



Elektronika na węglu

A. Kołodziej

Zastosowanie grafenu

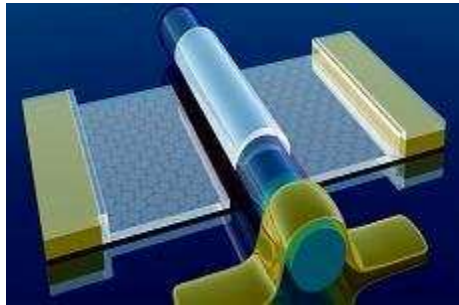
- Materiał ten ma szansę w wielu zastosowaniach zastąpić krzem^{[4][5]}. Naukowcy amerykańskiego MIT zbudowali eksperymentalny grafenowy układ, jako mnożnik częstotliwości, co oznacza, że jest w stanie odebrać przychodzący sygnał elektryczny pewnej częstotliwości i wyprodukować sygnał wychodzący, będący wielokrotnością tej częstotliwości. W tym przypadku, układ stworzony przez MIT podwoił częstotliwość elektromagnetycznego sygnału. Testy przeprowadzone przez IBM wykazały, że tranzystor wytworzony w procesie technologicznym 240 nm jest w stanie osiągnąć częstotliwość do 100 GHz^[6]. Przejrzystość i znakomite przewodnictwo sprawiają, że grafen nadaje się do wytwarzania przejrzystych, zwijanych w rolkę wyświetlaczy dotykowych, źródeł światła czy baterii słonecznych. Czujniki z grafenu potrafią zarejestrować obecność pojedynczej cząsteczki szkodliwej substancji. Jako dodatek do tworzyw sztucznych, grafen może je przekształcić w przewodniki elektryczności, podnosi też odporność na ciepło oraz wytrzymałość mechaniczną. Tak elastyczne i wytrzymałe materiały nadają się do budowy samochodów, samolotów czy pojazdów kosmicznych. Elektrony poruszają się w grafenie z prędkością sięgającą 1/300 prędkości światła, pozwala to wykonywać wiele doświadczeń, które dotąd wymagały użycia akceleratora.



Otrzymywanie grafenu

- Grafenu w stanie wolnym nie można otrzymać : nietrwałość i skłonność do tworzenia struktur trójwymiarowych (np. fulerenów i nanorurek). Najprościej Grafen otrzymuje się metodami mikromechanicznymi.
- Wychodząc z grafitu pirolitycznego o wysokim stopniu uporządkowania, wyizolować można struktury o grubości od jednej do kilku warstw grafenu osadzone na nośniku
- Wzrost epitaksjalny (np. SiC) Sutter et al., Nature Mater. 7, 171 (2009)
- naukowcom z Penn State udało się skonstruować 4-calowe wafle grafenowe, które cechują się od 100 do 1000 razy większą prędkością pracy, niż wafle krzemowe.

Najszybszy tranzystor grafenowy na świecie



- Inżynierowie z UCLA stworzyli oparty o grafen tranzystor nanodrutowy o częstotliwości taktowania 300 gigaherców. Grafen w połączeniu z nanodrutem z krzemku kobaltu w izolującej powłoce tlenku glinu w celu stworzenia mikroskopijnego tranzystora o długości kanału wynoszącej 140 nanometrów. Nanodrut 50 nm, dzięki czemu tranzystor grafenowy mógłby dojść do częstotliwości taktowania rzędu 1 teraherca.

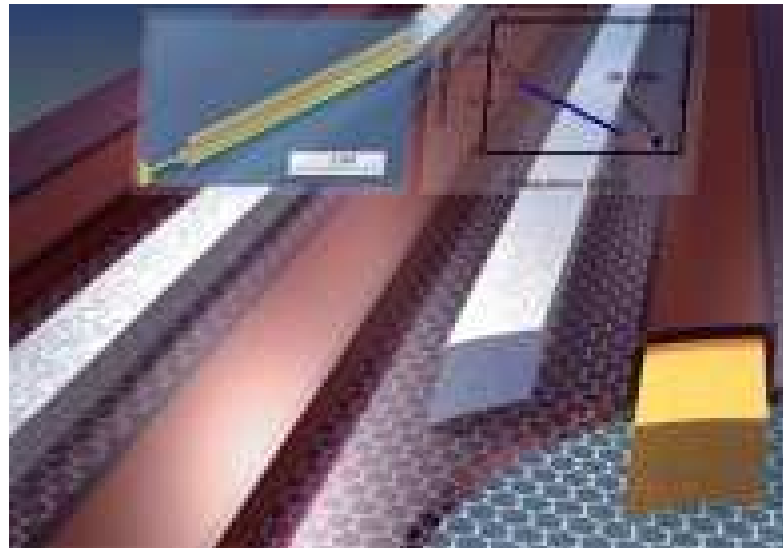


Brak pasma wzbronionego

- Brak pasma wzbronionego w grafenie powoduje, że, pomimo iż ruchliwość elektronów w tym materiale jest znacznie wyższa niż w krzemie,
- to współczynnik on/off wynosi w nich zaledwie 10, podczas gdy w krzemie jest liczony w setkach.
- *w naszym dwuwarstwowym grafenowym tranzystorze połowym otworzyliśmy pasmo o wartości do 130 meV . Można osiągnąć też pasma o wyższych wartościach - IBM poinformował, że po otwarciu pasma w temperaturze pokojowej udało się osiągnąć w grafenie współczynnik bliski 100, a gdy urządzenie jest schłodzone wzrasta on do 2000*

