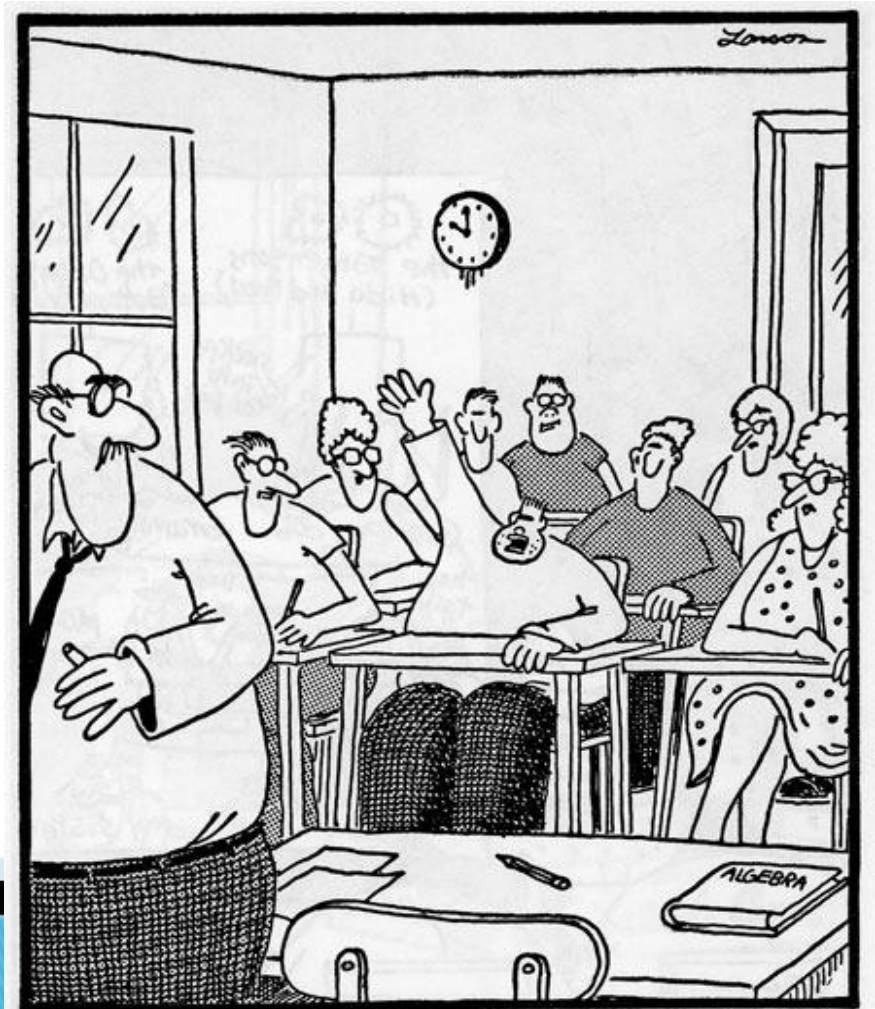


# Półprzewodniki

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

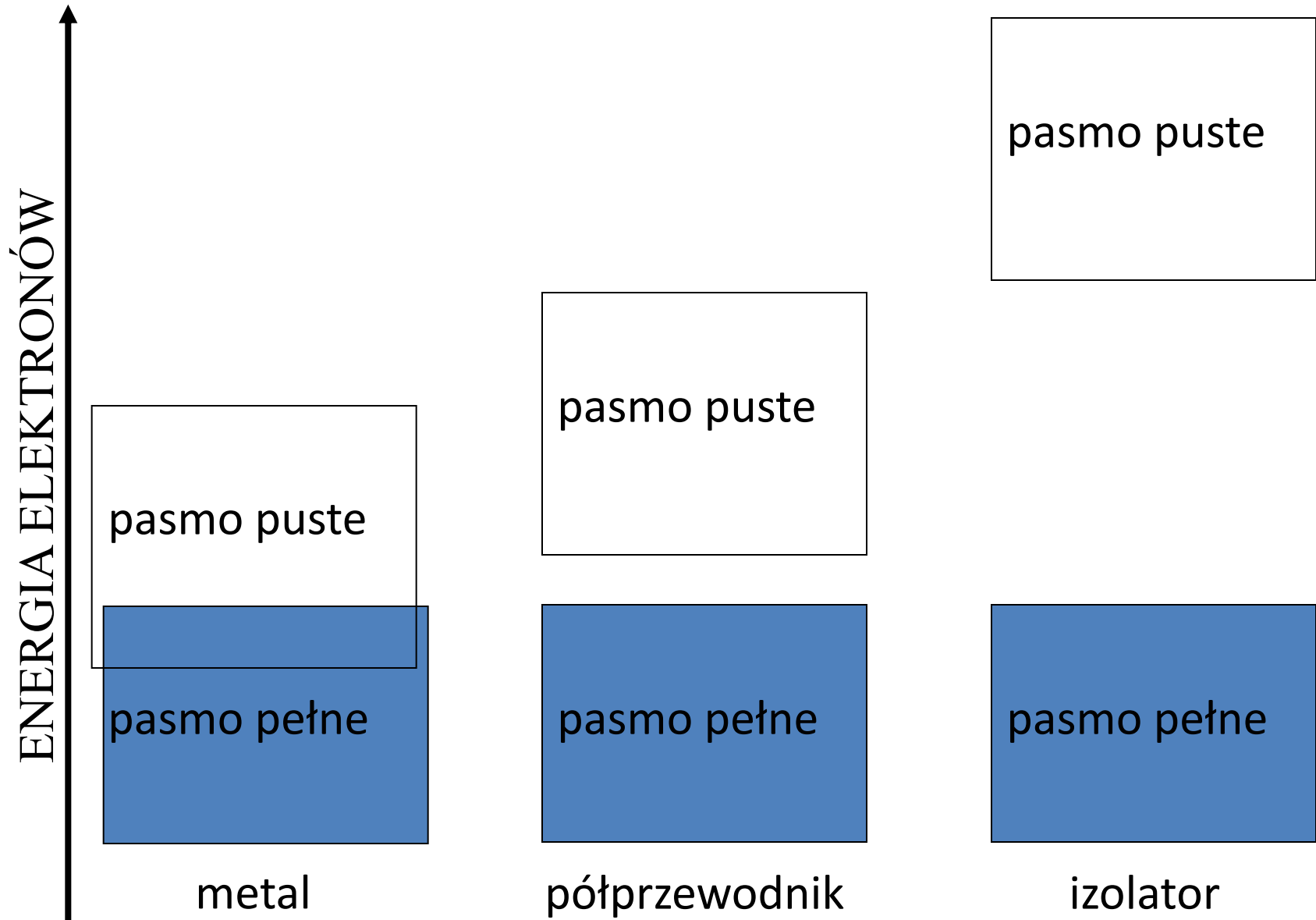
<http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/NT>

**Inżynieria**  
nanostruktur



"Mr. Osborne, may I be excused? My brain is full."

