla, A.S.; Newnham, R.E.

Structural-Property Relationships in Dielectrophoretically Assembled BaTiO<sub>3</sub> Nanocomposites *Mater Lett* **15** (1992) 26-30

Pardavihorvath, M.; Takacs, L. Iron-Alumina Nanocomposites Prepared by Ball Milling *IEEE Trans Magn* **28** (1992) 3186-88

Messersmith, P.B.; Stupp, S.I. Synthesis of Nanocomposites - Organoceramics *J Mater Res* **7** (1992) 2599-611

Wegner, G. Photochemistry and Photophysics of Nanocomposites Prepared from Rod-Like Macromolecules by LB-Technique *Mol Cryst Liquid Cryst* **216** (1992) 7-12

Dorfman, V.F. Diamond-Like Nanocomposites (DLN) *Thin Solid Films* **212** (1992) 267-73

Dorfman, V.F.; Bozhko, A.; Pypkin, B.N.; Borra, R.T.; Srivatsa, A.R.; Zhang, H.; Skotheim, T.A.; Khan, I.; Rodichev, D.; Kirpilenko, G. Diamond-Like Nanocomposites - Electronic Transport Mechanisms and Some Applications *Thin Solid Films* **212** (1992) 274-81

Soraru, G.D.; Ravagni, A.; Dalmaschio, R.; Carturan, G.; Babonneau, F. Polymer-Derived Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub> Nanocomposite Powders *J Mater Res* **7** (1992) 1266-70

Su, K.; Nowakowski, M.; Bonnell, D.; Sneddon, L.G. Polymer Precursor Route to TiB<sub>2</sub>/TiN Nanocomposites *Chem Mater* **4** (1992) 1139-41

Komarneni, S. Nanocomposites *J Mater Chem* **2** (1992) 1219-30

### **1993 rok**

Roy, S.; Das, D.; Chakravorty, D.; Agrawal, D.C. Magnetic Properties of Glass-Metal Nanocomposites Prepared by the Sol-Gel Route and Hot Pressing *J Appl Phys* **74** (1993) 4746-49

Hosono, H. Simple Criterion on Colloid Formation in SiO<sub>2</sub> Glasses by Ion Implantation *Jpn J Appl Phys Pt 1* **32** (1993) 3892-94

Touanen, M.; Teyssandier, F.; Ducarroir, M.; Maline, M.; Hillel, R.; Derep, J.L. Microcomposite and Nanocomposite Structures from Chemical Vapor Deposition in the Silicon-Titanium-Carbon System *J Amer Ceram Soc* **76** (1993) 1473-81

Borsella, E.; Botti, S.; Alexandrescu, R.; Morjan, I.; Dikonimosmakris, T.; Giorgi, R.; Martelli, S. Nanocomposite Ceramic Powder Production by Laser-Induced Gas-Phase Reactions *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **168** (1993) 177-81

Hillel, R.; Maline, M.; Gourbilleau, F.; Nouet, G.; Carles, R.; Mlayah, A. Microstructure of Chemically Vapour Codeposited SiC-TiC-C Nanocomposites *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **168** (1993) 183-7

Vendange, V.; Colombar, P. Elaboration and Thermal Stability of (Alumina, Aluminosilicate Iron, Cobalt, Nickel) Magnetic Nanocomposites Prepared Through a Sol-Gel Route *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **168** (1993) 199-203

Granqvist, C.G. Electrochromic Materials - Metal Oxide Nanocomposites with Variable Optical Properties *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **168** (1993) 209-15

Seron, A.; Benmaimoun, I.; Crespín, M.; Beguin, F. Production of  $\beta$ -SiAlONs Through Carbon Oxide Nanocomposites Obtained from Montmorillonite Aromatic-Ammonium Complexes *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **168** (1993) 239-243

Riera, A.M.I.; Pourroy, G.; Poix, P. Spinel Ferrite-Metal Alloy Nanocomposites Arising from Disproportionation in a Liquid Media *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **168** (1993) 245-7

Messersmith, P.B.; Giannelis, E.P. Polymer-Layered Silicate Nanocomposites - Insitu Intercalative Polymerization of epsilon-Caprolactone in Layered Silicates *Chem Mater* **5** (1993) 1064-6

Huber, C.A.; Lubin, J.A.; Yang, W.H.; Huber, T.E. Synthesis and Optical Properties of Dense Semiconductor Dielectric Nanocomposites *J Phys-Condens Matter* **5** (1993) A337-8

Lukehart, C.M.; Carpenter, J.P.; Milne, S.B.; Burnam, K.J. Creating Better Nanocomposites *Chemtech* **23** (1993) 29-34

Terrill, N.J.; Crowley, T.; Gill, M.; Armes, S.P. Small-Angle X-Ray Scattering Studies on Colloidal Dispersions of Polyaniline Silica Nanocomposites *Langmuir* **9** (1993) 2093-6

Modine, F.A.; Lubben, D.; Bates, J.B. Electrical Conduction in CaF<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite Films on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Substrates *J Appl Phys* **74** (1993) 2658-64

Klein, L.C. Sol-Gel Optical Materials *Annu Rev Mater Sci* **23** (1993) 437-52

Maeda, S.; Armes, S.P. Preparation of Novel Polypyrrole-Silica Colloidal Nanocomposites *J Colloid Interface Sci* **159** (1993) 257-9

Zimmermann, L.; Weibel, M.; Caseri, W.; Suter, U.W. High Refractive Index Films of Polymer Nanocomposites *J Mater Res* **8** (1993) 1742-8

Wu, J.H.; Lerner, M.M. Structural, Thermal, and Electrical Characterization of Layered Nanocomposites Derived from Na-Montmorillonite and Polyethers *Chem Mater* **5** (1993) 835-8

Novak, B.M. Hybrid Nanocomposite Materials - Between Inorganic Glasses and Organic Polymers *Advan Mater* **5** (1993) 422-33

Morup, S.; Christiansen, G. Influence of Magnetic Anisotropy on the Superferromagnetic Ordering in Nanocomposites *J Appl Phys* **73** (1993) 6955- 57

Pardavihorvath, M.; Takacs, L. Magnetic Properties of Copper-Magnetite Nanocomposites Prepared by Ball Milling *J Appl Phys* **73** (1993) 6958-60

Kataoka, N.; Endo, H.; Fukamichi, K.; Shimada, Y. Giant Magnetoresistance in Cu-Co Alloys Produced by Liquid Quenching *Jpn J Appl Phys Pt 1* **32** (1993) 1969-70

Zhao, J.H.; Stearns, L.C.; Harmer, M.P.; Chan, H.M.; Miller, G.A.; Cook, R.F. Mechanical Behavior of Alumina Silicon Carbide Nanocomposites *J Amer Ceram Soc* **76** (1993) 503-10

Uno, T.; Kasuga, T.; Nakayama, S.; Ikushima, A.J. Microstructure of Mica-Based Nanocomposite Glass-Ceramics *J Amer Ceram Soc* **76** (1993) 539-41

Liou, S.H.; Malhotra, S.S.; Yung, S.W. Magnetoresistance in Co/Ag and Fe/Ag Nanocomposite Films *J Appl Phys* **73** (1993) 5539

Roy, B.; Chakravorty, D. High Dielectric Permittivity in Glass-Ceramic Metal Nanocomposites *J Mater Res* **8** (1993) 1206-8

Marchand, A.; Devaux, X.; Barbara, B.; Mollard, P.; Brieu, M.; Rousset, A. Microstructural and Magnetic Characterization of Alumina Iron Nanocomposites *J Mater Sci* **28** (1993) 2217-26

Kador, L.; Fischer, R.; Haarer, D.; Kasemann, R.; Bruck, S.; Schmidt, H.; Durr, H. Optical 2nd-Harmonic Effect of Sol-Gel Inorganic Organic Nanocomposites *Advan Mater* **5** (1993) 270-3

Roy, S.; Chatterjee, A.; Chakravorty, D. Glass-Metal Nanocomposites in Bulk Form by Sol-Gel Route Followed by Hot Pressing *J Mater Res* **8** (1993) 689-92

Gurav, A.S.; Duan, Z.; Wang, L.; Hampdensmith, M.J.; Kodas, T.T. Synthesis of Fullerene-Rhodium Nanocomposites via Aerosol Decomposition *Chem Mater* **5** (1993) 214-6

Wegner, G. Control of Molecular and Supramolecular Architecture of Polymers, Polymer Systems and Nanocomposites *Mol Cryst Liq Cryst Sci Tec A* **234** (1993) 283-316

Vaia, R.A.; Ishii, H.; Giannelis, E.P. Synthesis and Properties of 2-Dimensional Nanostructures by Direct Intercalation of Polymer Melts in Layered Silicates *Chem Mater* **5** (1993) 1694-6

Sglavo, V.M.; Dalmaschio, R.; Soraru, G.D.; Bellosi, A. Fabrication and Characterization of Polymer-Derived  $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O-ZrO}_2$  Nanocomposite Ceramics *J Mater Sci* **28** (1993) 6437-41

Komarneni, S.; Roy, R.; Selvaraj, U.; Malla, P.B.; Breval, E. Nanocomposite Aerogels - The  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  System *J Mater Res* **8** (1993) 3163-7

Moet, A.S.; Akelah, A. Polymer-Clay Nanocomposites - Polystyrene Grafted Onto Montmorillonite Interlayers *Mater Lett* **18** (1993) 97-102

Chaffron, L.; Chen, Y.; Martin, G. Preparation of Nanocomposites by Reactive Milling *Ann Chim-Sci Mat* **18** (1993) 395-402

Nakahira, A.; Sekino, T.; Suzuki, Y.; Niihara, K. High-Temperature Creep and Deformation Behaviour of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$  Nanocomposites *Ann Chim-Sci Mat* **18** (1993) 403-8

Stiegman, A.E.; Eckert, H.; Plett, G.; Kim, S.S.; Anderson, M.; Yavrouian, A. Vanadia/Silica Xerogels and Nanocomposites *Chem Mater* **5** (1993) 1591-4

#### **1994 rok**

Kasemann, R.; Schmidt, H. Coatings for mechanical and chemical protection based on organic-inorganic sol-gel nanocomposites *New J Chem* **18** (1994) 1117-23

Krug, H.; Schmidt, H. Organic-inorganic nanocomposites for micro optical applications *New J Chem* **18** (1994) 1125-34

Zhu, Y.T.T.; Manthiram, A. A New Route for the Synthesis of Tungsten Carbide Cobalt Nanocomposites *J Amer Ceram Soc* **77** (1994) 2777-8

Roy, S.; Chakravorty, D. Electrical Properties of Sol-Gel-Derived Glass Metal Nanocomposites *J Phys-Condens Matter* **6** (1994) 8599-605

Messersmith, P.B.; Giannelis, E.P. Synthesis and characterization of layered silicate-epoxy nanocomposites *Chem Mater* **6** (1994) 1719-25

Zhu, Y.J.; Qian, Y.T.; Zhang, M.W.; Chen, Z.Y.; Zhou, G.E. gamma-Radiation Sol-Gel Synthesis of Glass-Metal Nanocomposites *J Mater Chem* **4** (1994) 1619-20

Yamamoto, T.; Shull, R.D.; Bandaru, P.R.; Cosandey, F.; Hahn, H.W. Superparamagnetic nanocomposite of silver/iron-oxide by inert gas condensation *Jpn J Appl Phys Pt 2* **33** (1994) L1301-3