Grafenowy tranzystor niemal jak CMOS

- Specjaliści z IBM-a otworzyli pasmo wzbronione w tranzystorze polowym (FET) wykonanym z grafenu, **pokonując przeszkodę** na drodze do skomercjalizowania grafenowej elektroniki. Odizolowali bramkę za pomocą polimeru. To zredukowało rozpraszanie elektronów, zmniejszenie jej grubości zwiększy dalej współczynnik ON/OFF

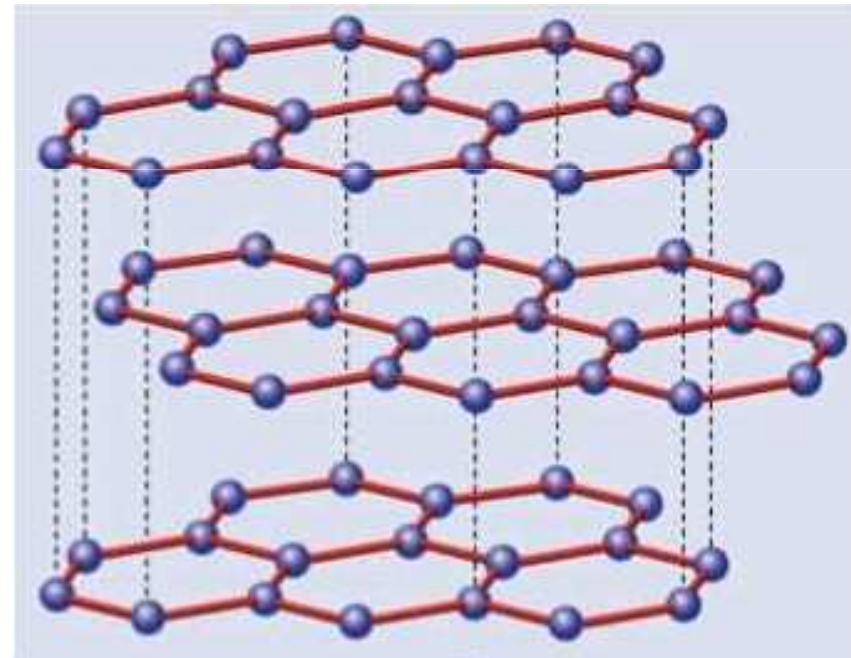


Publikowane własności

- Pierwsze pomiary przewodnictwa właściwego grafenu [Noboselov et al., 2005]
 $\sigma_{\min} \sim e^2/h = (26 \text{ k}\Omega)^{-1}$
- Połówkowy kwantowy efekt Halla $G_H = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{4e^2}{h}$
- Kwantowanie absorpcji światła widzialnego. Elektrony w grafenie zachowują się tak, jak gdyby nie posiadały masy. I dlatego widzialność grafenu nieuzbrojonym okiem jest określana przez stałą struktury subtelnej.
 $(1 - T = \pi\alpha \approx 2.3 \%)$ [Nair et al., 2008]
- Blokada kulombowska i demonstracja chaosu kwantowego [Ponomarenko et al., 2008]
- Przejście grafen-grafen [Elas et al., 2009]

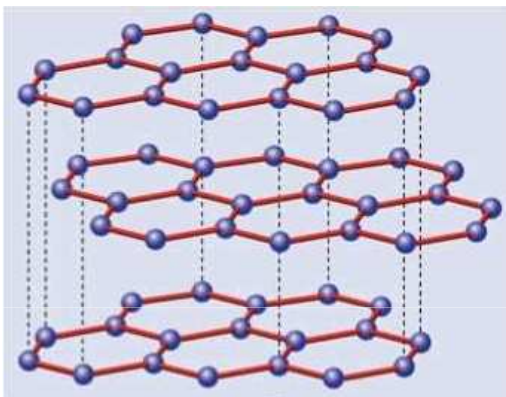
Alotropowe odmiany węgla

- 3D grafit (HOPG) '40

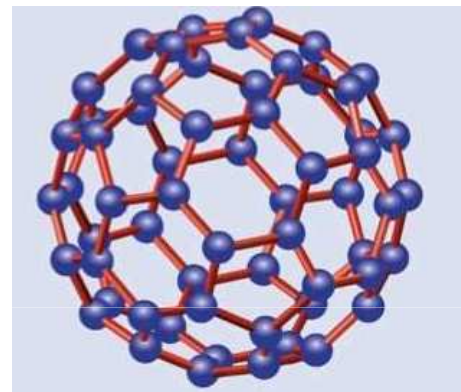


Alotropowe odmiany węgla

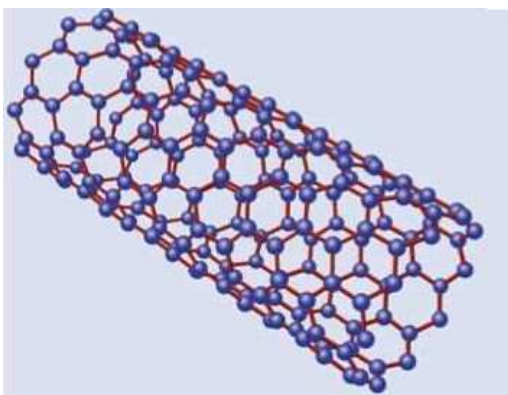
3D grafit



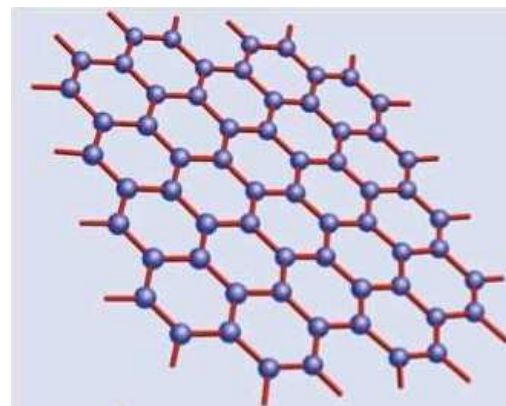
Fulereny



Nanorurki



rozważmy pojedynczą warstwę ... !



