

Perspektywy nanotechnologii – nowe ograniczenia, nowe możliwości

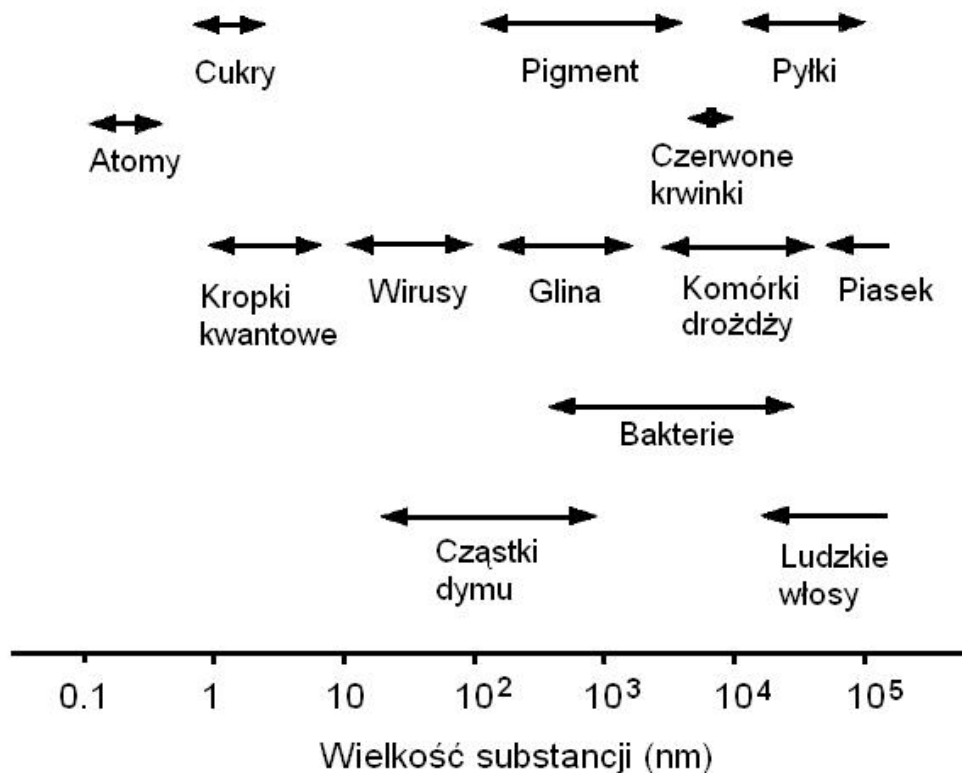
Wstęp

Przedrostek „nano” jest ostatnio jednym z najbardziej chwytliwych wyrażeń pojawiających się we wszystkich mediach. Rośnie liczba artykułów naukowych, popularnych, a także z dziedziny science-fiction dotyczących nanotechnologii. Finansowane jest powstawanie nowych laboratoriów prowadzących badania w tym zakresie, tworzone są nowe kierunki kształcenia. Nawet w reklamach kosmetyków można usłyszeć o nanocząsteczkach. Prowadzone analizy ekonomiczne przewidują, że obroty rynku związanego z nanotechnologią mogą osiągnąć 1000 miliardów dolarów w 2015 roku.

Z tego powodu warto przyjrzeć się, jaki jest obecny stan rozwoju nanotechnologii, jakie możliwości pojawiły się w momencie powstania narzędzi do manipulacji i badania materii na poziomie atomowym, ale także, jakie istnieją bariery dla wykorzystania i rozwinięcia powstałych idei.

Rozpocząć należy od zdefiniowania pojęcia nanotechnologii. Według najczęściej podawanej definicji jest to wytwarzanie struktur, przyrządów i urządzeń o wielkości od 1 do 100 nm oraz wykorzystanie charakterystycznych właściwości i zjawisk występujących w tej skali. Przedrostek „nano” odnosi się do rozmiaru, a nie do rodzaju materii, tak więc nanotechnologia polega na kształtowaniu nanostruktur z różnych materiałów przy pomocy różnych technik.

Jeden nanometr jest to 1/1 000 000 000 część metra czyli 1/1 000 000 część milimetra, w skali atomowej jest to długość, jaką by zajmowały cztery atomy krzemu ułożone obok siebie. W celu oddania skali struktur o wielkości „nano”, na rysunku 1 przedstawione zostały wielkości różnych substancji występujących w otaczającym nas środowisku.