Butterworth, M.D.; Armes, S.P.; Simpson, A.W. Synthesis of poly(pyrrole)-silica-magnetite nanocomposite particles *J Chem Soc Chem Commun* (1994) 2129-30

Scanlon, M.R.; Cammarata, R.C. Mechanical properties of nanocomposite granular metal thin films *J Appl Phys* **76** (1994) 3387-93

Roy, B.; Roy, S.; Chakravorty, D. Electrical properties of glass-metal nanocomposites synthesized by electrodeposition and ion exchange/reduction techniques *J Mater Res* **9** (1994) 2677-87

Rong, Z.Y.; Abraizov, M.; Dorfman, B.; Strongin, M.; Yang, X.Q.; Yan, D.; Pollak, F.H. Scanning Tunneling Microscopy of Diamond-Like Nanocomposite Films *Appl Phys Lett* **65** (1994) 1379-81

Wang, J.P.; Luo, H.L. Preparation and Properties of Pure Nanocomposite Fe-SiO<sub>2</sub> Using the Sol-Gel Method *J Magn Magn Mater* **131** (1994) 54-60

Kyprianidouleodidou, T.; Caseri, W.; Suter, U.W. Size variation of PbS particles in high-refractive-index nanocomposites *J Phys Chem* **98** (1994) 8992-7

Osso, D.; Lecaer, G.; Begincolin, S.; Mocellin, A.; Matteazzi, P. Synthesis of alumina-metal nanocomposites by mechanical alloying *J Phys IV* **3** (1993) 1407-12

Roy, S.; Chakravorty, D. Electrical Conduction in Composites of Nanosized Iron Particles and Oxide Glasses *J Mater Res* **9** (1994) 2314-8



Huo, Q.S.; Margolese, D.I.; Ciesla, U.; Demuth, D.G.; Feng, P.Y.; Gier, T.E.; Sieger, P.; Firouzi, A.; Chmelka, B.F.; Schuth, F.; Stucky, G.D. Organization of Organic Molecules with Inorganic Molecular Species into Nanocomposite Biphase Arrays *Chem Mater* **6** (1994) 1176-91

Piciacchio, A.; Lee, S.H.; Messing, G.L. Processing and Microstructure Development in Alumina-Silicon Carbide Intragranular Particulate Composites *J Amer Ceram Soc* **77** (1994) 2157-64

Nawa, M.; Yamazaki, K.; Sekino, T.; Niihara, K. A New Type of Nanocomposite in Tetragonal Zirconia Polycrystal Molybdenum System *Mater Lett* **20** (1994) 299-304

Ogawa, M. Formation of novel oriented transparent films of layered silica-surfactant nanocomposites *J Am Chem Soc* **116** (1994) 7941-2

Rousset, A. Alumina-Metal (Fe, Cr, Fe<sub>0.8</sub>Cr<sub>0.2</sub>) Nanocomposites *J Solid State Chem* **111** (1994) 164-71

Chang, S.Y.; Liu, L.; Asher, S.A. Preparation and properties of tailored morphology, monodisperse colloidal silica cadmium sulfide nanocomposites *J Am Chem Soc* **116** (1994) 6739-44

Jiang, Z.P.; Rhine, W.E. Synthesis and Pyrolysis of Novel Polymeric Precursors to TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and AlN/TiN Nanocomposites *Chem Mater* **6** (1994) 1080-6

Nawa, M.; Sekino, T.; Niihara, K. Fabrication and Mechanical Behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Mo Nanocomposites *J Mater Sci* **29** (1994) 3185-92

Maeda, S.; Armes, S.P. Preparation and Characterisation of Novel Polypyrrole-Silica Colloidal Nanocomposites *J Mater Chem* **4** (1994) 935-42

Wei, G.; Hadjipanayis, G.C.; Krause, R.F. Mechanically Alloyed Nanocomposite Magnets *J Appl Phys* **75** (1994) 6649-51

Shull, R.D.; Kerch, H.M.; Ritter, J.J. Magnetic Properties of Colloidal Silica - Potassium Silicate Gel Iron Nanocomposites *J Appl Phys* **75**

(1994) 6840-2

Gonsalves, K.E.; Chow, G.M.; Zhang, Y.; Budnick, J.I.; Xiao, T.D. Iron Nitride Boron Nitride Magnetic Nanocomposite Powders *Advan Mater* **6** (1994) 291-2

Lu, S.G.; Xie, Q.Y.; Zhang, L.Y.; Yao, X. Preparation and Quantum Size Effect of Semiconductor CdS Doped Silica Glass 0-3 Nanocomposites Through Sol-Gel Process *Chin Sci Bull* **39** (1994) 96-100

Takacs, L.; Pardaviihorvath, M. Nanocomposite Formation in the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Zn System by Reaction Milling *J Appl Phys* **75** (1994) 5864-6

Linderoth, S.; Pedersen, M.S. Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposites Prepared by High-Energy Ball Milling *J Appl Phys* **75** (1994) 5867-9

Chen, D.Y.; Patel, S.; Shaw, D.T. Effect of Magnetic Particle Chain Formation on the Entropy Change in Superparamagnetic Nanocomposite Systems *J Magn Magn Mater* **134** (1994) 75-8

Gourbilleau, F.; Maupas, H.; Hillel, R.; Chermant, J.L. Silicon Carbide - Titanium Carbide Nanocomposites - Microstructural Investigation *Mater Res Bull* **29** (1994) 673-80

Lee, M.H.; Chang, I.T.H.; Dobson, P.J.; Cantor, B. Microstructural Characterization of Nanocomposite Thin Films of Ag-SiO<sub>2</sub>, Ag-ZnO and Ag-Si *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **179** (1994) 545-51

Watzke, H.J.; Dieschbourg, C. Novel Silica-Biopolymer Nanocomposites - The Silica Sol Gel Process in Biopolymer Organogels *Advan Colloid Interface Sci* **50** (1994) 1-14

Lecaer, G.; Pontes, R.D.; Osso, D.; Begincolin, S.; Matteazzi, P. Mechanical Alloying of Compounds and Nanocomposites *J Phys IV* **4** (1994) 233-41

Paine, R.T.; Janik, J.F.; Fan, M. Some Recent Developments in Precursor Routes to Ceramic Nanocomposites *Polyhedron* **13** (1994) 1225-32

Lan, T.; Kaviratna, P.D.; Pinnavaia, T.J. On the Nature of Polyimide-Clay Hybrid Composites *Chem Mater* **6** (1994) 573-5

Wang, M.S.; Pinnavaia, T.J. Clay Polymer Nanocomposites Formed from Acidic Derivatives of Montmorillonite and an Epoxy Resin *Chem Mater* **6** (1994) 468-74

Cauchetier, M.; Croix, O.; Herlin, N.; Luce, M. Nanocomposite Si/C/N Powder Production by Laser-Aerosol Interaction *J Amer Ceram Soc* **77** (1994) 993-8

Lee, H.L.; Lee, H.S. Preparation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> Nanocomposite Powder *J Mater Sci Lett* **13** (1994) 316-8

Judeinstein, P.; Oliveira, P.W.; Krug, H.; Schmidt, H. Dynamics of the Sol-Gel Transition in Organic Inorganic Nanocomposites *Chem Phys Lett* **220** (1994) 35-9

Challier, T.; Slade, R.C.T. Nanocomposite Materials - Polyaniline-Intercalated Layered Double Hydroxides *J Mater Chem* **4** (1994) 367-71

Cammarata, R.C. Mechanical Properties of Nanocomposite Thin Films *Thin Solid Films* **240** (1994) 82-7

Simunovich, D.; Schlesinger, M.; Snyder, D.D. Electrochemically Layered Copper-Nickel Nanocomposites with Enhanced Hardness *J Electrochem Soc* **141** (1994) L10-1

Levin, I.; Kaplan, W.D.; Brandon, D.G.; Wieder, T. Residual Stresses in Alumina-SiC Nanocomposites *Acta Metall Mater* **42** (1994) 1147-54

Kador, L.; Fischer, R.; Kasemann, R.; Bruck, S.; Durr, H. Fine Structure in the chi(2) Signals of Inorganic-Organic Nanocomposites *J Appl Phys* **75** (1994) 2709-11

Nagarajan, R.; Chattopadhyay, K. Intermetallic Ti<sub>2</sub>Ni/TiNi Nanocomposite by Rapid Solidification *Acta Metall Mater* **42** (1994) 947-58

Cassagneau, T.; Hix, G.B.; Jones, D.J.; Mairelestorres, P.; Rhomari, M.; Roziere, J. Nano-Nanocomposite Systems - Insitu Growth of Particles and Clusters of Semiconductor Metal Sulfides in Porous Silica-Pillared Layered Phosphates *J Mater Chem* **4** (1994) 189-95

Laurent, C.; Demai, J.J.; Rousset, A.; Kannan, K.R.; Rao, C.N.R. Fe-Cr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Metal-Ceramic Composites - Nature and Size of the Metal Particles Formed During Hydrogen Reduction *J Mater Res* **9** (1994) 229-35

Bidan, G.; Jarjays, O.; Fruchart, J.M.; Hannecart, E. New Nanocomposites Based on "Tailor Dressed" Magnetic Particles in a Polypyrrole Matrix *Advan Mater* **6** (1994) 152-5

Lemmon, J.P.; Lerner, M.M. Preparation and Characterization of Nanocomposites of Polyethers and Molybdenum Disulfide *Chem Mater* **6** (1994) 207-10

Chow, G.M.; Xiao, T.D.; Chen, X.; Gonsalves, K.E. Compositional and Thermal Effects on Chemically Processed AlN-BN Nanocomposite Powders *J Mater Res* **9** (1994) 168-75

Niihara, K.; Unal, N.; Nakahira, A. Mechanical Properties of (Y-TZP)-Alumina Silicon Carbide Nanocomposites and the Phase Stability of Y-TZP Particles in It *J Mater Sci* **29** (1994) 164-8

Lacroix, P.G.; Clement, R.; Nakatani, K.; Zyss, J.; Ledoux, I. Stilbazolium-MPS(3) Nanocomposites with Large 2nd-Order Optical Nonlinearity and Permanent Magnetization *Science* **263** (1994) 658-60

Tagaya, H.; Sato, S.; Kuramoto, N.; Kadokawa, J.I.; Karasu, M.; Chiba, K. Intercalation chemistry of aluminium dihydrogentriphosphate with weak bases and polymerization of aniline between its layers *J Inclusion Phenom Mol Recogn* **18** (1994) 193-204

Morup, S. Superparamagnetism and Spin Glass Ordering in Magnetic Nanocomposites *Europhys Lett* **28** (1994) 671-6

Kato, N.; Motohiro, T.; Hioki, T.; Noda, S. CdS-CdTe anisotropic

nanocomposites as photovoltaic substance *Solar Energ Mater Solar Cells* **35** (1994) 285-92

Lan, T.; Pinnavaia, T.J. Clay Reinforced Epoxy Nanocomposites *Chem Mater* **6** (1994) 2216-9

Liu, D.M.; Fu, C.T. Heat conduction in ionic polycrystalline "nanocomposites" *J Mater Sci Lett* **13** (1994) 1697-8