# Teoria pasmowa ciał stałych.



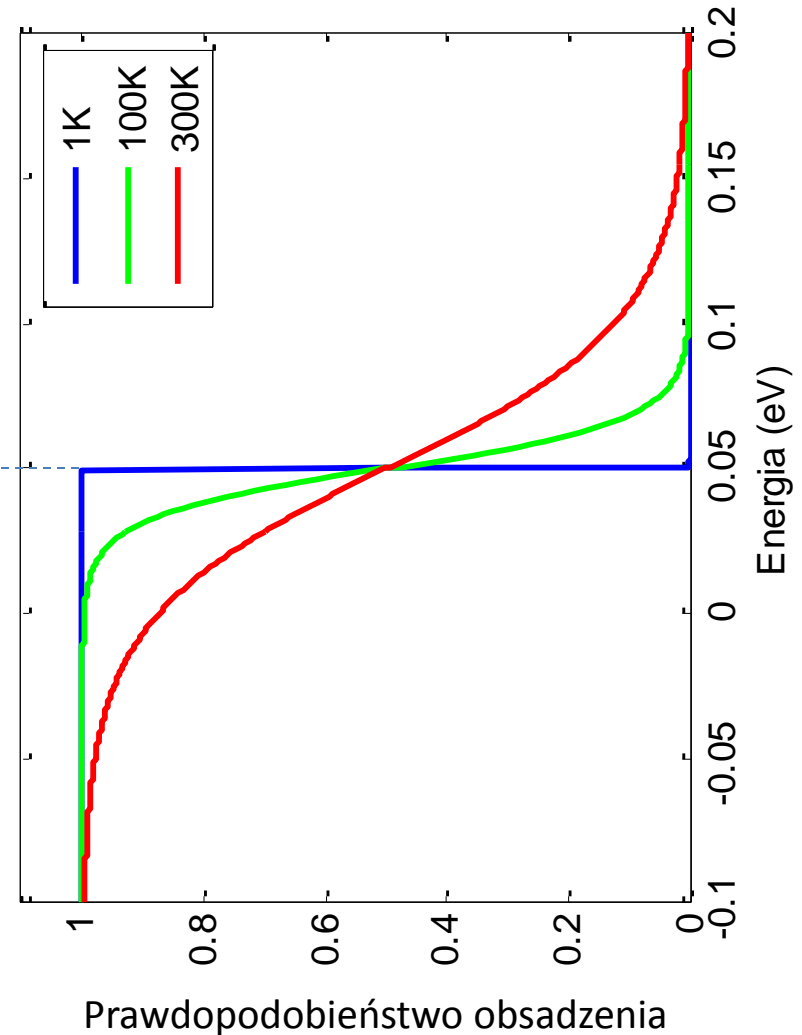
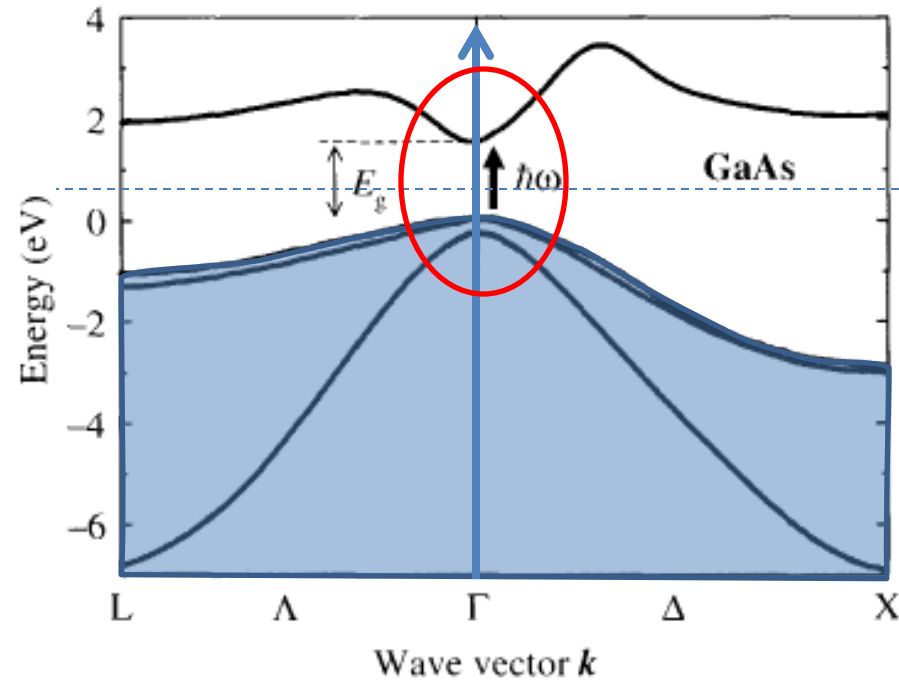
# Funkcja rozkładu