Optyczna detekcja pojedynczych płatków

BBC NEWS

UK version International version About the versions Low graph

Last Updated: Friday, 22 October, 2004, 13:18 GMT 14:18 UK

E-mail this to a friend Printable version

Radical fabric is one atom thick

A new class of material, which brings computer chips made from a single molecule a step closer, has been discovered by scientists.




Called graphene, it is a two-dimensional, giant, flat molecule which is still only the thickness of an atom.

The new class of material is much more stable than others

Search and Discovery

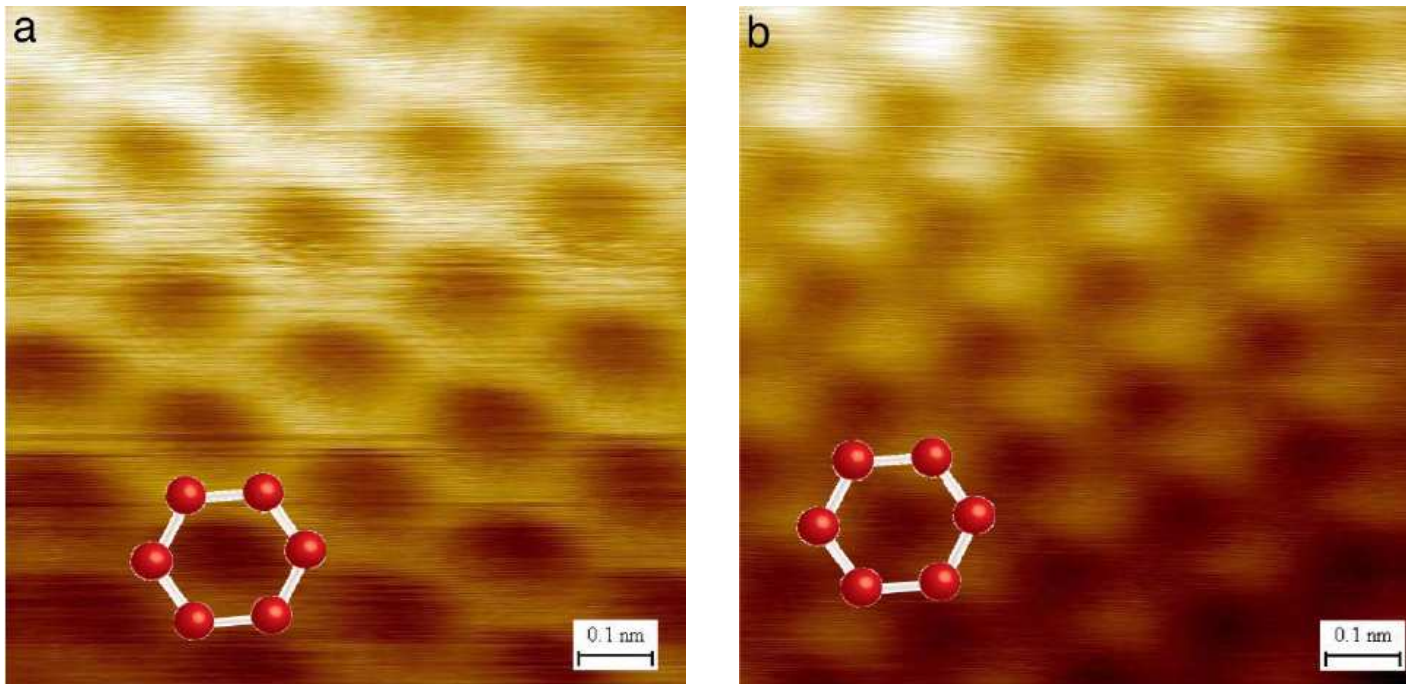
Electrons in Atomically Thin Carbon Sheets Behave like Massless Particles



A. Geim, K. Novoselov (Manchester) Science '04:
grafen: gigantyczna molekula
podejście "low-tech" (powtarzane odrywanie taśmą, nano-
ołówek)

Jakość kryształu grafenu (2D)