Schmidt, H. Multifunctional inorganic-organic composite sol-gel coatings for glass surfaces *J Non-Cryst Solids* **178** (1994) 302-12

Uvarov, N.F.; Bokhonov, B.B.; Isupov, V.P.; Hairetdinov, E.F. Nanocomposite ionic conductors in the  $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$  system *Solid State Ionics* **74** (1994) 15-27

Malhotra, S.S.; Liu, Y.; Shen, J.X.; Lieu, S.H.; Sellmyer, D.J. Thickness dependence of the magnetic and electrical properties of Fe:SiO<sub>2</sub> nanocomposite films *J Appl Phys* **76** (1994) 6304-6

Giri, A.K.; Dejulian, C.; Gonzalez, J.M. Coercivity of Fe-SiO<sub>2</sub> nanocomposite materials prepared by ball milling *J Appl Phys* **76** (1994) 6573-5

Withanawasam, L.; Murphy, A.S.; Hadjipanayis, G.C.; Krause, R.F. Nanocomposite R<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B/Fe exchange coupled magnets *J Appl Phys* **76** (1994) 7065-7

Blanco, E.; Litran, R.; Ramirezdelsolar, M.; Delarosafox, N.; Esquivias, L. 1994 CdS-silica xerogel nanocomposites: Processing-induced textural changes *J Mater Res* **9** (1994) 2873-7

Kumar, K.N.P. Porous nanocomposites as catalyst supports .1. 'Second phase stabilization', thermal stability and anatase-to-rutile transformation in titania-alumina nanocomposites *Appl Catal A-Gen* **119** (1994) 163-83

Jenekhe, S.A.; Osaheni, J.A. Enhancement of Luminescence in Polymer Nanocomposites *Chem Mater* **6** (1994) 1906-9

Han, Y.; Voiles, E.T.; Chumbley, L.S.; Akinc, M.; Naiini, A.A.; Verkade, J.G. Synthesis and characterization of zinc sulfide gallium phosphide nanocomposite powders *J Amer Ceram Soc* **77** (1994) 3153-60

Rouxel, T.; Wakai, F.; Sakaguchi, S. R-curve behavior and stable crack growth at elevated temperature (1500 degrees 1650 degrees C) in a  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$  nanocomposite *J Amer Ceram Soc* **77** (1994) 3237-43

Ohji, T.; Nakahira, A.; Hirano, T.; Niihara, K. Tensile creep behavior of alumina silicon carbide nanocomposite *J Amer Ceram Soc* **77** (1994) 3259-62

Koshizaki, N.; Yasumoto, K.; Terauchi, S.Y. Characterization of CoO-doped  $\text{SiO}_2$  nanocomposite films and their optical transmittance change by nitrogen oxide *Jpn J Appl Phys Pt 2* **34** (1994) 119-21

Becze, C.E.; Bragg, J.P.; Xu, G. The effect of mixing rate on the synthesis of organoceramics *J Phys Chem Solids* **55** (1994) 1529-34

### **1995 rok**

Maeda, S.; Armes, S.P., Surface area measurements on conducting polymer-inorganic oxide nanocomposites *Synthetic Metal* **73** (1995) 151-155

Searson, P.C.; Cammarata, R.C.; Chien, C.L., Electrochemical processing of metallic nanowire arrays and nanocomposites *J Electron Mater* **24** (1995) 955-960

Lences, Z.; Bellosi, A.; Monteverde, F., Factors influencing the crystallization and the densification of ultrafine Si/N/C powders *Mater Chem Phys* **41**(1995) 46-54

Cheung, C.; Djuanda, F.; Erb, U.; Palumbo, G., Electrodeposition of nanocrystalline Ni-Fe alloys *Nanostruct Mater* **5** (1995) 513-523

Valiyev, R.Z.; Korznikov, A.V.; Izyumova, A.I.; Sevastyanova, I.G., Metallo-ceramic nanocomposites prepared by intensive plastic deformation *Fiz Metal Metalloved* **78** (1995) 109-113

Burnside, S.D.; Giannelis, E.P., Synthesis and properties of new poly(dimethylsiloxane) nanocomposites *Chem Mater* **7** (1995) 1597-1600

Butterworth, M.D.; Corradi, R.; Johal, J.; Lascelles, S.F.; Maeda, S.; Armes, S.P., Zeta potential measurements on conducting polymer-inorganic oxide nanocomposite particles *J Colloid Interface Sci* **174** (1995) 510-517

Lemmon, J.P.; Wu, J.H.; Oriakhi, C.; Lerner, M.M., Preparation of nanocomposites containing poly(ethylene oxide) and layered solids *Electrochim Acta* **40** (1995) 2245-2249

Favier, V.; Chanzy, H.; Cavaille, J.Y., Polymer nanocomposites reinforced by cellulose whiskers *Macromolecules* **28** (1995) 6365-6367

Tagaya, H.; Takeshi, K.; Ara, K.; Kadokawa, J.; Karasu, M.; Chiba, K., Preparation of new organic-inorganic nanocomposite by intercalation of organic compounds into MoO<sub>3</sub> by ultrasound *Mater Res Bull* **30** (1995) 1161-1171

Prabhu, G.B.; Bourell, D.L., Abnormal grain growth in alumina-zirconia nanocomposites *Nanostruct Mater* **5** (1995) 727-732

Wang, J.P.; Han, D.H.; Luo, H.L.; Lu, Q.X.; Sun, Y.W., Study on the coercivity of granular solid iron *Appl Phys A-Mat Sci Process* **61** (1995) 407-413

Deakin, L.; Denauwer, C.; Revol, J.F.; Andrews, M.P., Isotactic poly(2-vinylpyridine), coordination polymers, and magnetic nanocomposites from chromium atoms *J Am Chem Soc* **117** (1995) 9915-9916

Flitton, R.; Johal, J.; Maeda, S.; Armes, S.P. Synthesis of colloidal dispersions of polypyrrole-silica nanocomposites using "stringy" silica particles *J Colloid Interface Sci* **173** (1995) 135-142

Maeda, S.; Gill, M.; Armes, S.P. Surface characterization of conducting polymer-silica nanocomposites by X-ray photoelectron spectroscopy

*Langmuir* **11** (1995) 1899-904

Kundu, T.K.; Chakravorty, D. Nanocomposite films of lead zirconate titanate and metallic nickel by sol-gel route *Appl Phys Lett* **66** (1995) 3576-8

Asokakumar, P.; Dorfman, B.F.; Abraizov, M.G.; Yan, D.; Pollak, F.H. Positron annihilation studies of diamondlike nanocomposite films *J Vac Sci Technol A* **13** (1995) 1044-7

Richards, M.R.; Richards, A.C.; Taya, M.; Ohuchi, F.S. Thermomechanical and chemical properties of SiC-C functionally gradient coatings on graphite *J Vac Sci Technol A* **13** (1995) 1196-201

Fang, J.X.; Chan, H.M.; Harmer, M.P. Residual stress relaxation behavior in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC nanocomposite *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **195** (1995) 163-7

Douglas, T.; Dickson, D.P.E.; Betteridge, S.; Charnock, J.; Garner, C.D.; Mann, S. Synthesis and structure of an iron(III) sulfide-ferritin bioinorganic nanocomposite *Science* **269** (1995) 54-7

Zachariah, M.R.; Aquino, M.I.; Shull, R.D.; Steel, E.B. Formation of superparamagnetic nanocomposites from vapor phase condensation in a flame *Nanostruct Mater* **5** (1995) 383-92

Krawiec, W.; Scanlon, L.G.; Fellner, J.P.; Vaia, R.A.; Giannelis, E.P. Polymer nanocomposites: A new strategy for synthesizing solid electrolytes for rechargeable lithium batteries *J Power Sources* **54** (1995) 310-5

Ajayan, P.M.; Stephan, O.; Redlich, P.; Colliex, C. Carbon nanotubes as removable templates for metal oxide nanocomposites and nanostructures *Nature* **375** (1995) 564-7



Godovski, D.Y. Electron behavior and magnetic properties of polymer nanocomposites *Thermal and Electrical Conductivity of Polymer Materials* **119** (1995) 79-122

Oriakhi, C.O.; Lerner, M.M. Poly(pyrrole) and poly(thiophene)/clay nanocomposites via latex-colloid interaction *Mater Res Bull* **30** (1995) 723-9

Chen, D.Y.; Patel, S.; Shaw, D.T. A numerical investigation of entropy changes in superparamagnetic nanocomposite systems *J Magn Magn Mater* **146** (1995) 175-81

Burnam, K.J.; Carpenter, J.P.; Lukehart, C.M.; Milne, S.B.; Stock, S.R.; Jones, B.D.; Glosser, R.; Wittig, J.E. Nanocomposites containing nanoclusters of Ag, Co, Pt, Os, Co<sub>3</sub>C, Fe<sub>2</sub>P, Ni<sub>2</sub>P, Ge, or Pt/Sn *Nanostruct Mater* **5** (1995) 155-69

Pachecomalagon, G.; Garcaborquez, A.; Coster, D.; Sklyarov, A.; Petit, S.; Fripiat, J.J. TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites *J Mater Res* **10** (1995) 1264-9

Maya, L.; Allen, W.R.; Glover, A.L.; Mabon, J.C. Gold nanocomposites *J Vac Sci Technol B* **13** (1995) 361-5

Chan, P.; Chuaanusorn, W.; Nesterova, M.; Sipos, P.; Stpierre, T.G.; Ward, J.; Webb, J. Organic-inorganic nanocomposites based on iron-containing clusters and biomolecules *Aust J Chem* **48** (1995) 783-92

Messersmith, P.B.; Giannelis, E.P. Synthesis and barrier properties of poly(epsilon-caprolactone)-layered silicate nanocomposites *J Polym Sci A-Polym Chem* **33** (1995) 1047-57

Maeda, S.; Corradi, R.; Armes, S.P. Synthesis and characterization of carboxylic acid-functionalized polypyrrole-silica microparticles *Macromolecules* **28** (1995) 2905-11

Lemmon, J.P.; Lerner, M.M. Preparation of nanocomposites of poly(ethylene oxide) with TiS<sub>2</sub> *Solid State Commun* **94** (1995) 533-7

Riedel, R.; Kleebe, H.J.; Schonfelder, H.; Aldinger, F. A covalent micro nanocomposite resistant to high-temperature oxidation *Nature* **374** (1995) 526-8

Wilson, A.M.; Way, B.M.; Dahn, J.R.; Vanbuuren, T. Nanodispersed silicon in pregraphitic carbons *J Appl Phys* **77** (1995) 2363-9

Thompson, A.M.; Chan, H.M.; Harmer, M.P.; Cook, R.F. Crack healing and stress relaxation in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC nanocomposites *J Amer Ceram Soc* **78** (1995) 567-71

Messersmith, P.B.; Stupp, S.I. High temperature chemical and microstructural transformations of a nanocomposite organoceramic *Chem Mater* **7** (1995) 454-60

Ding, Y.; Jones, D.J.; Mairelestorres, P.; Roziere, J. Two dimensional nanocomposites: Alternating inorganic organic polymer layers in zirconium phosphate *Chem Mater* **7** (1995) 562-71

Jarjays, O.; Fries, P.H.; Bidan, G. New nanocomposites of polypyrrole including gamma-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles: Electrical and magnetic characterizations *Synthetic Metal* **69** (1995) 343-4