## Rozkład Fermiego-Diraca

Prawdopodobieństwo obsadzenia stanu kwantowego o energii  $E$

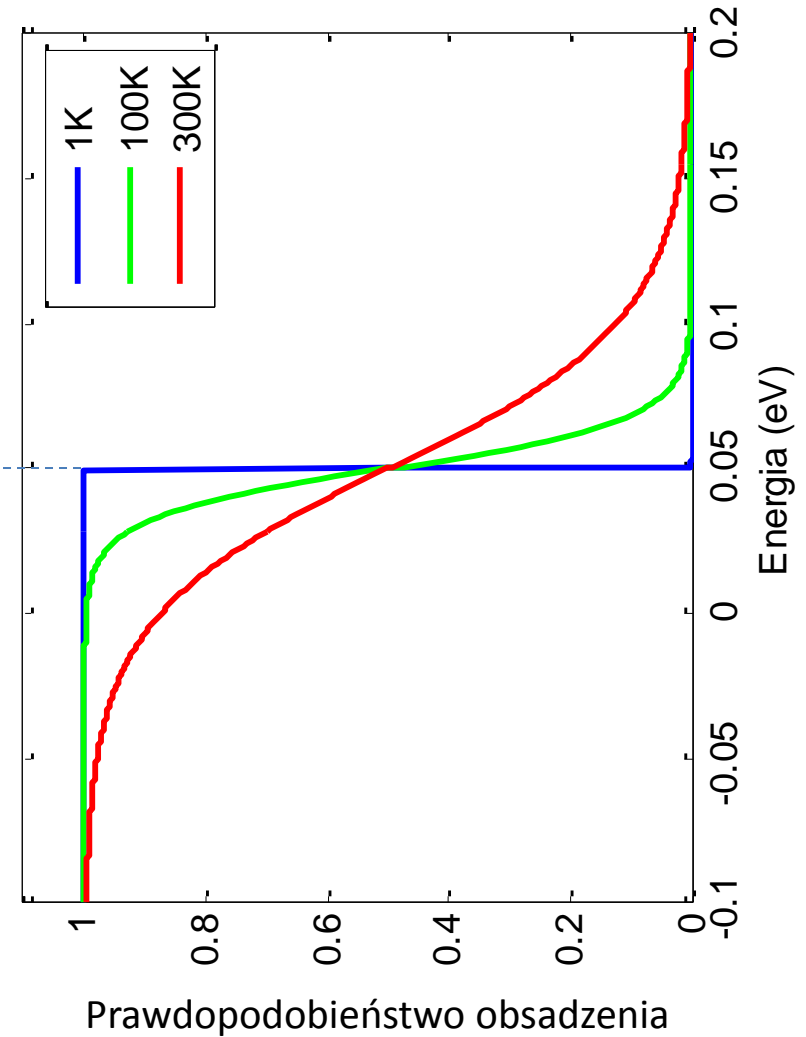
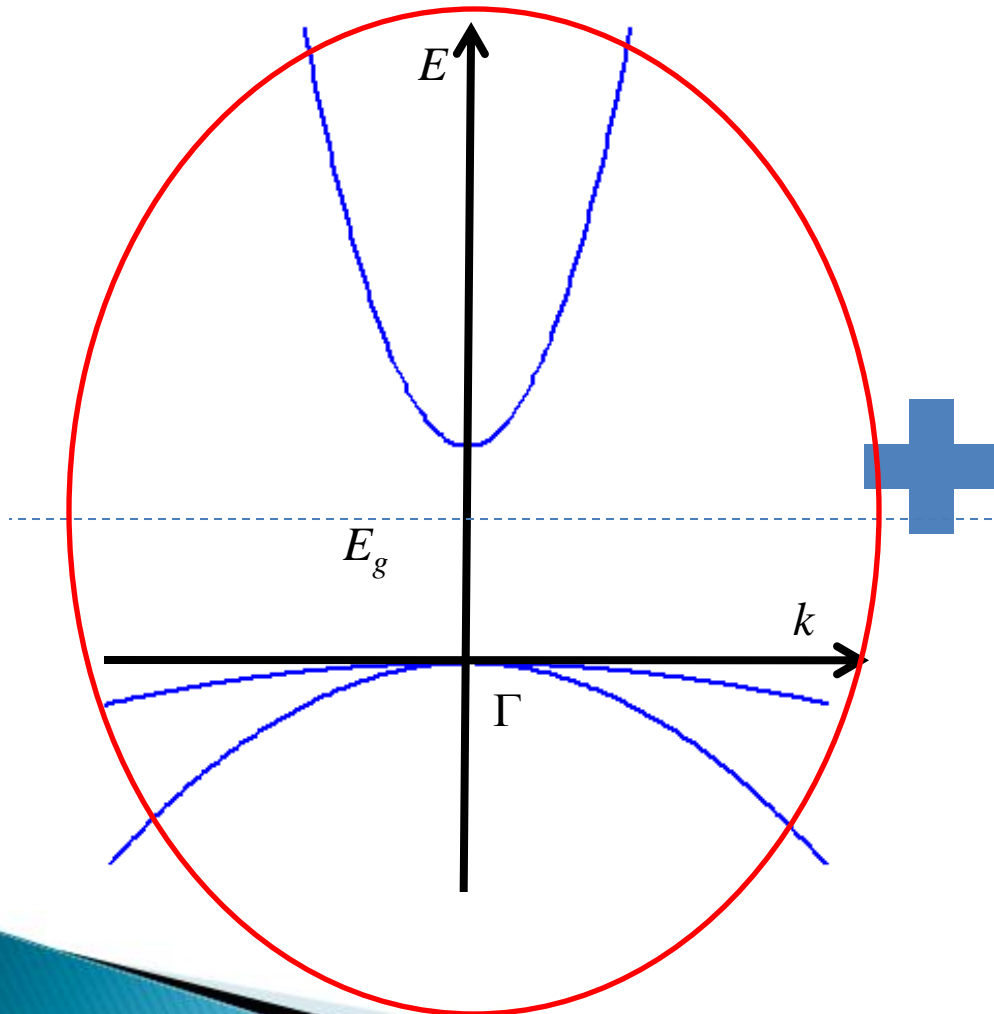
$E_F$  – potencjał chemiczny