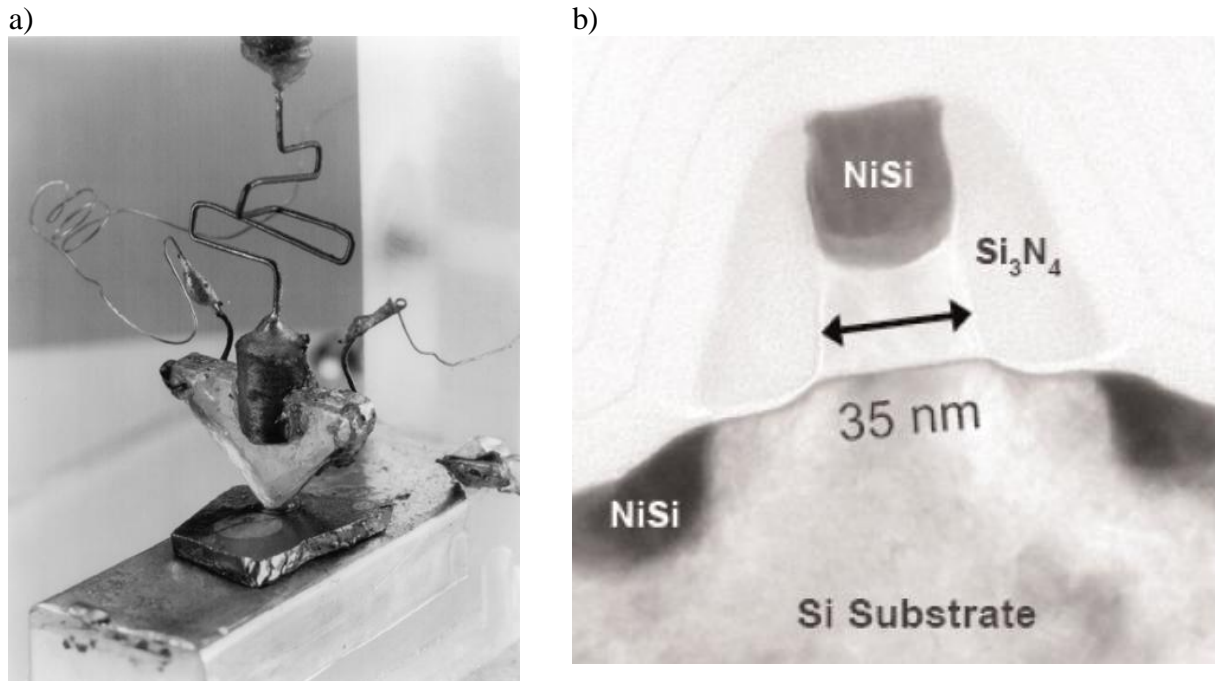


Rys 1. Porównanie rozmiarów różnych substancji

W pracy zostanie wyjaśnione, w jaki sposób i dlaczego rozmiar „nano” wkroczył do dziedziny przyrządów półprzewodnikowych, przedstawione zostaną techniki wytwarzania i pomiaru nanostruktur. Dodatkowo zostanie przedstawionych kilka przykładów elementów, w których konstrukcji wykorzystano nanostruktury.

Granice prawa Moore’a

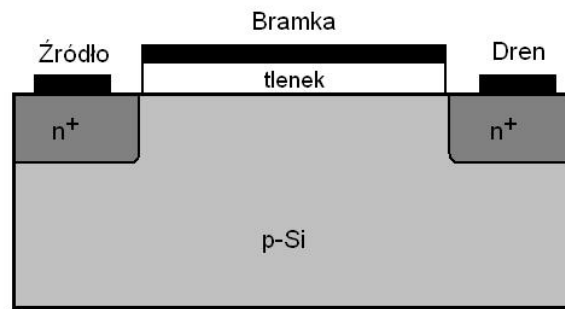
Od 40 lat rozwój technologii układów scalonych jest opisywany prawem Moore’a (Gordon Moore – jeden z założycieli firmy Intel), które mówi, że ekonomicznie optymalna liczba tranzystorów w układzie scalonym podwaja się co 24 miesiące. Pochodną tego prawa jest twierdzenie, że moc obliczeniowa komputerów także podwaja się co dwa lata. Tak szybki wzrost jest możliwy dzięki stosowaniu coraz mniejszych elementów (tranzystorów) w procesie wytwarzania układów procesorowych. Pierwszy tranzystor opracowany przez Shockley’a, Bardeena i Brattaina w 1947 roku (rys. 2a) miał rozmiar rzędu centymetra, tranzystor w pierwszym układzie mikroprocesorowym firmy Intel (1971 rok) miał ok. 10 μm , długość bramki tranzystorów wytwarzanych obecnie wynosi kilkadziesiąt nanometrów (rys 2b).



Rys 2. Pierwszy tranzystor ostrzowy z 1947 roku (a), jeden z 291 milionów tranzystorów MOS w procesorze Core Duo firmy Intel¹.

Podstawowym elementem, z którego wykonane są układy logiczne w obecnie wytwarzanych procesorach jest tranzystor z izolowaną bramką (*Metal-Oxide-Semiconductor-MOS*) pokazany na rysunku 3. W tym elemencie przepływ prądu pomiędzy źródłem a drenem jest regulowany przez przyłożenie napięcia o odpowiednim znaku do elektrody bramki. W przypadku tranzystora z kanałem n, dodatnie napięcie na bramce powoduje, że elektrony są przyciągane pod powierzchnię tlenku, i przy odpowiednio dużej wartości napięcia, koncentracja elektronów wzrasta na tyle, że możliwy jest przepływ prądu i następuje przełączenie tranzystora w stan aktywny. Do tej pory zwiększenie szybkości działania układu odbywało się przez zmniejszenie długości bramki, czyli drogi, jaką muszą pokonać nośniki prądu. Stawiało to oczywiście coraz większe wymagania w stosunku do technologii ich wytwarzania, ale poprzez stosowanie coraz lepszych jakościowo podłoży, dokładniejszych metod odwzorowania kształtu elementu oraz opracowania nowych materiałów na tlenek bramki, postęp w wydajności komputerów był utrzymany. Jednak w ciągu najbliższych dwudziestu lat, według przewidywań ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*) do 2020 roku długość bramki osiągnie rozmiar 6 nm, a w ciągu następnych 10 lat osiągnąć może rozmiar 2 nm.

¹ R.M. Ramanathan, R. Willoner, Silicon Innovation: Leaping from 90 nm to 65 nm, White Paper Intel Corporation.