Maeda, S.; Armes, S.P. Polypyrrole-tin (IV) oxide colloidal nanocomposites *Synthetic Metal* **69** (1995) 499-500

Vaia, R.A.; Vasudevan, S.; Krawiec, W.; Scanlon, L.G.; Giannelis, E.P. New polymer electrolyte nanocomposites: Melt intercalation of poly(ethylene oxide) in Mica-type silicates *Advan Mater* **7** (1995) 154-6

Ruizhitzky, E.; Aranda, P.; Casal, B.; Galvan, J.C. Nanocomposite materials with controlled ion mobility *Advan Mater* **7** (1995) 180-4

Barker, C.P.; Kochem, K.H.; Revell, K.M.; Kelly, R.S.A.; Badyal, J.P.S. The interfacial chemistry of metallized, oxide coated, and nanocomposite coated polymer films *Thin Solid Films* **257** (1995) 77-82

Sakka, Y.; Bidinger, D.D.; Aksay, I.A. Processing of silicon carbide-mullite-alumina nanocomposites *J Amer Ceram Soc* **78** (1995) 479-86

Kumar, K.N.P. Growth of rutile crystallites during the initial stage of anatase to rutile transformation in pure titania and in titania alumina nanocomposites *Scr Metall Mater* **32** (1995) 873-7

Wilson, A.M.; Dahn, J.R. Lithium insertion in carbons containing nanodispersed silicon *J Electrochem Soc* **142** (1995) 326-32

Wang, J.; Ponton, C.B.; Marquis, P.M. Thermal stability of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-5 vol % SiC nanocomposite *J Mater Sci* **30** (1995) 321-33

Akelah, A.; Eldeen, N.S.; Hiltner, A.; Baer, E.; Moet, A. Organophilic rubber - Montmorillonite nanocomposites *Mater Lett* **22** (1995) 97-102

Levin, I.; Kaplan, W.D.; Brandon, D.G. Effect of SiC submicrometer particle size and content on fracture toughness of alumina-SiC "nanocomposites" *J Amer Ceram Soc* **78** (1995) 254-6

Maeda, S.; Armes, S.P. Preparation and characterization of polypyrrole tin(IV) oxide nanocomposite colloids *Chem Mater* **7** (1995) 171-8

Shao, P.L.; Mauritz, K.A.; Moore, R.B. [Perfluorosulfonate ionomer] [mixed inorganic oxide] nanocomposites via polymer in situ sol-gel chemistry *Chem Mater* **7** (1995) 192-200

Carpenter, J.P.; Lukehart, C.M.; Stock, S.R.; Wittig, J.E. Formation of a nanocomposite containing particles of Co<sub>3</sub>C from a single-source precursor poud to a silica xerogel host matrix *Chem Mater* **7** (1995) 201-5

Oberle, R.R.; Scanlon, M.R.; Cammarata, R.C.; Searson, P.C. Processing and hardness of electrodeposited Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites *Appl Phys Lett* **66** (1995) 19-21

**DODATEK F****Literatura dotycząca nanofaz zebrana w oparciu o Current Contents  
(Physics, Chemistry & Earth)****1991 rok**

Meldrum, F.C.; Wade, V.J.; Nimmo, D.L.; Heywood, B.R.; Mann, S. Synthesis of Inorganic Nanophase Materials in Supramolecular Protein Cages *Nature* **349** (1991) 684-687

Nieman, G.W.; Weertman, J.R.; Siegel, R.W. Mechanical Behavior of Nanocrystalline Cu and Pd *J Mater Res* **6** (1991) 1012-1027

Chang, H.; Hofler, H.J.; Altstetter, C.J.; Averbach, R.S. Synthesis, Processing and Properties of Nanophase TiAl *Scr Metall Mater* **25** (1991) 1161-1166

Siegel, R.W. Cluster-Assembled Nanophase Materials *Annu Rev Mater Sci* **21** (1991) 559-578

**1992 rok**

Uchic, M.; Hofler, H.J.; Flick, W.J.; Tao, R.; Kurath, P.; Averbach, R.S. Sinter-Forging of Nanophase TiO<sub>2</sub> *Scr Metall Mater* **26** (1992) 791-796

Suryanarayana, C.; Froes, F.H. The Structure and Mechanical Properties of Metallic Nanocrystals *Met Trans A-Phys Met Mater Sc* **23** (1992) 1071-1081

Siegel, R.W.; Thomas, G.J. Grain Boundaries in Nanophase Materials *Ultramicroscopy* **40** (1992) 376-384

Chang, H.; Hofler, J.; Altstetter, C.; Averbach, R. Synthesis, Processing and Properties of Nanophase Aluminide *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **153** (1992) 676-678

Hackley, V.A.; Anderson, M.A.; Spooner, S. A Small-Angle X-Ray

Scattering Study of Microstructure Evolution During Sintering of Sol-Gel-Derived Porous Nanophase Titania *J Mater Res* **7** (1992) 2555-2571

Beck, D.D.; Siegel, R.W. The Dissociative Adsorption of Hydrogen Sulfide over Nanophase Titanium Dioxide *J Mater Res* **7** (1992) 2840-2845

Chang, H.; Altstetter, C.J.; Averback, R.S. Characteristics of Nanophase TiAl Produced by Inert Gas Condensation *J Mater Res* **7** (1992) 2962-2970

Samulski, E.T.; Desimone, J.M.; Hunt, M.O.; Menciloglu, Y.Z.; Jarnagin, R.C.; York, G.A.; Labat, K.B.; Wang, H. Flagellenes - Nanophase-Separated, Polymer-Substituted Fullerenes *Chem Mater* **4** (1992) 1153-1157

Davis, R.J. Synthesis and Characterization of VPI-5 Supported TiO<sub>2</sub> Clusters *Chem Mater* **4** (1992) 1410-1415

### **1993 rok**

Bush, M.B. Modelling of Nanophase Materials *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **161** (1993) 127-134

Trovarelli, A.; Matteazzi, P.; Dolcetti, G.; Lutman, A.; Miani, F. Nanophase Iron Carbides as Catalysts for Carbon Dioxide Hydrogenation *Appl Catal A-Gen* **95** (1993) L9-L13

Kim, L.S.; Chang, H.; Averback, R.S. Nanophase Processing of Amorphous Alloys *J Alloys Compounds* **194** (1993) 245-249

Siegel, R.W. Nanophase Materials Assembled from Atom Clusters *Mater Sci Eng B-Solid State* **19** (1993) 37-43

Pluym, T.C.; Lyons, S.W.; Powell, Q.H.; Gurav, A.S.; Kodas, T.T.; Wang, L.M.; Glicksman, H.D. Palladium Metal and Palladium Oxide Particle Production by Spray Pyrolysis *Mater Res Bull* **28** (1993) 369-376

Zhou, Y.C.; Rahaman, M.N. Hydrothermal Synthesis and Sintering of Ultrafine CeO<sub>2</sub> Powders *J Mater Res* **8** (1993) 1680-1686

Bourell, D.L.; Parimal; Kaysser, W. Sol Gel Synthesis of Nanophase Ytria-Stabilized Tetragonal Zirconia and Densification Behavior Below 1600-K *J Amer Ceram Soc* **76** (1993) 705-711

Zeng, D.; Hampdensmith, M.J. Synthesis and Characterization of Nanophase Group-6 Metal (M) and Metal Carbide ( $M_2C$ ) Powders by Chemical Reduction Methods *Chem Mater* **5** (1993) 681-689

Foster, C.M.; Bai, G.R.; Parker, J.C.; Ali, M.N. X-Ray and Micro-Raman Analysis of Nanophase  $ZrO_2$  and  $Y_2O_3-ZrO_2$  Produced by the Gas-Phase Condensation Technique *J Mater Res* 1993 **8** 1977-1982

Mayo, M.J.; Hague, D.C.; Chen, D.J. Processing Nanocrystalline Ceramics for Applications in Superplasticity *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **166** (1993) 145-159

Wang, L.M.; Birtcher, R.C.; Ewing, R.C. Ion Irradiation-Induced Nano-Scale Polycrystallization of Intermetallic and Ceramic Materials *Nucl Instrum Meth Phys Res B* **80-1** Part 2 (1993) 1109-1113

Basset, D.; Matteazzi, P.; Miani, F. Designing a High Energy Ball-Mill for Synthesis of Nanophase Materials in Large Quantities *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **168** (1993) 149-152

Miani, F.; Matteazzi, P.; Dolcetti, G.; Lutman, A.; Trovarelli, A. Catalytic Properties of Mechanothesized Nanophase Iron Carbides *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **168** (1993) 153-155

Siegel, R.W. Synthesis and Properties of Nanophase Materials *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **168** (1993) 189-197

Zhao, J.; Huggins, F.E.; Feng, Z.; Lu, F.L.; Shah, N.; Huffman, G.P. Structure of a Nanophase Iron Oxide Catalyst *J Catal* **143** (1993) 499-509

Feng, Z.; Zhao, J.; Huggins, F.E.; Huffman, G.P. Agglomeration and Phase Transition of a Nanophase Iron Oxide Catalyst *J Catal* **143** (1993) 510-519

Sarkas, H.W.; Arnold, S.T.; Hendricks, J.H.; Kidder, L.H.; Jones, C.A.; Bowen, K.H. An Investigation of Catalytic Activity in Mixed Metal Oxide Nanophase Materials *Z Phys D-Atoms Mol Clusters* **26** (1993) 46-50

Shelden, R.A.; Meier, L.P.; Caseri, W.R.; Suter, U.W.; Hermann, R.; Muller, M. Nanophases Consisting of Individual Polystyrene Molecules on Mica Imaged with Scanning Electron Microscopy *Acta Polym* **44** (1993) 206-207



Morris, R.V.; Golden, D.C.; Bell, J.F.; Lauer, H.V.; Adams, J.B. Pigmenting Agents in Martian Soils - Inferences from Spectral, Mossbauer, and Magnetic Properties of Nanophase and Other Iron Oxides in Hawaiian Palagonitic Soil PN-9 *Geochim Cosmochim Acta* **57** (1993) 4597-4609

Meldrum, F.C.; Heywood, B.R.; Mann, S. Influence of Membrane Composition on the Intravesicular Precipitation of Nanophase Gold Particles *J Colloid Interface Sci* **161** (1993) 66-71

Su, F.; Wu, X.J.; Qin, X.Y.; Xie, B. Ionic Conduction of Nanophase Solid  $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$  *Chin Sci Bull* **38** (1993) 1518-1522

Siegel, R.W. Exploring Mesoscopia - The Bold New World of Nanostructures *Phys Today* **46** (1993) 64-68

Dutta, P.K.; Gallagher, P.K.; Twu, J. Raman Spectroscopic Study of the Formation of Barium Titanate from an Oxalate Precursor *Chem Mater* **5** (1993) 1739-1743

Davanloo, F.; Lee, T.J.; Park, H.; You, J.H.; Collins, C.B. Protective Films of Nanophase Diamond Deposited Directly on Zinc Sulfide Infrared Optics *J Mater Res* **8** (1993) 3090-3099

Albertini, G.; Carsughi, F.; Casale, C.; Fiori, F.; Lamonaca, A.; Musci, M. X-Ray and Neutron Small-Angle Scattering Investigation of Nanophase Vanadium Titanium Oxide Particles *Phil Mag B* **68** (1993) 949-955