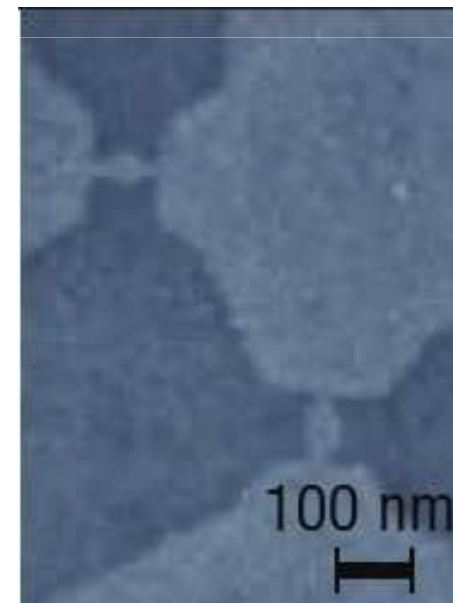
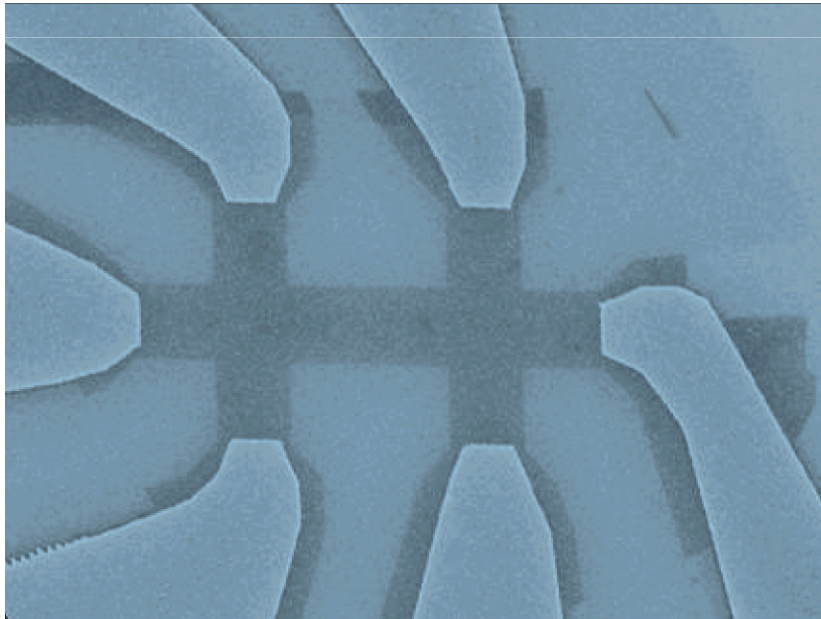
- wzór heksagonalny pojedynczej warstwy (mikroskop tunelowy)
- a także wyraźna dyfrakcja w TEM



Stolyarova et al (Columbia) Proc. Nat. Acad. Sci. '07

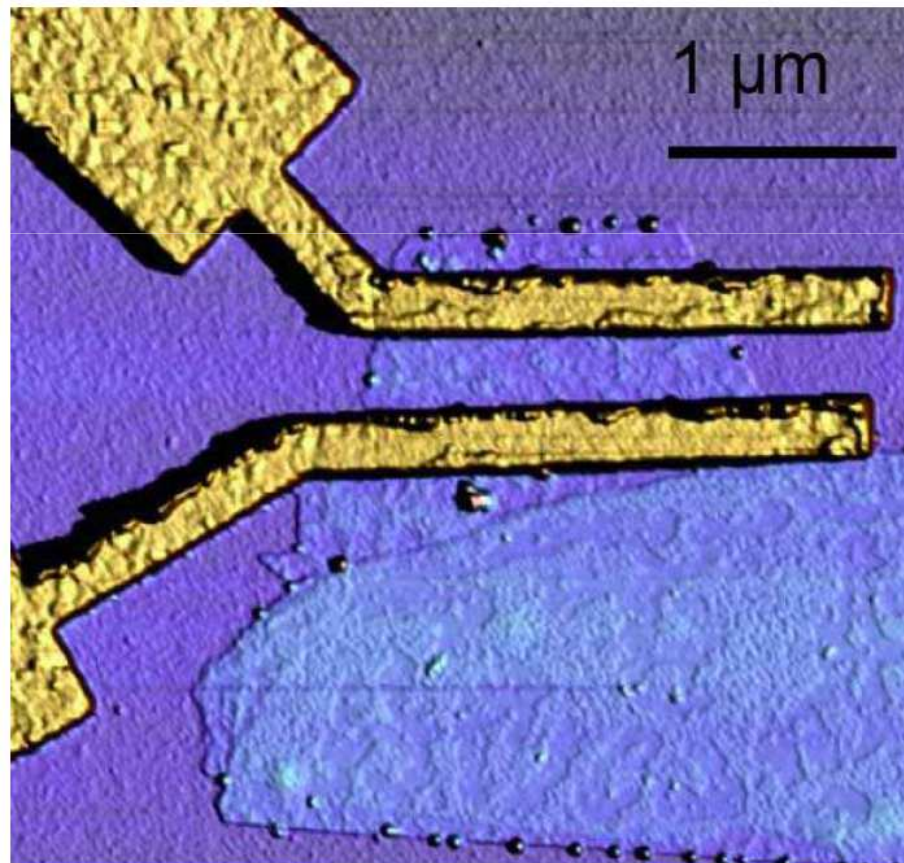
Litografia w grafenie

- możliwa standardowa obróbka: fotolitograficzna i chemiczna !!!
- łatwość uzyskiwania dobrych kontaktów np. aluminiowych !!!
- około $1\mu\text{m}$ mostki do pomiaru efektu Halla (Columbia)
- około 15nm kropki, około 1nm przewężenia (Manchester)