Rys 3. Schemat tranzystora n-MOS

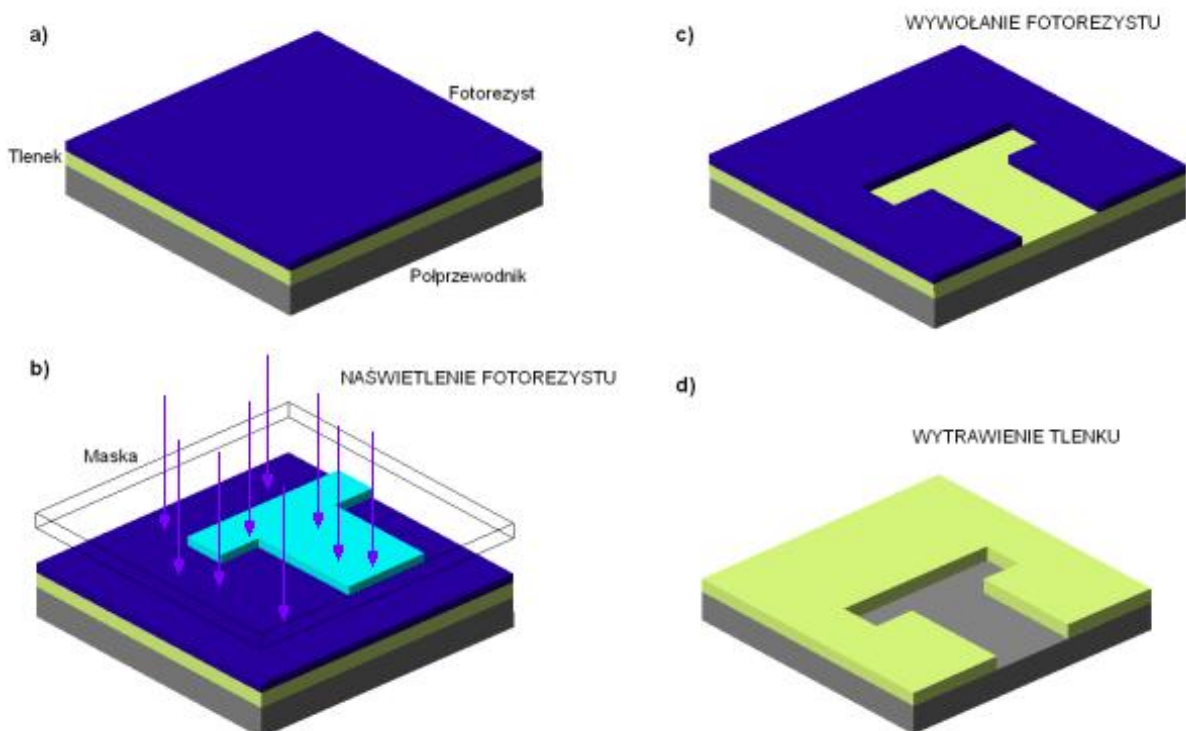
Jest to graniczny rozmiar bramki wynikający z podstawowych ograniczeń dotyczących minimalnej bariery energetycznej niezbędnej do rozróżnienia stanów pracy tranzystora oraz z zasady nieoznaczoności Heisenberga. W związku z tym w chwili obecnej prace nad rozwojem układów scalonych skupiają się także na nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych pozwalających na zwiększenie szybkości działania tranzystora. Są to głównie: zmniejszenie grubości kanału tranzystora, zwiększenie szybkości elektronów w kanale poprzez zastosowanie innego materiału niż krzem (np. germanu) lub wykorzystanie naprężonego krzemu, a także zmniejszenie niepożądanych zjawisk elektrostatycznych przez otoczenie całego kanału tranzystora elektrodą bramki. Dużo wskazuje na to, że w okresie najbliższych 20 lat dalszy postęp w dziedzinie technologii nanoelektronicznych będzie zachowany dzięki ewolucji dotychczas znanych metod. Natomiast dalszy rozwój będzie musiał nastąpić na drodze rewolucji dotyczącej technologii wytwarzania, wprowadzenia nowych materiałów oraz rozwoju technik obliczeniowych.

Techniki wytwarzania struktur o rozmiarach „nano”

Istnieją obecnie dwa podejścia do wytwarzania nanostruktur: sposób „z góry na dół” (*top-down*) i „z dołu na górę” (*bottom-up*). W pierwszym odpowiedni kształt i wielkość elementu uzyskuje się przez obróbkę i zmniejszanie wymiarów materiału. W drugim pożądaną strukturę uzyskuje się poprzez składanie jej z pojedynczych atomów, cząsteczek czy molekuł.

Najczęściej stosowanym sposobem kształtowania struktur w technice „z góry na dół” jest metoda fotolitografii. W metodzie tej odpowiedni kształt uzyskuje się poprzez przeniesienie wzoru z maski na fotoczuły rezyst znajdujący się na powierzchni materiału. W przykładzie z rysunku 4a, na powierzchni półprzewodnika znajduje się warstwa tlenku, na którą naniesiona jest warstwa fotorezystu. W procesie naświetlania (rys. 4b) na działanie

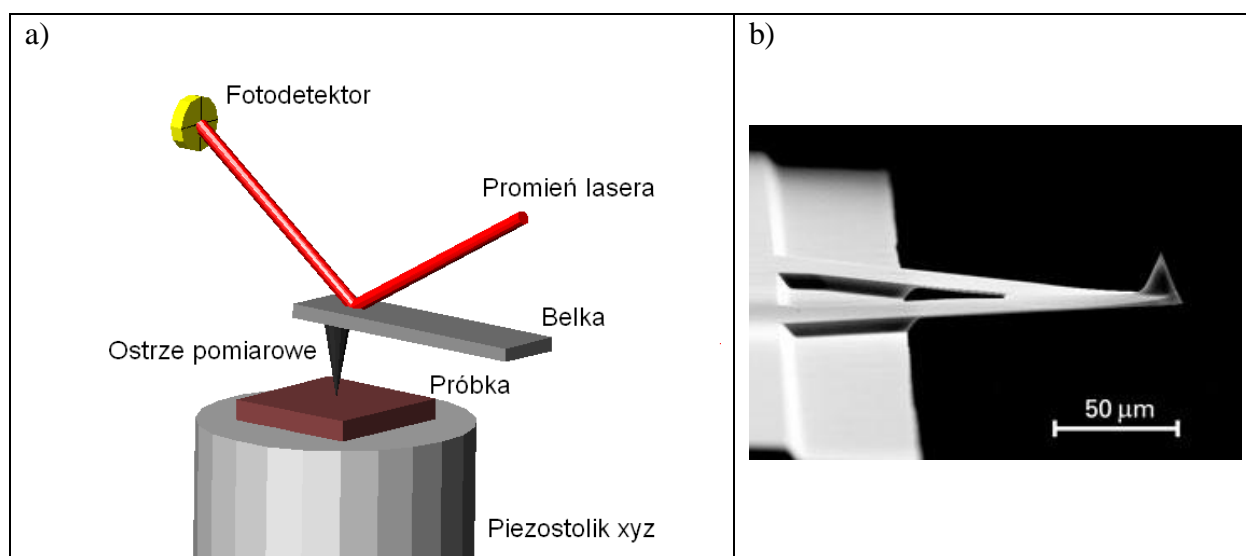
promieniowania wystawiana jest ta część rezystu, której nie zasłania wzór znajdujący się na masce. Wywołanie (rys. 4c) polega na usunięciu tej części rezystu, która nie została naświetlona. W czasie trawienia (rys. 4d) jest usuwana ta część tlenku, która nie jest osłonięta warstwą rezystu przed czynnikiem trawiącym, przez co w rezultacie uzyskuje się odtworzenie wzoru z maski w warstwie materiału. W podobny sposób możliwe jest uzyskanie połączeń metalicznych pomiędzy poszczególnymi elementami układu czy też lokalną zmianę parametrów elektrycznych półprzewodnika w procesie domieszkowania go innymi atomami.