Bonetti, E.; Valdre, G. Anelastic and Thermal Properties of Nanostructured Aluminium Prepared by Mechanical Attrition *Phil Mag B* **68** (1993) 967-977

Banin, A.; Benschlomo, T.; Margulies, L.; Blake, D.F.; Mancinelli, R.L.; Gehring, A.U. The Nanophase Iron Mineral(S) in Mars Soil *J Geophys Res-Planets* **98** (1993) 20831-20853

Li, D.X.; Ping, D.H.; Ye, H.Q.; Qin, X.Y.; Wu, X.J. HREM Study of the Microstructure in Nanocrystalline Materials *Mater Lett* **18** (1993) 29-34

**1994 rok**

Liu, Z.F.; Davis, R.J. Investigation of the Structure of Microporous Ti-Si Mixed Oxides by X-Ray, UV Reflectance, FT-Raman, and FT-IR Spectroscopies *J Phys Chem* **98** (1994) 1253-1261

Eastman, J.A. Microstructural Development in Nanophase TiO<sub>2</sub> During Annealing *J Appl Phys* **75** (1994) 770-779

Konenkamp, R.; Henninger, R. Recombination in Nanophase TiO<sub>2</sub> Films *Appl Phys A-Solid Surf* **58** (1994) 87-90

Elshall, M.S.; Slack, W.; Vann, W.; Kane, D.; Hanley, D. Synthesis of Nanoscale Metal Oxide Particles Using Laser Vaporization/Condensation in a Diffusion Cloud Chamber *J Phys Chem* **98** (1994) 3067-3070

Sinor, T.W.; Standifird, J.D.; Davanloo, F.; Taylor, K.N.; Hong, C.; Carroll, J.J.; Collins, C.B. Mossbauer Effect Measurement of the Recoil-Free Fraction for Fe-57 Implanted in a Nanophase Diamond Film *Appl Phys Lett* **64** (1994) 1221-1223

Suits, B.H.; Meng, M.; Siegel, R.W.; Liao, Y.X. Study of Cluster-Assembled Nanophase Copper Using NMR *J Mater Res* **9** (1994) 336-342

Andrievski, R.A. Nanocrystalline High Melting Point Compound-Based Materials *J Mater Sci* **29** (1994) 614-631

Kar, A.; Mazumder, J. Mathematical Model for Laser Ablation to Generate Nanoscale and Submicrometer-Size Particles *Phys Rev E* **49** (1994) 410-419

Liu, X.D.; Lu, K.; Ding, B.Z.; Hu, Z.Q. The Lattice Distortion of alpha-Fe(Si) Nanophase *Chin Sci Bull* **39** (1994) 806-809

Shelden, R.A.; Meier, L.P.; Caseri, W.R.; Suter, U.W.; Hermann, R.; Muller, M.; Hegner, M.; Wagner, P. Nanophase Molecular Droplets - Individual Polystyrene Molecules on Mica Imaged with Scanning Electron and Atomic-Force Microscopy *Polymer* **35** (1994) 1571-1575

Zheng, M.S.; Jin, Z.H. Atom Vibration of One-Dimensional Nanophase Materials *Chin Sci Bull* **39** (1994) 382-386

Cheng, H.P.; Landman, U. Controlled Deposition and Glassification of Copper Nanoclusters *J Phys Chem* **98** (1994) 3527-3537

Siegel, R.W. Nanophase Materials *Synthesis, Structure, and Properties Physics of New Materials* **27** (1994) 65-105

Ibrahim, M.M.; Edwards, G.; Seehra, M.S.; Ganguly, B.; Huffman, G.P. Magnetism and Spin Dynamics of Nanoscale FeOOH Particles *J Appl Phys* **75** (1994) 5873-5875

Vazquez, M.; Marin, P.; Davies, H.A.; Olofinjana, A.O. Magnetic Hardening of FeSiBCuNb Ribbons and Wires During the 1st Stage of Crystallization to a Nanophase Structure *Appl Phys Lett* **64** (1994) 3184-3186

Jain, M.; Christman, T. Synthesis, Processing, and Deformation of Bulk Nanophase Fe-28Al-2Cr *Intermetallic Acta Metall Mater* **42** (1994) 1901-1911

Sui, M.L.; Lu, K. Variation in Lattice Parameters with Grain Size of a Nanophase Ni<sub>3</sub>P Compound *Mater Sci Eng A-Struct Mater* **179** (1994) 541-544

Haroponiatowski, E.; Rodrigueztalavera, R.; Delacruzheredia, M.; Canocorona, O.; Arroyomurillo, R. Crystallization of Nanosized Titania Particles Prepared by the Sol-Gel Process *J Mater Res* **9** (1994) 2102-2108

Sattler, K.; Raina, G.; Ge, M.; Venkateswaran, N.; Xhie, J.; Liao, Y.X.; Siegel, R.W. Atomic Force and Scanning Tunneling Microscopy Analysis of Palladium and Silver Nanophase Materials *J Appl Phys* **76** (1994) 546-551

Giorgi, R.; Martelli, S.; Turtu, S.; Zappa, G.; Borsella, E.; Botti, S. Characterization of Nanophase Powders Prepared by Laser Synthesis *Surf Interface Anal* **22** (1994) 248-253

Cui, F.Z.; Wen, H.B.; Zhang, H.B.; Ma, C.L.; Li, H.D. Nanophase Hydroxyapatite-Like Crystallites in Natural Ivory *J Mater Sci Lett* **13** (1994) 1042-1044

Ayyub, P. New Techniques for the Preparation of Nanophase Particles

*Indian J Pure Appl Phys* **32** (1994) 611-615

Radzilowski, L.H.; Stupp, S.I. Nanophase separation in monodisperse rodcoil diblock polymers *Macromolecules* **27** (1994) 7747-7753

Siegel, R.W. What do we really know about the atomic-scale structures of nanophase materials? *J Phys Chem Solids* **55** (1994) 1097-1106

Chen, J.P.; Sorensen, C.M.; Klabunde, K.J.; Hadjipanayis, G.C. Magnetic properties of nanophase cobalt particles synthesized in inversed micelles *J Appl Phys* **76** (1994) 6316-6318

Schulz, R.; Huot, J.Y.; Trudeau, M.L.; Dignardbailey, L.; Yan, Z.H.; Jin, S.; Lamarre, A.; Ghali, E.; Vanneste, A. Nanocrystalline Ni-Mo alloys and their application in electrocatalysis *J Mater Res* **9** (1994) 2998-3008

Curry, J.E.; Zhang, F.S.; Cushman, J.H.; Schoen, M.; Diestler, D.J. Transient coexisting nanophases in ultrathin films confined between corrugated walls *J Chem Phys* **101** (1994) 10824-10832

Burns, R.G.; Fisher, D.S. Nanophase mixed-valence iron minerals in meteorites identified by cryogenic Mossbauer spectroscopy *Hyperfine Interactions* **91** (1994) 571-576

Lu, S.G.; Liu, H.L.; Han, Y.; Zhang, L.Y.; Yao, X. Phase transition of nanophase ferroelectric PbTiO<sub>3</sub> ultrafine powders *Ferroelectrics Lett Sect* **18** (1994) 115-120

### **1995 rok**

Bates, S.E.; Buhro, W.E.; Frey, C.A.; Sastry, S.M.L.; Kelton, K.F., Synthesis of titanium boride TiB<sub>2</sub> nanocrystallites by solution-phase processing *J Mater Res* **10** (1995) 2599-2612

Potter, L.D.; Guzelian, A.A.; Alivisatos, A.P.; Wu, Y., Structure of chemically synthesized nanophase GaAs studied by nuclear magnetic resonance and x-ray diffraction *J Chem Phys* **103** (1995) 4834-4840

Lee, J.; Hwang, J.H.; Mashek, J.J.; Mason, T.O.; Miller, A.E.; Siegel, R.W., Impedance spectroscopy of grain boundaries in nanophase ZnO *J Mater Res* **10** (1995) 2295-2300

Eilers, H.; Tissue, B.M., Synthesis of nanophase ZnO, Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and ZrO<sub>2</sub> by gas-phase condensation with cw-CO<sub>2</sub> laser heating *Mater Lett* **24**

(1995) 261-265

Curry, J.E.; Cushman, J.H., Nanophase coexistence and sieving in binary mixtures confined between corrugated walls *J Chem Phys* **103** (1995) 2132-2139

Chhabra, V.; Pillai, V.; Mishra, B.K.; Morrone, A.; Shah, D.O., Synthesis, characterization, and properties of microemulsion-mediated nanophase TiO<sub>2</sub> particles *Langmuir* **11** (1995) 3307-3311

Franck, M.; Celis, J.P.; Roos, J.R. Microprobe Raman Spectroscopy of TiN Coatings Oxidized by Solar Beam Heat Treatment *J Mater Res* **10** (1995) 119-125

Qin, Z.C.; Liu, Y.; Zhang, Y.; Liu, W.; Wang, W.K. Bulk Nanophase Pd<sub>82</sub>Si<sub>18</sub> Directly Synthesized by High Pressure Quenching from Melt of Alloy *J Mater Sci Lett* **14** (1995) 209-210

Wang, L.N.; Zakharchenko, I.V.; Muhammed, M.; Xu, J.H.; Grishin, A.; Rao, K.V.; Balachandran, U. Nanophase precursors for high-J(c) Ag-clad superconducting BiPbSrCaCuO tapes *Superconduct Sci Technol* **8** (1995) 94-100

Teng, M.H.; Host, J.J.; Hwang, J.H.; Elliott, B.R.; Weertman, J.R.; Mason, T.O.; David, V.P.; Johnson, D.L. Nanophase Ni particles produced by a blown arc method *J Mater Res* **10** (1995) 233-236

Liu, F.Q.; Han, M.; Zhao, J.J.; Chen, X.S.; Wang, Q.; Wang, G.H. Raman scattering from LiF cluster-based nanophase film *Appl Phys Lett* **66** (1995) 523-525

Bell, J.F.; Roush, T.L.; Morris, R.V. Mid-infrared transmission spectra of crystalline and nanophase iron oxides oxyhydroxides and implications for remote sensing of Mars *J Geophys Res-Planets* **100** (1995) 5297-5307

Morris, R.V.; Golden, D.C.; Bell, J.F.; Lauer, H.V. Hematite, pyroxene, and phyllosilicates on Mars: Implications from oxidized impact melt rocks from Manicouagan Crater, Quebec, Canada *J Geophys Res-Planets* **100** (1995) 5319-5328

Dormann, J.L.; Fiorani, D. Nanophase magnetic materials: Size and



interaction effects on static and dynamical properties of fine particles *J Magn Magn Mater* **144** (1995) 415-418

Wang, L.N.; Zhang, Y.; Muhammed, M. Synthesis of nanophase oxalate precursors of YBaCuO superconductor by coprecipitation in microemulsions *J Mater Chem* **5** (1995) 309-314

Scoville, N.; Bajgar, C.; Rolfe, J.; Fleurial, J.P.; Vandersande, J. Thermal conductivity reduction in SiGe alloys by the addition of nanophase particles *Nanostruct Mater* **5** (1995) 207-223

Shirkhanzadeh, M. Fabrication and characterization of alkoxy-derived nanophase TiO<sub>2</sub> coatings *Nanostruct Mater* **5** (1995) 33-40