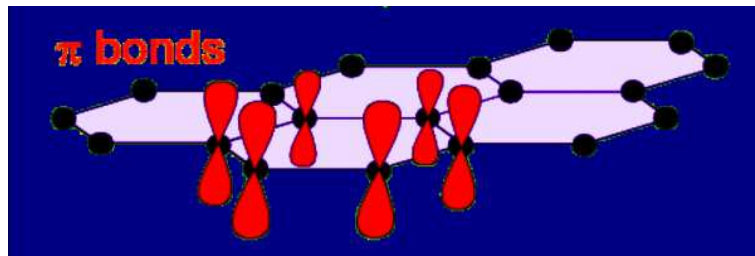
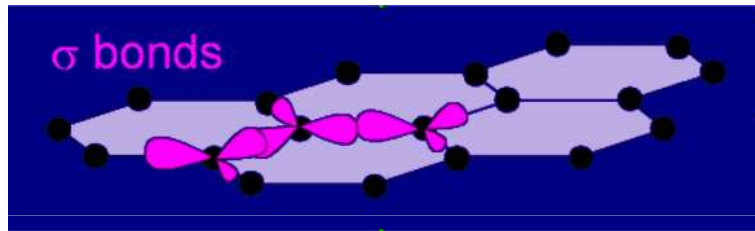
Wytrawianie kontaktów w grafenie

- podłączenie elektrod nadprzewodzących (Delft)

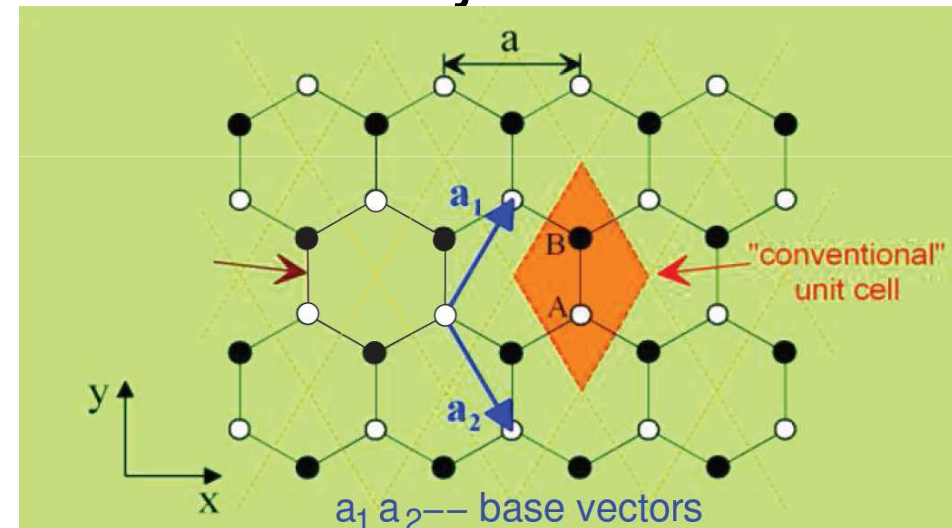


Model ciasnego wiązania

Silne wiązanie sp^2 :

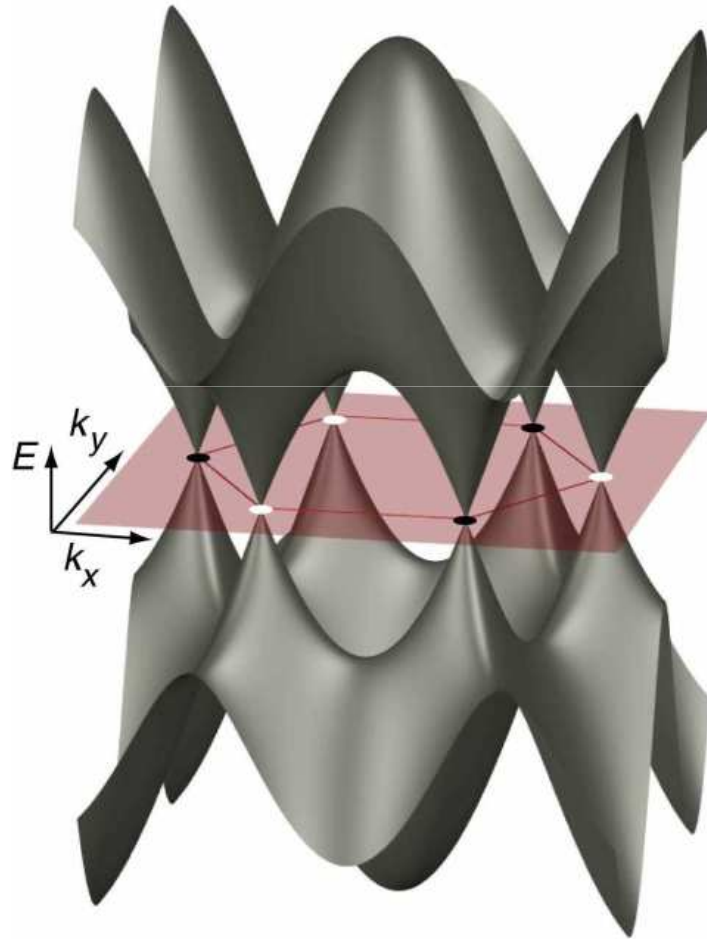


Sieć:
atomy A, B w komórce elementarnej



tylko orbitale π ważne dla transportu (w pobliżu energii Fermiego), całka przeskoku $\tau = 3.03 \text{ eV}$,

Struktura pasmowa



heksagonalna strefa Brillouina :pasma:
przewodnictwa i walencyjne
dwa nierównoważne punkty wierzchołkowe:
 \mathbb{K} i $-\mathbb{K}$ i możliwość selektywnego obsadzania

Relacja dyspersji

- efektywna relatywistyczna bezmasowa relacja dyspersji, prąd $j = v\sigma$
- Bezmasowe cząstki opisane równaniem Diraca:

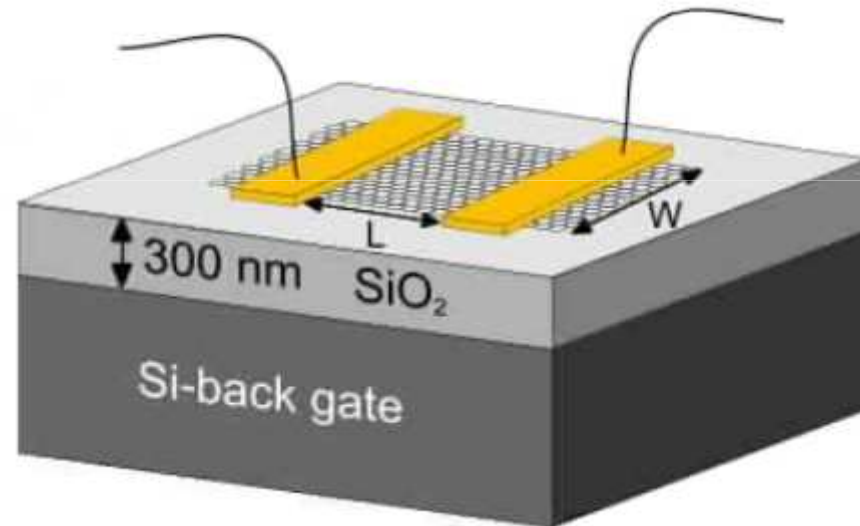
$$-i\hbar v_F \begin{pmatrix} 0 & \partial_x - i\partial_y \\ \partial_x + i\partial_y & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \end{pmatrix}$$

$$\text{gdzie: } v_F = \frac{1}{2} \sqrt{3} \tau \frac{a}{\hbar} \approx 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}, a = 0.246 \text{ nm}, \tau \approx 3 \text{ eV}$$

$$v = 10^6 \text{ m/s} = c/300$$

- kierunek ruchu związany z kierunkiem pseudospinu

Przykład tranzystora



Parametry:

$$L = 100 \mu\text{m}$$

$$n = 10^{13} \text{cm}^{-2}$$

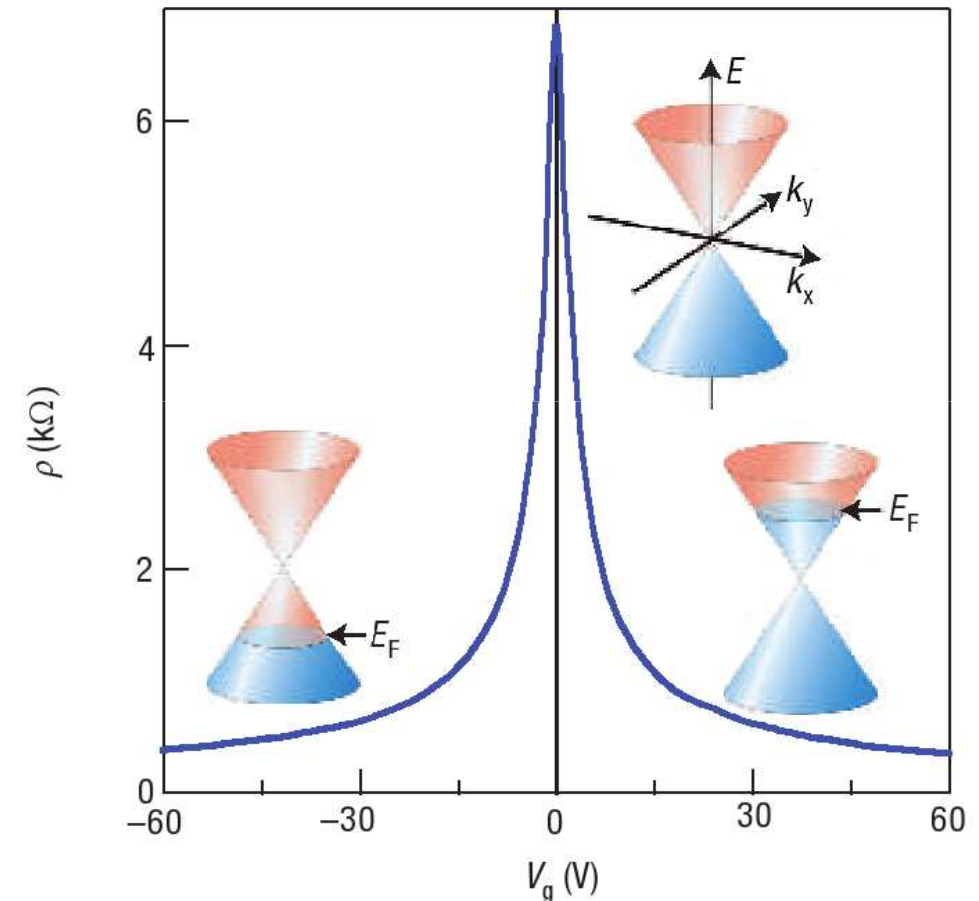
$$\mu = 2 \cdot 10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$$

duża ruchliwość μ (słabo zależna od T , n)

... THz tranzystor balistyczny
(Berger et al. Science '06)