Rys. 4. Kolejne etapy procesu fotolitografii

Maksymalne osiągnięte obecnie rozdzielczości fotolitografii optycznej w odmianie immersyjnej, przy długości fali stosowanego promieniowania 193 nm, wynosi poniżej 30 nm. Rentgenolitografia jest następną generacją fotolitografii wykorzystująca promieniowanie rentgenowskie o długości fali 0,8 nm, pozwalającą osiągnąć rozdzielczość ok. 20 nm. Uzyskanie odpowiedniego wzoru na rezyście jest także możliwe za pomocą skanowania jego powierzchni skupioną wiązką elektronów lub jonów, graniczne rozdzielczości wynoszą odpowiednio 10 nm dla elektronolitografii oraz pojedyncze nanometry w przypadku jonolitografii.

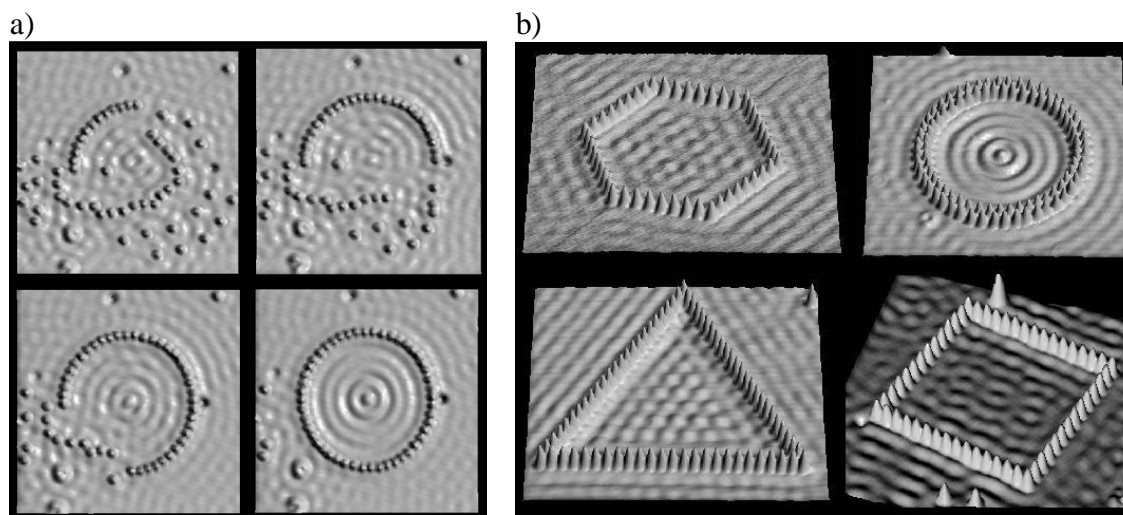
Natomiast w technice „z dołu do góry” najmniejszymi elementami, z których mogą być składane struktury są pojedyncze atomy. Wykorzystuje się do tego np. specjalny tryb pracy mikroskopów ze skanującą sondą (*Scanning Probe Microscope* – SPM). Należy wspomnieć, że skonstruowanie skaningowego mikroskopu tunerowego (*Scanning Tunneling Microscope*-STM) (pierwszego mikroskopu SPM) stało się podstawą rozwoju nanotechnologii gdyż jako pierwsze narzędzie pomiarowe pozwoliło badać struktury z rozdzielczością atomową. W mikroskopie STM dokonuje się pomiaru prądu tunelowego przepływającego pomiędzy przewodzącą próbką a ostrzem pomiarowym, którego wartość zależy od odległości tych dwóch elementów. Tak więc obraz topografii powierzchni uzyskuje się przez skanowanie powierzchni próbki i rejestrację zmian prądu tunelowego. Innym rodzajem mikroskopu SPM jest mikroskop sił atomowych (*Atomic Force Microscope*-AFM), w którym dokonuje się pomiaru atomowych sił oddziaływań między ostrzem pomiarowym a próbką. Uproszczony schemat takiego układu przedstawiono na rysunku 5. W mikroskopie AFM siły odpychające między ostrzem a próbką powodują odchylenie belki, do której przymocowane jest ostrze, w zależności od zmiany topografii powierzchni. Wielkość tego odchylenia jest mierzona przez określenie zmiany położenia wiązki lasera padającego na fotodetektor odbitej od powierzchni belki. W układzie tym skanowanie powierzchni jest możliwe dzięki stolikowi z elementem piezoelektrycznym pozwalającym na przesuw próbki w trzech osiach.