Zhou, Y.C.; Phillips, R.J.; Switzer, J.A. Electrochemical synthesis and sintering of nanocrystalline cerium(IV) oxide powders *J Amer Ceram Soc* **78** (1995) 981-985

Wang, R.Z.; Cui, F.Z.; Lu, H.B.; Wen, H.B.; Ma, C.L.; Li, H.D. Synthesis of nanophase hydroxyapatite collagen composite *J Mater Sci Lett* **14** (1995) 490-492

Fultz, B.; Kuwano, H.; Ouyang, H. Average widths of grain boundaries in nanophase alloys synthesized by mechanical attrition *J Appl Phys* **77** (1995) 3458-3466

Deng, H.; Qiu, H.; Shi, G. EXAFS of nanophase zirconia stabilized by yttria *Physica B* **209** (1995) 591-592

Lu, K.; Dong, Z.F.; Bakonyi, I.; Cziraki, A. Thermal stability and grain growth of a melt-spun HfNi<sub>5</sub> nanophase alloy *Acta Metall Mater* **43** (1995) 2641-2647

Carsley, J.E.; Ning, J.; Milligan, W.W.; Hackney, S.A.; Aifantis, E.C. A simple, mixtures-based model for the grain size dependence of strength in nanophase metals *Nanostruct Mater* **5** (1995) 441-448

Ping, D.H.; Xie, T.S.; Li, D.X.; Ye, H.Q. High resolution transmission electron microscopy studies of the microstructure of nanocrystalline Ti<sub>70</sub>Ni<sub>20</sub>Si<sub>10</sub> alloy *Nanostruct Mater* **5** (1995) 457-464

Duffey, T.P.; Mcneela, T.G.; Yamamoto, T.; Mazumder, J.; Schawlow,

A.L. Absorption spectroscopic measurements of plume density and temperature in production of nanocrystalline NbAl<sub>3</sub> by laser ablation deposition *Phys Rev B-Condensed Matter* **51** (1995) 14652-14663

Lu, S.G.; Liu, H.L.; Zhang, L.Y.; Yao, X. Phase transition of nanophase ferroelectric PbTiO<sub>3</sub> ultrafine powder *Chin Sci Bull* **40** (1995) 719-723

Rao, N.; Micheel, B.; Hansen, D.; Fandrey, C.; Bench, M.; Girshick, S.; Heberlein, J.; Mcmurry, P. Synthesis of nanophase silicon, carbon, and silicon carbide powders using a plasma expansion process *J Mater Res* **10** (1995) 2073-2084

Balachandran, U.; Siegel, R.W.; Liao, Y.X.; Askew, T.R. Synthesis, sintering, and magnetic properties of nanophase Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> *Nanostruct Mater* **5** (1995) 505-512

Rosales, M.I.; Castano, V.M. High-resolution electron microscopy studies of nanophases in Nd-Fe-B alloys *J Mater Sci* **30** (1995) 3188-3192

Dekany, I.; Turi, L.; Tombacz, E.; Fendler, J.H. Preparation of size-quantized CdS and ZnS particles in nanophase reactors provided by binary liquids adsorbed at layered silicates *Langmuir* **11** (1995) 2285-2292

**DODATEK G****Zawartość pierwszych roczników czasopisma *Nanotechnology*****1990 rok**

Mackenzie, R.A.D.; Smith, G.D.W., Focused ion beam technology: a bibliography, *Nanotechnology* **1** (1990) 163-201

Stankov, P.; Dimitrov, P.; Vasiliev, S., STM for surface structure studies operated at atmospheric air pressure, *Nanotechnology* **1** (1990) 156-62

Savaloni, H.; Player, M.A.; Marr, G.V., Nucleation and growth of erbium clusters on amorphous carbon substrates. II. Rate equation approaches to nucleation kinetics, *Nanotechnology* **1** (1990) 152-5

Savaloni, H.; Player, M.A.; Marr, G.V., Nucleation and growth of erbium clusters on amorphous carbon substrates. I. Cluster size and spatial distribution, *Nanotechnology* **1** (1990) 145-51

Marti, O.; Colchero, J.; Mlynek, J., Combined scanning force and friction microscopy of mica, *Nanotechnology* **1** (1990) 141-4

Luscombe, J.H.; Frensley, W.R., Models for nanoelectronic devices, *Nanotechnology* **1** (1990) 131-40

Newbury, D.E., Microanalysis to nanoanalysis: measuring composition at high spatial resolution, *Nanotechnology* **1** (1990) 103-30

Whitehouse, D.J., Dynamic aspects of scanning surface instruments and microscopes., *Nanotechnology* **1** (1990) 93-102

Tabib-Azar, M., Optically controlled silicon microactuators., *Nanotechnology* **1** (1990) 81-92

Shedd, G.M.; Russell, P., The scanning tunneling microscope as a tool for nanofabrication, *Nanotechnology* **1** (1990) 67-80

Reed, M.A.; Randall, J.N.; Luscombe, J.H., Non-equilibrium quantum

dots: transport, *Nanotechnology* **1** (1990) 63-6

Montgomery, P.C., Nanoscopy: nanometre defect analysis by computer aided 3D optical imaging, *Nanotechnology* **1** (1990) 54-62

- Moller, R.; Baur, C.; Esslinger, A.; Graf, U.; Kurz, P., Voltage dependence of the morphology of the GaAs(110) surface observed by scanning tunnelling microscopy, *Nanotechnology* **1** (1990) 50-3
- Miyamoto, I.; Ezawa, T.; Nishimura, K., Ion beam machining of single-point diamond tools for nano-precision turning, *Nanotechnology* **1** (1990) 44-9
- Garratt, J.D.; Bottomley, S.C., Technology transfer in the development of a nano-topographic instrument, *Nanotechnology* **1** (1990) 38-43
- Futami, S.; Furutani, A.; Yoshida, S., Nanometer positioning and its micro-dynamics, *Nanotechnology* **1** (1990) 31-7
- Downs, M.J., A proposed design for an optical interferometer with sub-nanometric resolution, *Nanotechnology* **1** (1990) 27-30
- Chetwynd, D.G.; Schwarzenberger, D.R.; Bowen, D.K., Two-dimensional X-ray interferometry, *Nanotechnology* **1** (1990) 19-26
- Yoshida, S.; Iizuka, K., Approaches to nanometer technology-a review of the Yoshida Nano-Mechanism Project, *Nanotechnology* **1** (1990) 13-18
- Muller, R.S.; Howe, R.T., Technologies for microdynamic devices, *Nanotechnology* **1** (1990) 8-12

### **1991 rok**

- Nejoh, H.; Smith, D.P.E.; Aono, M., Cyanobiphenyl-group alignment observed by a scanning tunneling microscope, *Nanotechnology* **2** (1991) 214-20. 18 refs.
- Stevens, F.J.; Myatt, E.A., Polymerization of immunoglobulin domains: a model system for the development of facilitated macromolecular assembly, *Nanotechnology* **2** (1991) 206-13
- Lieberman, M.; Tabet, M.; Tahmassebi, D.; Jingli Zhang; Sasaki, T., Self-assembly approach to protein design, *Nanotechnology* **2** (1991) 203-5

Pum, D.; Sara, M.; Messner, P.; Sleytr, U.B., Two-dimensional (glyco)protein crystals as patterning elements for the controlled immobilization of functional molecules, *Nanotechnology* **2** (1991) 196-202

Musgrave, C.B.; Perry, J.K.; Merkle, R.C.; Goddard, W.A., III, Theoretical studies of a hydrogen abstraction tool for nanotechnology, *Nanotechnology* **2** (1991) 187-95

Jelinek, R.; Pines, A.; Ozkar, S.; Ozin, G.A., A study of nanostructure assemblies and guest-host interactions in sodium zeolite-Y using  $^{23}\text{Na}$  double-rotation NMR, *Nanotechnology* **2** (1991) 182-6

Williams, P.M.; Davies, M.C.; Jackson, D.E.; Roberts, C.J.; Tendler, S.J.B.; Wilkins, M.J., Biological applications of scanning tunnelling microscopy: novel software algorithms for the display, manipulation and interpretation of STM data, *Nanotechnology* **2** (1991) 172-81

Heller, M.J.; Tullis, R.H., Self-organizing molecular photonic structures based on functionalized synthetic nucleic acid (DNA) polymers, *Nanotechnology* **2** (1991) 165-71

Connolly, P.; Cooper, J.; Moores, G.R.; Jie Shen; Thompson, G., Development of molecular patterning and immobilization techniques for scanning tunnelling microscopy and atomic force microscopy, *Nanotechnology* **2** (1991) 160-3

Seeman, N.C., The use of branched DNA for nanoscale fabrication, *Nanotechnology* **2** (1991) 149-59

Knight, J.P.; McRae, G.J., A combinatorial optimization approach to molecular design, *Nanotechnology* **2** (1991) 142-8

Merkle, R.C., Computational nanotechnology, *Nanotechnology* **2** (1991) 134-41

Blair, D.F., The bacterial rotary motor, *Nanotechnology* **2** (1991) 123-33

Hoh, J.H.; Revel, J.-P.; Hansma, P.K., Tip-sample interactions in atomic



force microscopy: I. Modulating adhesion between silicon nitride and glass, *Nanotechnology* **2** (1991) 119-22

Drexler, K.E., Molecular directions in nanotechnology, *Nanotechnology* **2** (1991) 113-18

Maivald, P.; Butt, H.J.; Gould, S.A.C.; Prater, C.B.; Drake, B.; Gurley, J.A.; Elings, V.B.; Hansma, P.K., Using force modulation to image surface elasticities with the atomic force microscope, *Nanotechnology* **2** (1991) 103-6

Joachim, C.; Rousset, B.; Schonenberger, C.; Kerrien, A.; Druet, E.; Chevalier, J., Characterization of a titanium nanoscopic wire by STM and SFM, *Nanotechnology* **2** (1991) 96-102

Hosoe, S., Laser interferometric system for displacement measurement with high precision, *Nanotechnology* **2** (1991) 88-95

Birge, R.R.; Lawrence, A.F.; Tallent, J.R., Quantum effects, thermal statistics and reliability of nanoscale molecular and semiconductor devices, *Nanotechnology* **2** (1991) 73-87

Shimokohbe, A.; Aoyama, H., An active air bearing: a controlled-type bearing with ultra-precision, infinite static stiffness, high damping capability and new functions, *Nanotechnology* **2** (1991) 64-71

Nakamura, K.; Sasaoka, T.; Mitsui, M.; Kanamori, M.; Ishihara, Y., An electron-beam lithography system for fabricating optical elements, and patterning-error analysis by the finite-element method, *Nanotechnology* **2** (1991) 57-63

Miyamoto, I.; Ezawa, T.; Itabashi, K., Ion beam fabrication of diamond probes for a scanning tunneling microscope, *Nanotechnology* **2** (1991) 52-6

Kanai, A.; Sano, H.; Yoshioka, J.; Miyashita, M., Positioning of a 200 kg carriage on plain bearing guideways to nanometer accuracy with a force-operated linear actuator, *Nanotechnology* **2** (1991) 43-51

Igata, N.; Yumoto, H.; Higai, K., Dependence of adhesion of Cu films onto stainless steel on deposition method, *Nanotechnology* **2** (1991) 39-42