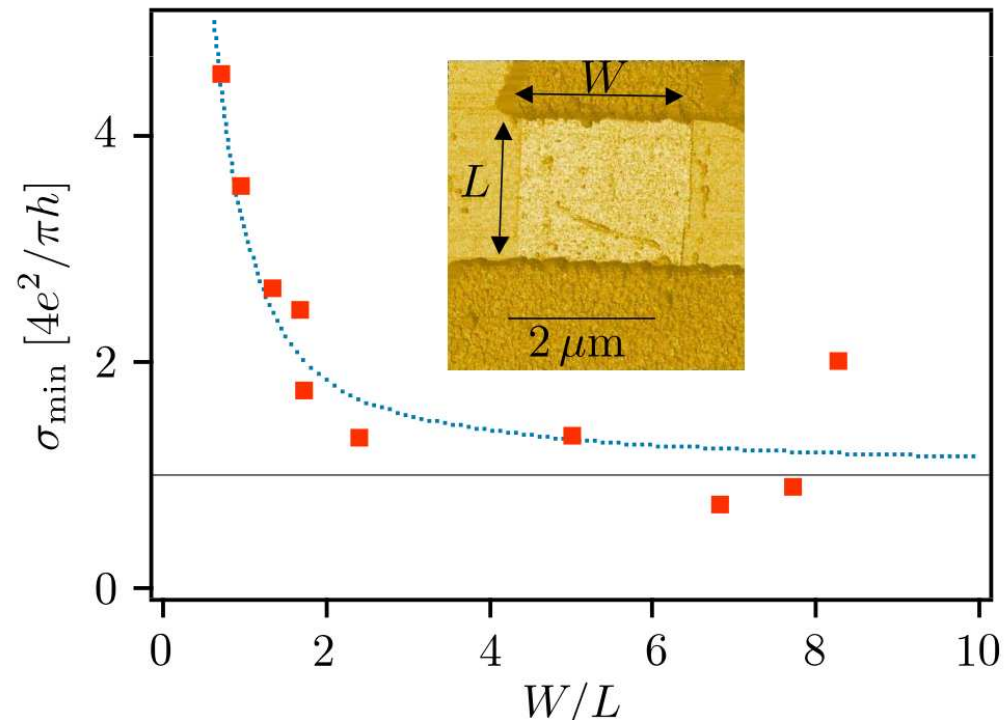
efekt polowy w metalu

Novoselov et al. (Manchester); Zhang et al. (Columbia) Nature '05



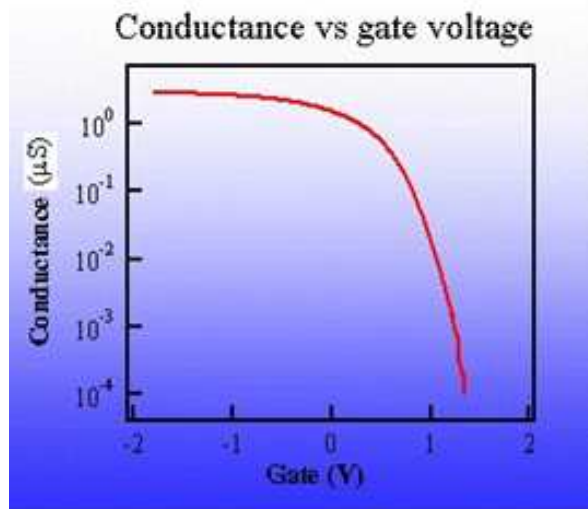
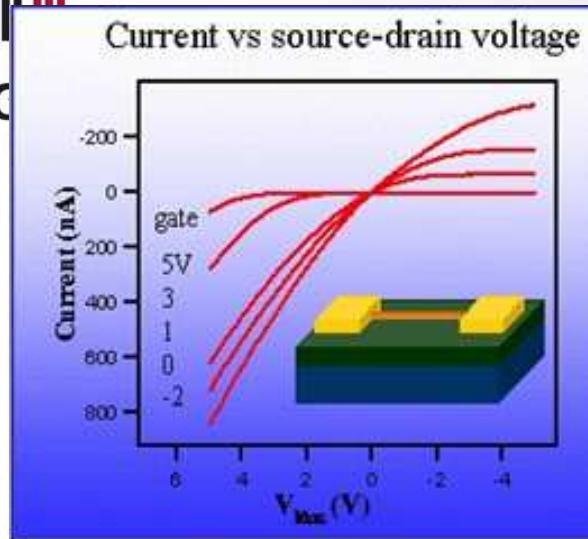
Badanie przewodnictwa

- F. Miao et al (UC, Riverside) Science Sep. '07
- zależność od proporcji W/L dla małych próbek
- Zależność od V_{gate} tylko jakościowo zgodna z rachunkiem balistycznym