Rys 5. Schemat układu mikroskopu AFM (a), komercyjne ostrze pomiarowe firmy μMASCH (b)

Układanie struktur z pojedynczych atomów odbywa się za pomocą albo mechanicznego przesuwania atomów po powierzchni lub ich przyciągnięcia do końcówki

ostrza (przez przyłożenie napięcia) i przeniesienia nad powierzchnią próbki. Taka manipulacja atomami jest możliwa, co widać na rysunku 6, lecz ma jedno podstawowe ograniczenie: nawet zakładając, że posiadalibyśmy system umożliwiający ułożenie miliona atomów na sekundę, wtedy stworzenie elementu o masie 1 grama zajęło by około $1,46 \times 10^{10}$ lat! Dlatego też w chwili obecnej nie wydaje się, aby sposób tworzenia nanostruktur przedstawiony powyżej mógłby być wykorzystany w masowej produkcji przyrządów.



Rys 6. Etapy układania okręgu z atomów żelaza na powierzchni miedzi (a), struktury o różnych kształtach (b)².

W chwili obecnej szeroko stosowanymi metodami wytwarzania przyrządów w skali „nano” techniką „z dołu do góry” są techniki epitaksji, czyli wytwarzania monokrystalicznej warstwy półprzewodnika na półprzewodnikowym podłożu z odtworzeniem struktury krystalicznej podłoża. Wśród różnych odmian epitaksji największą kontrolę nad osadzaną warstwą można uzyskać w metodach MOCVD (chemiczne osadzanie z par związków metaloorganicznych) oraz MBE (epitaksja z wiązki molekularnej). W obu tych metodach dzięki precyzyjnej kontroli procesu dostarczania atomów do podłoża, możliwa jest kontrola na poziomie nanometra grubości i składu osadzonej warstwy.

Wytwarzane obecnie przyrządy półprzewodnikowe z zastosowaniem nanostruktur

Heterostrukuralne ogniwa słoneczne

W chwili obecnej oprócz potrzeby produkowania tanich ogniw słonecznych przeznaczonych do masowego stosowania, istnieje zapotrzebowanie na elementy, w których

² M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler, E.J. Heller, STM rounds up electron waves at the QM corral, “Physics Today” 46 (11), 17-19 (1993).

najistotniejsze jest uzyskanie bardzo dużej sprawności konwersji energii świetlnej na elektryczną. Ogniwa te stosowane są głównie w satelitach telekomunikacyjnych oraz sondach kosmicznych. Przykład takiego ogniwa wykonanego technologią epitaksji MOCVD na bazie układu materiałów AlGaAs/GaAs pokazano na rysunku 7³. W ogniwie tym większą sprawność, sięgającą 30 %, uzyskano dzięki wykorzystaniu studni kwantowych (kolejno ułożonych warstw półprzewodnika o szerszej i węższej przerwie energetycznej) w obszarze czynnym ogniwa słonecznego. Efekt rozmiarowy występujący w obszarze studni kwantowych pozwolił na wykorzystanie większej części widma światła słonecznego.

top electrode	
p+ GaAs	40 nm, $N_d = 4e18$
p+ AlGaAs	80 nm, $N_d = 4e18$
p+ GaAs	100 nm, $N_d = 4e18$
„i” AlGaAs	25 nm
„i” AlGaAs	10 nm
„i” GaAs	15 nm
„i” AlGaAs	10 nm
„i” GaAs	15 nm
„i” AlGaAs	20 nm
n+ GaAs	1000 nm, $N_d = 2e17$
n+ GaAs	500 nm, $N_d = 1e18$
substrate GaAs n+	
bottom electrode	

Rys 7. Przekrój struktury ogniwa słonecznego z wielokrotnymi studniami kwantowymi

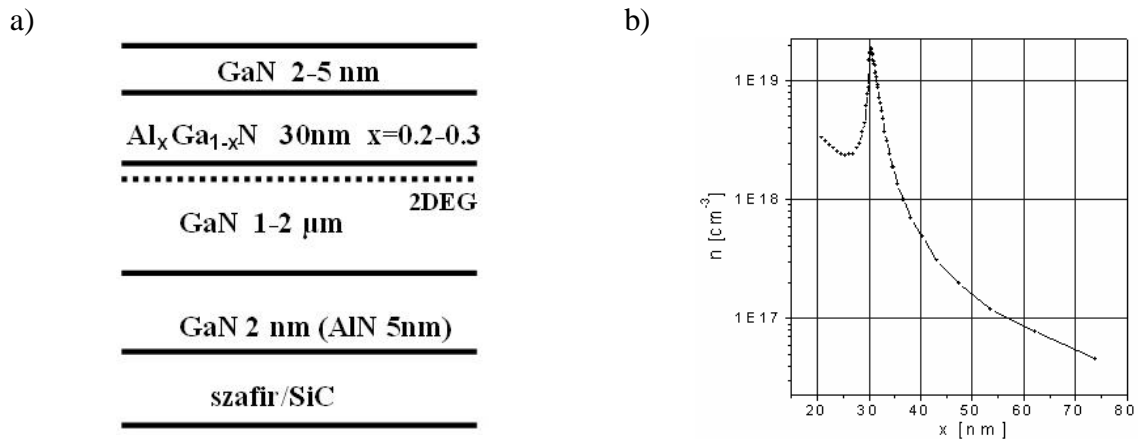
Tranzystory heterozłączowe (*Heterostructure Field Effect Transistor-HFET*)