Horio, K.; Kasai, T., Comparison of some instruments for measuring mirrorlike surfaces, *Nanotechnology* **2** (1991) 33-8

Gardner, J.W.; Bartlett, P.N., Potential applications of electropolymerized thin organic films in nanotechnology, *Nanotechnology* **2** (1991) 19-32

Franks, A., Nanometric surface metrology at the National Physical Laboratory, *Nanotechnology* **2** (1991) 11-18

Chetwynd, D.G.; Cockerton, S.C.; Smith, S.T.; Fung, W.W., The design and operation of monolithic X-ray interferometers for super-precision metrology, *Nanotechnology* **2** (1991) 1-10

Toward Molecular Control: Second Foresight Conference on Molecular Nanotechnology, *Nanotechnology* **2** (1991)

### **1992 rok**

International Conference on Atoms and Clusters - WAC '92, *Nanotechnology* **3** (1992). Publ by IOP Publishing Ltd, Distribution Department, Bristol, Engl. 161-207

International Conference on Atoms and Clusters, *Nanotechnology* **3** (1992). Publ by IOP Publishing Ltd, Distribution Department, Bristol, Engl. 111-160

Barbour, J.C.; Dimos, D.; Guilinger, T.R.; Kelly, M.J., Control of photoluminescence from porous silicon, *Nanotechnology* **3** (1992) 202-4

Morisaki, H., Above-band-gap photoluminescence from Si fine particles, *Nanotechnology* **3** (1992) 196-201

Koshida, N.; Koyama, H., Photoluminescent and electroluminescent properties of porous silicon, *Nanotechnology* **3** (1992) 192-5

Searson, P.C.; Macaulay, J.M., The fabrication of porous silicon structures, *Nanotechnology* **3** (1992) 188-91

Itaya, K., STM studies of solid/liquid interfaces, *Nanotechnology* **3** (1992) 185-7

Noge, H.; Shimizu, A.; Sakaki, H., On the possibilities and problems of semiconductor quantum microstructures, *Nanotechnology* **3** (1992) 180-4

Tanaka, K., Atom-molecule space plan project: ultimate manipulation of atoms and molecules, *Nanotechnology* **3** (1992) 178-9

Ohnishi, S.; Ikeda, T.; Watari, N., Metal clusters as giant atoms,

*Nanotechnology* **3** (1992) 173-7

Saito, S.; Oshiyama, A.; Miyamoto, Y.; Hamada, N.; Sawada, S.,  
Electronic structure of fullerenes and fullerides: artificial atoms and their  
solids, *Nanotechnology* **3** (1992) 167-72

Johnson, R.D.; Yannoni, C.S.; de Vries, M.S., C60 solid state rotational dynamics and production and EPR spectroscopy of fullerenes containing metal atoms, *Nanotechnology* **3** (1992) 164-6

Utsugi, Y., Chemical modification for nanolithography using scanning tunneling microscopy, *Nanotechnology* **3** (1992) 161-3

Matsui, S.; Baba, M.; Satoh, A., Atomic layer etching and sidewall roughness measurement using the scanning tunneling microscope, *Nanotechnology* **3** (1992) 156-60

Kuk, Y., Observation of clusters on a metal surface, *Nanotechnology* **3** (1992) 152-5

Ichinokawa, T.; Iizumi, H.; Haginoya, C.; Itoh, H., Electromigration of metallic islands on the Si(001) surface, *Nanotechnology* **3** (1992) 147-51

Miki, K.; Tokumoto, H., Step control on silicon surfaces by electric fields, *Nanotechnology* **3** (1992) 142-6

Iwatsuki, M.; Kitamura, S.; Sato, T.; Sueyoshi, T., Nano-fabrication on silicon at high temperature in a UHV-STM, *Nanotechnology* **3** (1992) 137-41

Stroschio, J.A.; Whitman, L.J.; Dragoset, R.A.; Celotta, R.J., Atomic manipulation of polarizable atoms by electric field directional diffusion, *Nanotechnology* **3** (1992) 133-6

Sakurai, T.; Hashizume, T., FI-STM study of metal surfaces, *Nanotechnology* **3** (1992) 126-32

Katayama, Y.; Tanaka, I.; Ohkouchi, S.; Osaka, F.; Kato, T., In situ STM observation of MBE surfaces of III-V semiconductors, *Nanotechnology* **3** (1992) 123-5

Briggs, G.A.D.; Knall, J.; Mayne, A.J.; Jones, T.S.; Weinberg, W.H.; Avery, A.R., An STM study of the Si(001)-(2\*1) and GaAs(001)-(2\*4) surfaces, *Nanotechnology* **3** (1992) 113-22

Kroto, H., C60: the celestial sphere which fell to earth, *Nanotechnology*  
**3** (1992) 111-12

Roberts, C.J.; Wilkins, M.J.; Beamson, G.; Davies, M.C.; Jackson, D.E.; Scholes, P.D.; Tandler, S.J.B.; Williams, P.M., The demonstration of controlled surface modification achievable with a scanning tunnelling microscope on graphite, metallic films, organic molecules and polymeric biomolecules, *Nanotechnology* **3** (1992) 98-110

Farooqui, M.M.; Evans, A.G.R.; Stedman, M.; Haycocks, J., Micromachined silicon sensors for atomic force microscopy, *Nanotechnology* **3** (1992) 91-7

Horikawa, O.; Sato, K.; Shimokohbe, A., An active air journal bearing, *Nanotechnology* **3** (1992) 84-90

Schaub, T.; Wiesendanger, R.; Guntherodt, H.-J., Comparative study of different tip materials for surface modification by the scanning tunneling microscope, *Nanotechnology* **3** (1992) 77-83

Coffer, J.L.; Bigham, S.R.; Pinizzotto, R.F.; Yang, H., Characterization of quantum-confined CdS nanocrystallites stabilized by deoxyribonucleic acid (DNA), *Nanotechnology* **3** (1992) 69-76

Butt, H.-J., Electrostatic interaction in scanning probe microscopy when imaging in electrolyte solutions, *Nanotechnology* **3** (1992) 60-8

Kawanishi, H.; Sugimoto, Y.; Akita, K.; Tanaka, N.; Ishikawa, T., Patterning of GaAs by in situ electron beam lithography toward nanometer-scale structures, *Nanotechnology* **3** (1992) 54-9

Rosolen, G.C.; Wong, T.K.S.; Welland, M.E., Study of reactive ion etched nanometre size trenches using a combined scanning electron microscope and scanning tunnelling microscope, *Nanotechnology* **3** (1992) 49-53

Yaniv, D.R.; McCormick, L.D., Polypyrrole nanoplating on HOPG utilizing an STM tip (biosensor fabrication), *Nanotechnology* **3** (1992) 44-7

Wautelet, M., Effects of size, shape and environment on the phase diagrams of small structures, *Nanotechnology* **3** (1992) 42-3



Smith, S.T.; Liu, X., A profilometer for surface proximity probe applications, *Nanotechnology* **3** (1992) 37-41

Otsuka, J., Nanometer level positioning using three kinds of lead screws, *Nanotechnology* **3** (1992) 29-36

Nomura, T.; Suzuki, R., Six-axis controlled nanometer-order positioning stage for microfabrication, *Nanotechnology* **3** (1992) 21-8

Yuqiu, J.; Juang, C.-B.; Keller, D.; Bustamante, C.; Beach, D.; Houseal, T.; Builes, E., Mechanical, electrical, and chemical manipulation of single DNA molecules., *Nanotechnology* **3** (1992) 16-20

Itoua, S.; Joachim, C., Fabrication and AFM characterization of gold wires of less than 50 nm width buried in a SiO<sub>2</sub> substrate, *Nanotechnology* **3** (1992) 10-15

Ikawa, N.; Shimada, S.; Tanaka, H., Minimum thickness of cut in micromachining, *Nanotechnology* **3** (1992) 6-9

Enomoto, T.; Tani, Y.; Sato, H.; Kamimura, Y., Single-point machining technology of a supersmooth surface using a flying tool, *Nanotechnology* **3** (1992) 1-5

International Workshop on Atoms and Clusters (WAC-92), *Nanotechnology* **3** (1992)

### **1993 rok**

Youden, D.H., Capstans or lead screws? Comparing the performance of diamond turning machines under operating conditions, *Nanotechnology* **4** (1993) 242-5. 1 refs.

Samitsu, Y., A study of silicon-wafer surface evaluation using atomic force microscopy, *Nanotechnology* **4** (1993) 236-41

Rakels, J.H., Fourier analysis of phase contrast microscopy of nanometric surfaces, *Nanotechnology* **4** (1993) 230-5

Mori, Y.; Yamamura, K.; Yamauchi, K.; Yoshii, K.; Kataoka, T.; Endo, K.; Inagaki, K.; Kakiuchi, H., Plasma CVM (chemical vaporization machining): an ultra precision machining technique using high-pressure reactive plasma, *Nanotechnology* **4** (1993) 225-9

Itoh, T.; Suga, T., Development of a force sensor for atomic force

microscopy using piezoelectric thin films, *Nanotechnology* **4** (1993) 218-24

Igata, N.; Sato, S., FIM observation of point defect clusters in ion-implanted tungsten surfaces, *Nanotechnology* **4** (1993) 213-17

- Hosoe, S.; Yoshida, T., Applied measurements of multipurpose precise interferometer (AMOS-1), *Nanotechnology* **4** (1993) 206-12
- Franks, A., Progress towards traceable nanometric surface metrology, *Nanotechnology* **4** (1993) 200-5
- Dagata, J.A.; Tseng, W.; Schneir, J.; Silver, R.M., Nanofabrication and characterization using a scanning tunneling microscope, *Nanotechnology* **4** (1993) 194-9
- Chetwynd, D.G.; Harb, S.M.; Krylova, N.O.; Smith, S.T., The feasibility of extended range monolithic X-ray interferometric calibrators, *Nanotechnology* **4** (1993) 183-93
- Bowen, D.K.; Tanner, B.K., Characterization of engineering surfaces by grazing-incidence X-ray reflectivity, *Nanotechnology* **4** (1993) 175-82
- Matsui, S., Cross-sectional observation of resist patterns by focused ion beam etching, *Nanotechnology* **4** (1993) 170-4
- Schiffmann, K.I., Investigation of fabrication parameters for the electron-beam-induced deposition of contamination tips used in atomic force microscopy, *Nanotechnology* **4** (1993) 163-9
- Parikh, S.; Virtanen, J., Motion of nano holes on the surface of gold at room temperature, *Nanotechnology* **4** (1993) 159-62
- Jorgensen, J.F.; Carneiro, K.; Madsen, L.L., The scanning tunneling microscope and surface characterization, *Nanotechnology* **4** (1993) 152-8
- Grafstrom, S.; Neitzert, M.; Hagen, T.; Ackermann, J.; Neumann, R.; Probst, O.; Wortge, M., The role of topography and friction for the image contrast in lateral force microscopy, *Nanotechnology* **4** (1993) 143-51
- Fujisawa, S.; Sugawara, Y.; Ito, S.; Mishima, S.; Okada, T.; Morita, S., The two-dimensional stick-slip phenomenon with atomic resolution, *Nanotechnology* **4** (1993) 138-42
- Drandarov, N.; Nikolov, B.; Tsvetkov, T.; Kebedgiev, A., Some emission

properties of the AuSiSb liquid metal ion source, *Nanotechnology* **4**  
(1993) 133-7