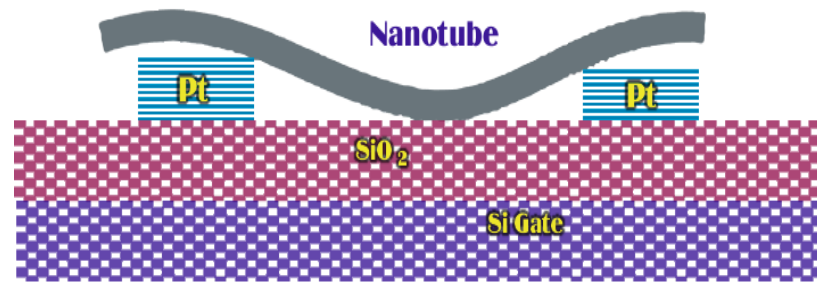


Zastosowania CNT. Nowa struktura NAND

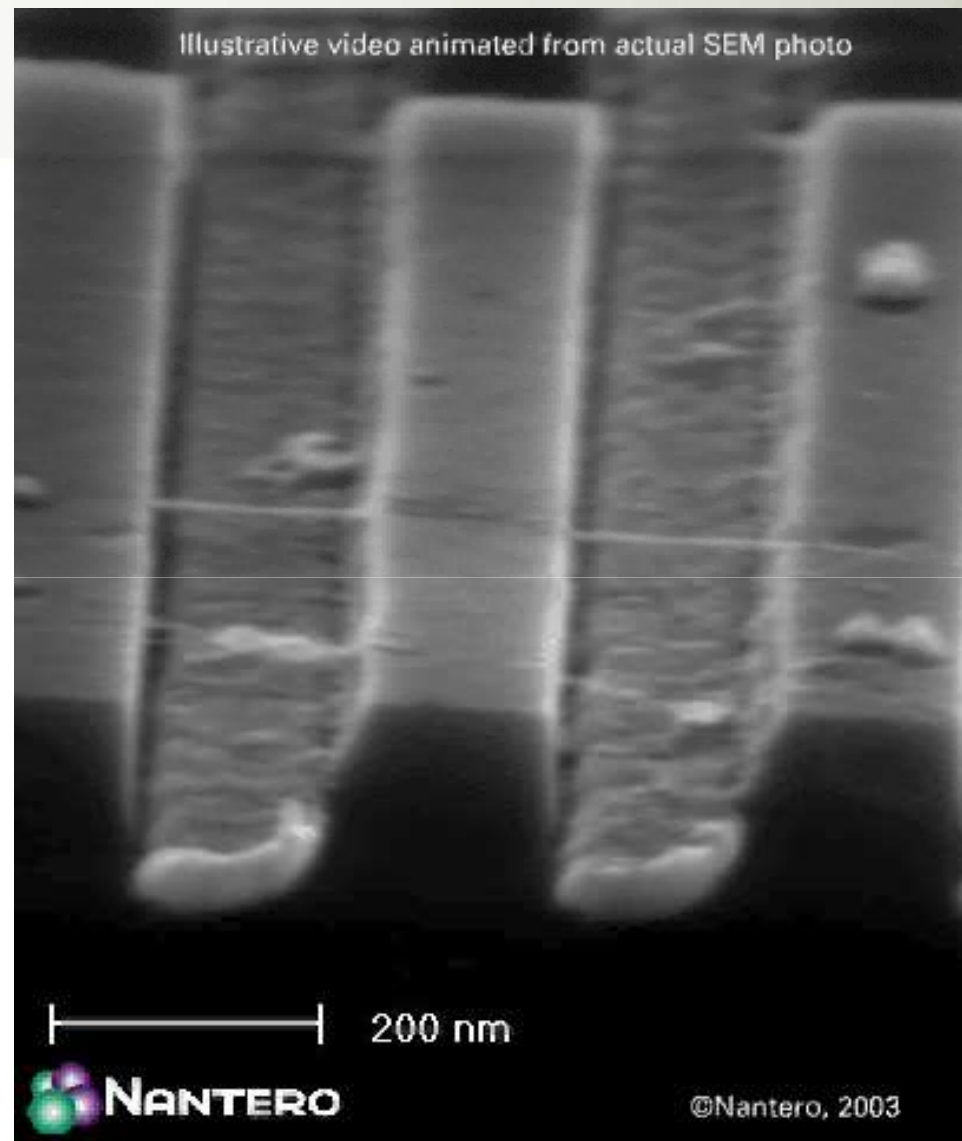


Krzemowy nanodrut.
Ruchliwością dziur $1500 \text{ cm}^2/\text{s}$.

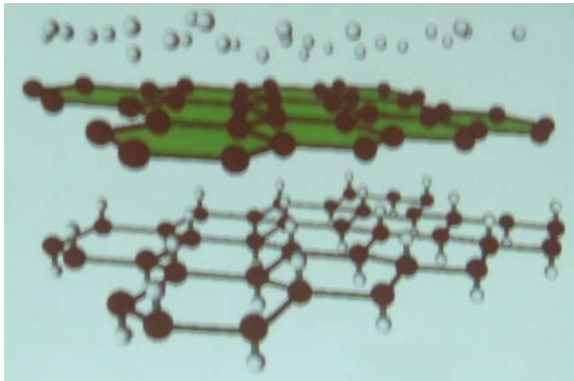
Zmiana nośników większościowych poprzez zmianę napięcia bramki w funkcjonalnych urządzeniach.



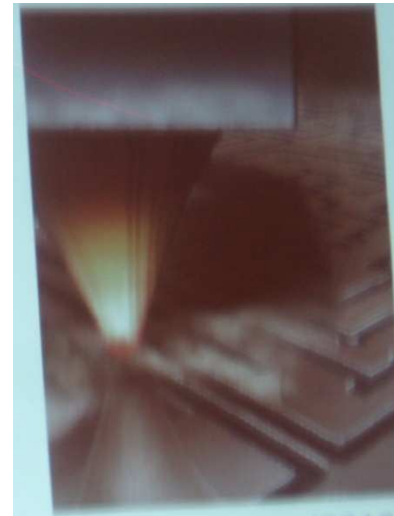
CNT-FET typowo wykazuje zachowanie typu p pod wpływem warunków zewnętrznych ze względu na przepływ ładunku między nanotubą a adsorbowanymi molekułami tlenu, natomiast przy wymianie z jonem alkalicznym wykazuje przewodnictwo typu n.



Przejście Grafen \leftrightarrow grafen



- Grafen \leftrightarrow grafen
- Odwracalne uwodorowienie (zmiana hybrydyzacji $sp^2 \rightarrow sp^3$)
Elias et al., Science (2009)



- (Wodoro) tlenek grafenu