W tranzystorach wykorzystywanych w aplikacjach analogowych ważne jest uzyskanie znacznej mocy (dużej gęstości prądu przepływającego przez element) i dużej częstotliwości pracy. Są to wymagania sprzeczne, gdyż w klasycznych rozwiązaniach zwiększenie koncentracji elektronów uzyskuje się przez domieszkowanie półprzewodnika atomami wprowadzającymi dodatkowe elektrony, lecz działanie takie jednocześnie zmniejsza ruchliwość elektronów (co skutkuje obniżeniem szybkości działania urządzenia). Problem ten może być rozwiązany poprzez zastosowanie struktury tranzystora takiej jak na rysunku 8a⁴. Na międzypowierzchni AlGaN/GaN, na skutek występowania naprężeń między warstwami powstaje ładunek dodatni indukujący gaz dwuwymiarowy (*two dimensional electron gas-2DEG*) w warstwie azotku galu. Koncentracja 2DEG zależy od grubości bariery AlGaN,

³ J. Prażmowska, R. Paszkiewicz, R. Korbutowicz, M. Wośko, M. Tłaczała, “Optica Applicata”, Vol. XXXVII, No. 1–2, 2007.

⁴ R. Paszkiewicz, B. Paszkiewicz, J. Kozłowski, T. Piasecki, W. Kośnikowski, M. Tłaczała, Influence of crystallographic structure on electrical characteristics of (Al,Ga)N epitaxial layers grown by MOVPE method, J. Cryst. Growth 2003 vol. 248 s. 487-493.

zawartości Al i ładunku na międzypowierzchni. Na rysunku 8b można zauważyć, że największa koncentracja elektronów występuje na grubości kilku nanometrów w niedomieszkowanej warstwie GaN, przez co możliwe jest uzyskanie dużej ruchliwości nośników prądu.



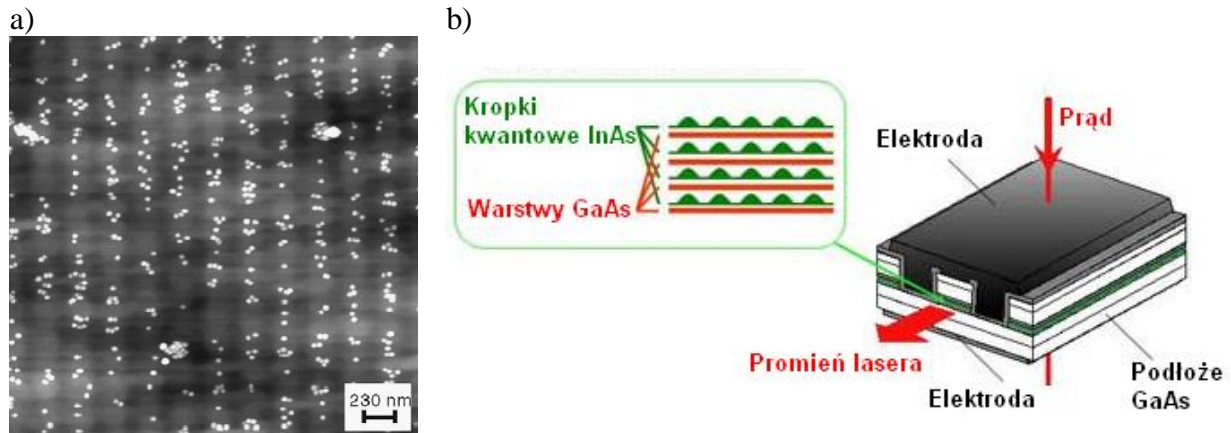
Rys 8. Przekrój przez epitaksjalną strukturę tranzystora heterozłączonego (a), rozkład koncentracji elektronów w strukturze (początek osi odciętych na wierzchu struktury)

Lasery na kropkach kwantowych

Efekt laserowy polega na emisji wymuszonej fotonu związanej z przejściem elektronu z poziomu o wyższej energii do poziomu o niższej energii. W procesie tym foton o danej długości fali powoduje emisję innego fotonu o tej samej długości fali. W klasycznym laserze przejście elektronu zachodzi pomiędzy dnem pasma przewodnictwa a wierzchołkiem pasma walencyjnego, a długość fali emitowanego światła zależy od szerokości przerwy zabronionej półprzewodnika.

W najprostszy sposób kropkę kwantową można opisać jako obszar prostokątnej studni potencjałów ograniczający ruch elektronów. Zmniejszanie wymiarów studni powoduje, że pojawiają się dyskretne stany energetyczne, w jakich mogą znajdować się elektrony. Przy rozmiarach kropki mniejszych niż 10 nm, różnica między poziomami staje się większa od energii termicznej w temperaturze pokojowej. Dzięki temu takie kropki powinny emitować promieniowanie o energii określonej przez poziomy energetyczne w kropce. Zdefiniowanie dyskretnych poziomów energetycznych przez wymiary kropki, a nie przez parametry materiału pozwala na osiągnięcie większej stabilności temperaturowej lasera oraz zmniejszenie wartości progowej prądu potrzebnego do zainicjowania akcji laserowej. Urządzenia te emitujące dla długości fal z zakresu podczerwieni wykorzystywane są w

szybkich optycznych systemach przesyłania danych. Na rysunku 9a znajduje się obraz AFM kropek kwantowych InGaAs na podłożu GaAs wytworzonych techniką MBE⁵, na rysunku 9b przedstawiono schemat lasera telekomunikacyjnego wykonanego przez firmę Fujitsu⁶.



Rys 9. Kropki kwantowa InGaAs na warstwie GaAs (a), schemat lasera firmy Fujitsu

Przyrządy przyszłości

W najbliższych dwóch dekadach może nastąpić całkowita zmiana technologii wytwarzania oraz zasadach działania elementów układów cyfrowych. Zaprezentowane zostaną niektóre z konstrukcji, rozwijane obecnie w laboratoriach na całym świecie, które mają szansę stać się podstawą elementów wytwarzanych na skalę przemysłową.