Merkle, R.C., Two types of mechanical reversible logic, *Nanotechnology*  
**4** (1993) 114-31

Weisenhorn, A.L.; Khorsandi, M.; Kasas, S.; Gotzos, V.; Butt, H.-J., Deformation and height anomaly of soft surfaces studied with an AFM, *Nanotechnology* **4** (1993) 106-13

Ohlenbusch, H.H.; Bosshard, H.E., Suggestions for the selective control of histone-DNA interactions based on computer simulations of a nucleosome model, *Nanotechnology* **4** (1993) 91-105

Merkle, R.C., A proof about molecular bearings, *Nanotechnology* **4** (1993) 86-90

Hosoe, S., Highly precise and stable laser displacement measurement interferometer with differential optical passes in practical use, *Nanotechnology* **4** (1993) 81-5

Burnham, N.A.; Colton, R.J.; Pollock, H.M., Interpretation of force curves in force microscopy, *Nanotechnology* **4** (1993) 64-80

Binggeli, M.; Christoph, R.; Hintermann, H.-E.; Colchero, J.; Marti, O., Friction force measurements on potential controlled graphite in an electrolytic environment, *Nanotechnology* **4** (1993) 59-63

Lent, C.S.; Tougaw, P.D.; Porod, W.; Bernstein, G.H., Quantum cellular automata, *Nanotechnology* **4** (1993) 49-57

Randall, J.N., A lateral-resonant-tunneling universal quantum-dot cell, *Nanotechnology* **4** (1993) 41-8

Merkle, R.C., Reversible electronic logic using switches, *Nanotechnology* **4** (1993) 21-40

Luscombe, J.H., Current issues in nanoelectric modelling, *Nanotechnology* **4** (1993) 1-20

Third Tokyo - Warwick Seminar on Nanotechnology, *Nanotechnology* **4** (1993)

**1994 rok**

Jian Chen; Workman, R.K.; Sarid, D.; Hoper, R., Numerical simulations of a scanning force microscope with a large-amplitude vibrating cantilever, *Nanotechnology* **5** (1994) 199-204

Taylor, R.P., The role of surface-gate technology for AlGaAs/GaAs nanostructures, *Nanotechnology* **5** (1994) 183-98

- AU Grossman, K.; Peckerar, M., Active current limitation for cold-cathode field emitters, *Nanotechnology* **5** (1994) 179-82
- Pickett, W.E.; Pederson, M.R.; Davidson, B.N., Modeling CVD diamond with density functional theory, *Nanotechnology* **5** (1994) 172-8
- Leach, G.I.; Merkle, R.C., Crystal Clear: a molecular CAD tool, *Nanotechnology* **5** (1994) 168-71
- Hall, J.S., Nanocomputers and reversible logic, *Nanotechnology* **5** (1994) 157-67
- DeMara, R.; Mercer, R.; Ebel, M., Helical latch for scalable Boolean logic operations, *Nanotechnology* **5** (1994) 137-56
- Bandyopadhyay, S.; Das, B.; Miller, A.E., Supercomputing with spin-polarized single electrons in a quantum coupled architecture, *Nanotechnology* **5** (1994) 13-33
- Dawes, M.L.; Dickinson, J.T.; Jensen, L.C.; Langford, S.C., Structures obtained from resolidification of flame-melted single-crystal germanium, *Nanotechnology* **5** (1994) 01-12
- Frediani, C.; Allegrini, M.; Ascoli, C.; Connolly, P.; Labardi, M.; Moores, G.; Perez Arnaud, E., Scanning force microscopy of protein patterns, *Nanotechnology* **5** (1994) 95-100
- Anselmetti, D.; Luthi, R.; Meyer, E.; Richmond, T.; Dreier, M.; Frommer, J.E.; Guntherodt, H.-J., Attractive-mode imaging of biological materials with dynamic force microscopy, *Nanotechnology* **5** (1994) 87-94
- Pischof, K.A.; Molarius, J.M., The effects of prolonged high-voltage STM scanning on an oxidized silicon wafer surface, *Nanotechnology* **5** (1994) 80-6
- Cumbo, M.J.; Jacobs, S.D., Determination of near-surface forces in optical polishing using atomic force microscopy, *Nanotechnology* **5** (1994) 70-9



Thomson, R.E.; Moreland, J.; Roshko, A., Surface modification of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  thin films using the scanning tunneling microscope: five methods, *Nanotechnology* **5** (1994) 57-69

Savaloni, H.; Loong, K.H.; Player, M.A., Mobility of tungsten clusters and microstructure of tungsten films on amorphous carbon substrates, *Nanotechnology* **5** (1994) 44-56

McWaid, T.H.; Vorburger, T.V.; Fu, J.; Song, J.F.; Whinton, E., Methods divergence between measurements of micrometer and sub-micrometer surface features, *Nanotechnology* **5** (1994) 33-43

Schmid, H.; Fink, H.-W., Mechanical and electronic manipulation of nanometer-sized wires, *Nanotechnology* **5** (1994) 26-32

Itoua, S.; Joachim, C.; Rousset, B.; Fabre, N., Fabrication and AFM characterization of a co-planar tunnel junction with a less than 30 nm interelectrode gap, *Nanotechnology* **5** (1994) 19-25

Schneider, T.D., Sequence logos, machine/channel capacity, Maxwell's demon, and molecular computers: a review of the theory of molecular machines, *Nanotechnology* **5** (1994) 1-18

### **1995 rok**

Pollanen, M.S., Rigid deformations of Alzheimer paired helical filaments-a novel substrate for fabricating nanostructures, *Nanotechnology* **6** (1995) 101-3.

Marchman, H.M.; Wetsel, G.C., Jr., Controlled electrical contact of a scanned probe to nanostructures, *Nanotechnology* **6** (1995) p.93-100.

A.U. Hornbostel, M.D.; Hillyard, S.; Silcox, J.; DiSalvo, F.J., Nanometer width molybdenum selenide fibers, *Nanotechnology* **6** (1995) 87-92.

Brand, U., Comparison of interferometrical and stylus step height measurements on rough surfaces, *Nanotechnology* **6** (1995) 81-6.

Sakai, S., Theoretical study on molecular electronic devices: I. Assessment of switching by hydrogen transfer for pyrazole model, *Nanotechnology* **6** (1995) 75-80.

Tuzun, R.E.; Noid, D.W.; Sumpter, B.G., The dynamics of molecular

bearings, *Nanotechnology* **6** (1995) 64-74.

Tuzun, R.E.; Noid, D.W.; Sumpter, B.G., Dynamics of a laser driven molecular motor, *Nanotechnology* **6** (1995) 52-63

Wang, W.L.; Whitehouse, D.J., Application of neural networks to the reconstruction of scanning probe microscope images distorted by finite-size tips, *Nanotechnology* **6** (1995) 45-51

Spatz, J.P.; Sheiko, S.; Moller, M. ; Winkler, R.G.; Reineker, P.; Marti, O., Forces affecting the substrate in resonant tapping force microscopy, *Nanotechnology* **6** (1995) 40-4

Ristov, V.V.; Kasumov, A.Y.; Kislov, N.A.; Kononenko, O.V.; Matveev, V.N.; Tulin, V.A.; Khodos, I.I.; Gorbatov, Y.A.; Nikolaichik, V.I., A new approach to fabrication of nanostructures, *Nanotechnology* **6** (1995) 35-9

Sugimura, H.; Nakagiri, N., Fabrication of silicon nanostructures through scanning probe anodization followed by chemical etching, *Nanotechnology* **6** (1995) 29-33

Hosoe, S.; Tanaka, S.-I., A low-cost method of obtaining a stable environment for a highly precise displacement-measuring laser interferometer, *Nanotechnology* **6** (1995) 24-8

AU Heuberger, M.; Dietler, G.; Schlapbach, L., Mapping the local Young's modulus by analysis of the elastic deformations occurring in atomic force microscopy, *Nanotechnology* **6** (1995) 12-23

Fujisawa, S.; Kishi, E.; Sugawara, Y.; Morita, S., Two-dimensionally discrete friction on the NaF(100) surface with the lattice periodicity, *Nanotechnology* **6** (1995) 8-11

Butt, H.-J.; Jaschke, M., Calculation of thermal noise in atomic force microscopy, *Nanotechnology* **6** (1995) 1-7

## DODATEK H

### Wykaz ważniejszych terminów i skrótów

BCCs	- BioChips and Computers - układy i komputery biologiczne
CAD	- Computer Aided Design - projektowanie wspomagane komputerowo
CHEMFET	- tranzystor MOSFET pozbawiony elektrody bramki, przez co staje się czuły na koncentrację jonów w swoim otoczeniu
CMOS	- Complementary Metal Oxide Semiconductor - rodzaj tranzystora polowego MOS
DRAM	- Dynamic Random Acces Memory - pamięć dynamiczna z dostępem losowym
FET	- Field Effect Transistor - tranzystor polowy
FIB	- Focused Ion Beam - zogniskowane wiązki jonowe
GDS	- Genealogically Directed Synthesis - synteza ukierunkowana genealogicznie
HD	- Hard Disc - pamięć komputerowa magnetyczna, twardy dysk
HEMT	- High Electron Mobility Transistor - tranzystor z półprzewodnika o wysokiej ruchliwości elektronów
L-B	- Langmuir-Blodgett Films - warstwy monomolekularne wytwarzane przez zamaczanie i wyciągnięcie podłoża w roztworze wyższych kwasów tłuszczowych i wyższych mydeł, technologie opracowane jednocześnie przez Langmuira i Blodgetta
LIGA	- Litographie, Galvanoformung, Abformung - (niem.) litografia, galwanotechnika, ukształtowanie
LNP-LINK	- nanotechnology programe - narodowy program badań nad nanotechnologią w Wielkiej Brytanii
LODTM	- Large Optics Diamond-Turning Machine - wielka precyzyjna obrabiarka zbudowana w Lawrence Livermore National Laboratory
MBE	- Molecular-Beam Epitaxy - epitaksja z zastosowaniem wiązek molekularnych, jako źródła
MED	- Molecular Electronic Device - molekularne urządzenie elektroniczne

MOSFET	- Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - tranzystory polowe, o konstrukcji bramki, w której metalowa elektroda oddzielona jest od półprzewodnika warstwą tlenkową (SiO <sub>2</sub> )
MQWL	- Multiple Quantum-Well Laser
NPL	- National Physical Laboratory
ormocer	- organically modified ceramics - kompozyty - materiały ceramiczne ulepszone polimerami organicznymi
RMS	- Root-Mean-Square - odchylenie standardowe
SR	- Synchrotron Radiation - wiązki promieniowania uzyskiwane z synchrotronu
SQUID	- Source Quench Introduced Delay
STM	- Scanning Tunneling Microscope - skaningowa mikroskopia oparta na zjawisku tunelowania
ULSI	- Ultra Large Scale of Integration - przyrządy półprzewodnikowe wykonane w ultra dużej skali integracji
VDI/VDE	- VerbandDeutscher Ingenieure/Elektrotechniker - Zrzeszenie Inżynierów Niemieckich/Elektrotechników
VLSI	- Very Large Scale Integration - bardzo duża skali integracji