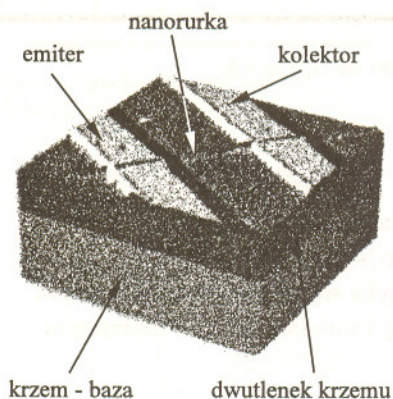


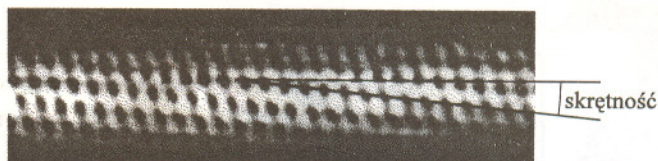
## Aktualności (nie tylko) fizyczne

Synonimem cienkości jest ludzki włos. Wyobraźmy sobie rurkę, której średnica ma się tak do grubości włosa, jak ta do średnicy kanału burzowego. Okazuje się, że takie **nanorurki** istnieją i mają bardzo ciekawe własności. Robi się je z najbardziej „plastycznego” (na poziomie molekularnym) materiału, jakim jest węgiel.

Jak wiadomo, węgiel występuje w dwóch odmianach krystalicznych, jako diament oraz grafit. W pierwszym przypadku tworzy niezwykle trwałą strukturę przestrzenną opartą na czworościanie (każdy atom ma czterech sąsiadów), a w drugim płaską sześciokątną siatkę (trzech sąsiadów). W ciągu ostatnich lat okazało się, że lokalnie dwuwymiarowych odmian węgla, w których każdy atom ma trzech sąsiadów, jest znacznie więcej. Odkryto tzw. fullereny, molekuly przypominające piłki (wśród których jest oczywiście cząsteczka  $C_{60}$  zbudowana z 20 sześciokątów i 12 pięciokątów, czyli popularna „futbolówka”) oraz właśnie nanorurki powstające ze zwinięcia płaskiej siatki w rurkę. Można spodziewać się, że węglowe nanorurki mają nie tylko nadzwyczajne właściwości mechaniczne, ale również elektryczne. Prawie natychmiast po wykryciu tego rodzaju molekuł [1] przewidziano [2] zależność ich przewodnictwa elektrycznego od promienia rurki i jej skrętności (skoku linii śrubowej tworzonej przez pasek przylegających bokami sześciokątów; zobacz reprodukowany poniżej obraz nanorurki uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego [3]). W zależności od tych parametrów nanorurka powinna być jednowymiarowym przewodnikiem lub półprzewodnikiem. Oczekiwania te zostały potwierdzone doświadczalnie na początku tego roku [3], a majowe *Nature* [4] przyniosło informację o pierwszym, działającym w temperaturze pokojowej tranzystorze opartym na pojedynczej nanorurce (reprodukcja na marginesie).



Nanorurka jako tranzystor [4]. Półprzewodząca nanorurka węglowa łączy emiter z kolektorem. Ujemne napięcie przyłożone do krzemowego podłoża indukuje w nanorurce nośniki typu p i tym samym włącza tranzystor.



Zespół z politechniki w holenderskim Delft [5] połączył za pomocą węglowej, półprzewodzącej nanorurki o średnicy 1,3 nm dwie elektrody platynowe odległe o 300 nm i położone na warstwie  $SiO_2$ . Włączenie złącza odbywało się za pomocą przyłożenia ujemnego napięcia do podłoża, co powodowało pojawianie się nośników typu p (dziur) w nanorurce. Autorzy szacują docelową częstotliwość, z jaką ich tranzystor mógłby pracować, na 10 THz. Po przeanalizowaniu charakterystyk prądowych złącza okazało się, że są one jakościowo zgodne z półklasycznym modelem pasmowym stosowanym do opisu współcześnie używanych układów scalonych. Wydaje się to świadczyć, że jeszcze jesteśmy dość daleko od skali integracji, w której logika dwuwartościowa nie mogłaby już być stosowana ze względu na efekty kwantowe.

Trudno już dzisiaj powiedzieć, jak długo trzeba będzie poczekać na pierwsze komercyjne zastosowanie złącza TUBEFET, jak je nazwali autorzy [5]. Przyszła produkcja układów scalonych tego typu może zostać oparta na technice biomolekularnej.

Jednym z ulubionych tematów klasycznej science-fiction było (jest) opisywanie „nieziemskich” form życia. Wśród takich pomysłów pojawiło się życie oparte na krzemie, cięższym koledze węgla. O ile możliwość zastąpienia krzemem węgla w tworzeniu życia pozostaje w kręgu SF, to zastąpienie krzemu węglem w nanoelektronice wydaje się nabierać realnych kształtów.

- [1] S. Iijima, *Nature* **354** (1991) 56.
- [2] N. Hamada i inni, *Phys. Rev. Lett.* **68** (1992) 1579;  
R. Saito i inni, *Appl. Phys. Lett.* **60** (1992) 2204;  
J. Mintmire i inni, *Phys. Rev. Lett.* **68** (1992) 631.
- [3] M. S. Dresselhaus, *Nature* **391** (1998) 19;  
J. W. G. Wildöer i inni, *Nature* **391** (1998) 59;  
T. W. Odom i inni, *Nature* **391** (1998) 62.
- [4] Paul L. McEuen, *Nature* **393** (1998) 15.
- [5] S. J. Tans, A. R. M. Verschueren, C. Dekker, *Nature* **393** (1998) 49.

Piotr ZALEWSKI