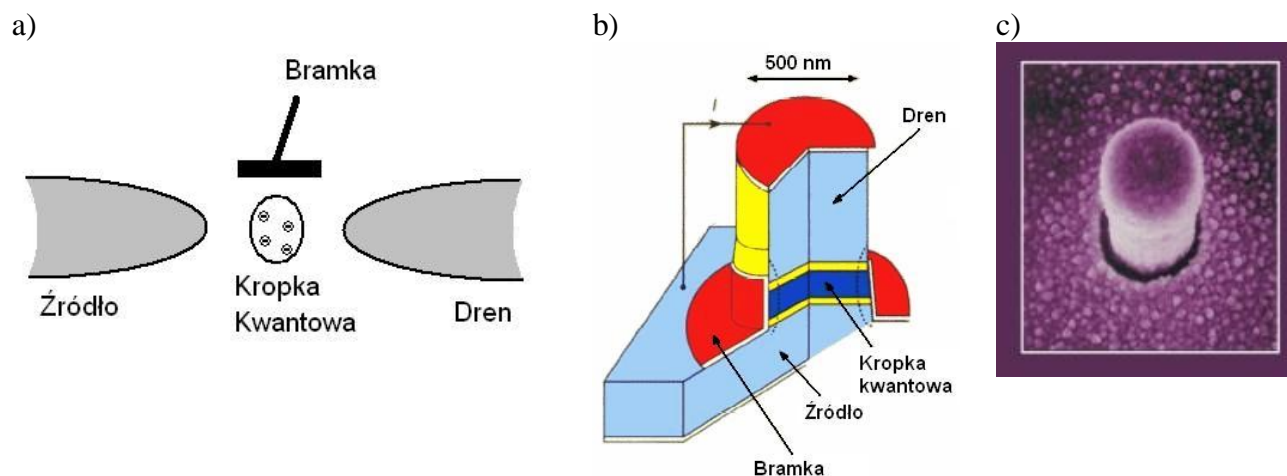
Tranzystor jednoelektronowy

W tranzystorze jednoelektrodowym, którego schemat przedstawiono na rys 10a wykorzystuje się dwa zjawiska: tunelowanie elektronów przez cienkie bariery potencjałów oraz zjawisko zwane blokadą kulombowską. Zjawisko tunelowania polega na tym, że elektron może przejść przez granicę potencjałów z pewnym prawdopodobieństwem. To prawdopodobieństwo jest tym większe, im bariera jest cieńsza. W tranzystorze jednoelektrodowym tunelowanie odbywa się ze źródła przez barierę potencjału do kropki kwantowej, a z niej przez drugą barierę do drenu. Jeśli w kropce kwantowej znajdują się elektrony, wtedy przepływ prądu jest niemożliwy, gdyż odpychające siły elektrostatyczne

⁵ M. Schramboeck, A. M. Andrews, T. Roch, W. Schrenk, G. Strasser, In-based quantum dots on AlGaAs surfaces, "Microelectronic Engineering" 84 (2007) 1443–1445.

⁶ Fujitsu, University of Tokyo Develop World's First 10Gbps Quantum Dot Laser Featuring Breakthrough Temperature-Independent Output. <http://www.fujitsu.com/global/news/pr/archives/month/2004/20040910-01.html>

działające między elektronami uniemożliwiają przeskok elektronu. Przyłożenie dodatniego napięcia na bramkę zmniejsza energię elektrostatyczną kropki kwantowej i przejście elektronu jest możliwe. Na rysunki 10b pokazano przekrój przez tranzystor jednoelektrodowy InGaAs/AlGaAs w konfiguracji pionowej⁷, a na rysunku 10 zdjęcie z mikroskopu elektronowego struktury wykonanej na uniwersytecie w Delft.



Rys 10. Schemat tranzystora jednoelektrodowego (a), pionowa tranzystor jednoelektronowy (b), zdjęcie SEM gotowej struktury

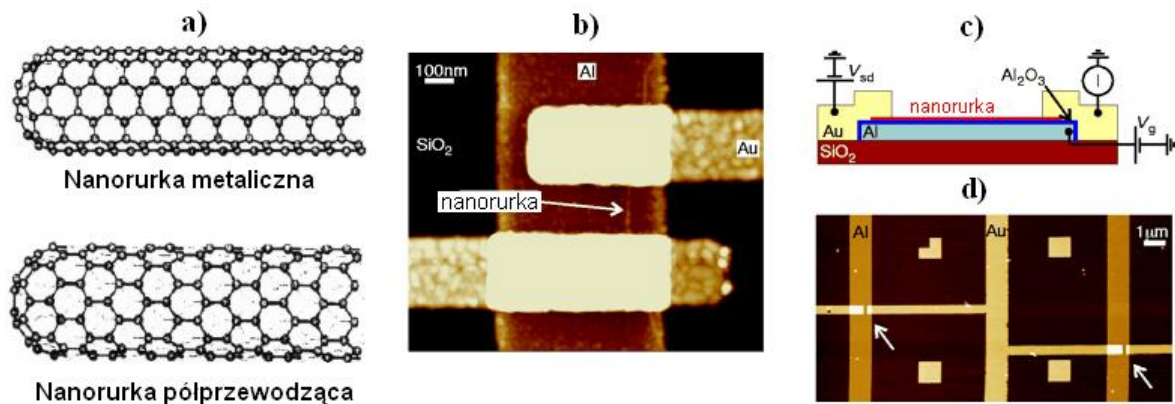
Tranzystor na nanorurkach węglowych

Nanorurki węglowe są fulerenami czyli trzecią po graficie i diamencie odmianą krystaliczną węgla. Średnica najcieńszych nanorurek wynosi 0,7-1,0 nm, a ich długość sięga rzędu milimetrów. Oprócz bardzo dobrych właściwości mechanicznych i termicznych posiadają one ciekawe właściwości elektryczne – w zależności od ułożenia pierścieni węgla mogą mieć cechy metaliczne lub półprzewodnikowe – rys 11a. Z tego powodu możliwe jest zastosowanie nanorurek w konstrukcji tranzystora - rys. 11b⁸. Konstrukcja i zasada działania tranzystora jest podobna do przedstawionej na rysunku 3, z tym, że kanał jest w postaci półprzewodzącej nanorurki węglowej z nałożoną na dwóch końcach metalizacją ze złota stanowiącą kontakty źródła i drenu. Drut aluminiowy pokryty kilkunanometrową warstwą tlenku został użyty jako elektroda bramki. Największym trudnością w wytwarzaniu elementów z nanorurek jest problem z umieszczeniem ich we właściwym miejscu układu – możliwe jest to np. za pomocą ostrza mikroskopu AFM, lecz jest to proces zbyt mało

⁷ L.P. Kouwenhoven, C.M. Marcus, Quantum Dots „Physics World” vol.11 no. 6, 35-39 (1998).

⁸ Bachtold A, Hadley P, Nakanishi T, Dekker C (2001) Logic Circuits with Carbon Nanotube Transistors. „Science”, vol 294, p 1317.

wydajny. W związku z tym trwają prace nad metodami pozwalającymi na wzrost nanorurek bezpośrednio w określonym miejscu układu elektronicznego.



Rys 11. Struktura rurek węglowych⁹ (a), obraz tranzystora wykonany mikroskopem AFM (b), przekrój struktury (c), widok układu logicznego składającego się z dwóch tranzystorów-zaznaczone strzałkami (d).

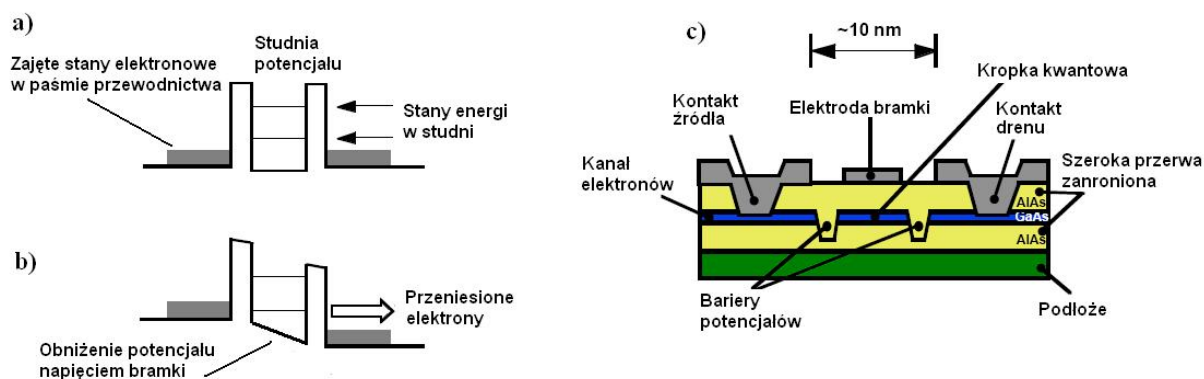
Inne zastosowania nanorurek to czujniki gazów, ostrza mikroskopów sił atomowych, emiterzy polowe, wyprowadzenia metaliczne układów nanoelektronicznych. Nanorurki węglowe są tematem na tyle ciekawym, że najwięksi optymiści twierdzą, że nanorurki są przyszłością nanoelektroniki, osoby rozważniejsze podchodzące do tematu uważają, że nanorurki są „poligonem doświadczalnym” dla rozwoju elektroniki molekularnej.

Kwantowe struktury rezonansowe

Wykorzystując istnienie dyskretnych poziomów energetycznych w studni potencjałów kropki kwantowej, można stworzyć tranzystor, którego zasada działania jest pokazana na rysunku 12a¹⁰. Bariery potencjału otaczające kropkę kwantową zapobiegają przepływowi ładunku przez strukturę. Przyłożenie napięcia na elektrodę bramki powoduje obniżenie energii wszystkich stanów w studni potencjałów i wprowadza je w stan rezonansu z elektronami w paśmie przewodnictwa. Wyrównanie poziomów energetycznych w źródle i studni potencjałów umożliwia przepływ prądu elektronowego do drenu.

⁹ McEuen PL, Fuhrer MS, Park H (2002) Single-Walled Carbon Nanotube Electronics, IEEE Trans Nanotechnology, vol 1, p 78.

¹⁰ J. Randall, et al, Resonant Tunneling Devices and Logic Circuits: Lateral Tunneling Devices, niepublikowane sprawozdanie, Texas Instruments Corp., Dallas, TX 1995.



Rys 12. Zasada działania tranzystora ze strukturą rezonansową (a), (b) i rozwiązanie konstrukcyjne takiego przyrządu (c)

Podsumowanie

Z jednej strony rozmiar „nano” stanowi ograniczenie w działaniu klasycznych przyrządów elektronicznych i powoduje, że poszukiwane są nowe konstrukcje i technologie, które pozwolą oddalić w czasie osiągnięcie granicy, polegającej na osiągnięciu minimalnego rozmiaru przyrządu pozwalającego na jego poprawne działanie. Z drugiej strony istnieją już technologie w skali „nano” umożliwiające w sposób powtarzalny i kontrolowany wytwarzanie na skalę masową przyrządów elektronicznych posiadających lepsze parametry użytkowe w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami.

Jednocześnie istnieją przesłanki (badania laboratoryjne, symulacje, obliczenia i modele teoretyczne) pozwalające sądzić, że możliwe będzie wykorzystanie w systemach funkcjonalnych zjawisk fizycznych zachodzących w pojedynczych cząsteczkach i atomach, które pozwolą w tak istotnym stopniu zwiększyć szybkości przetwarzania i przesyłania danych oraz możliwości ich gromadzenia, że może to spowodować fundamentalną zmianę w życiu pojedynczego człowieka oraz całych społeczeństw.