$$f_0 = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1}$$



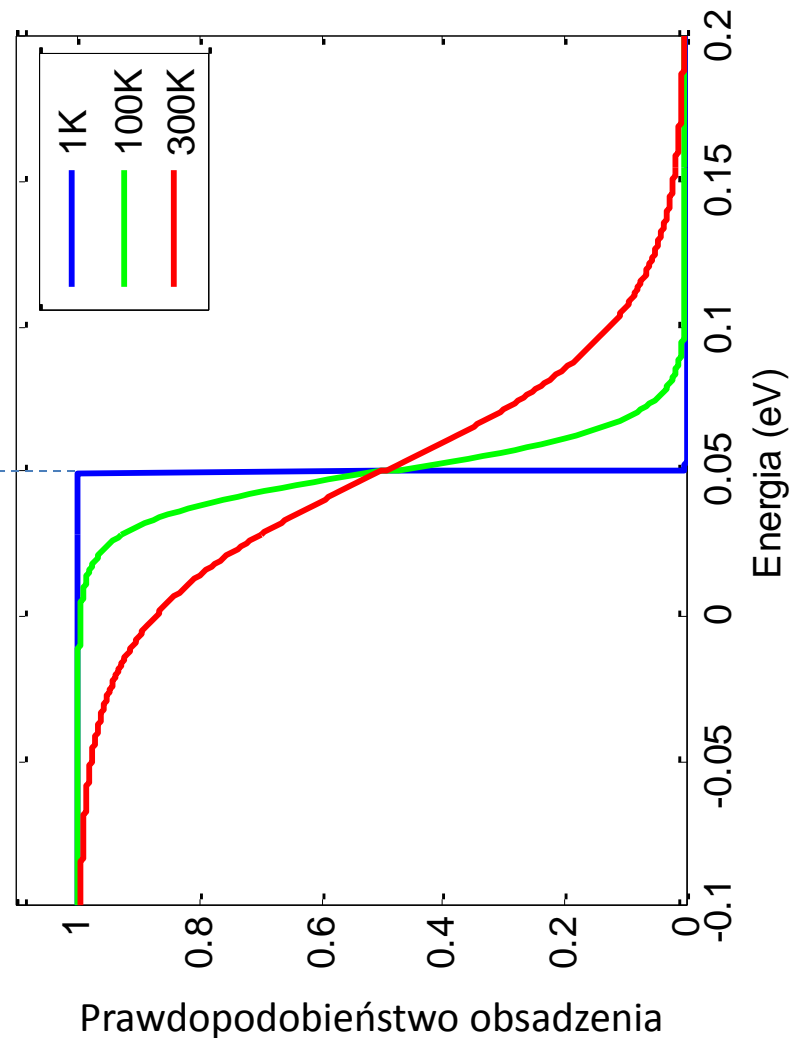
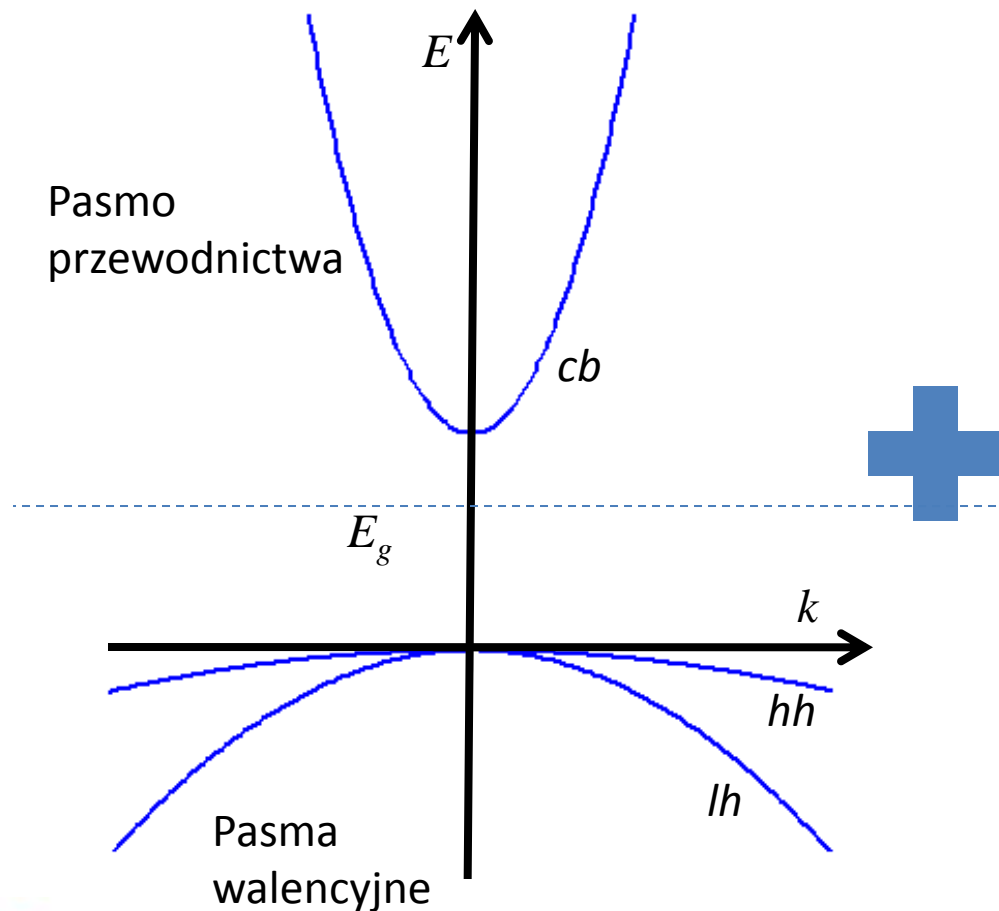
# Funkcja rozkładu

## Rozkład Fermiego-Diraca



# Funkcja rozkładu

## Rozkład Fermiego-Diraca



# Elektrony i dziury

## Gęstość stanów

Jeśli nasz kryształ ma skończone rozmiary zbiór wektorów  $\mathbf{k}$  jest skończony (choć olbrzymi!), np. możemy przyjąć okresowe warunki brzegowe i wtedy:

Warunki Borna-Karmana

Skończone rozmiary kryształu  $L_x, L_y, L_z$

$\Psi$  – postać funkcji Blocha

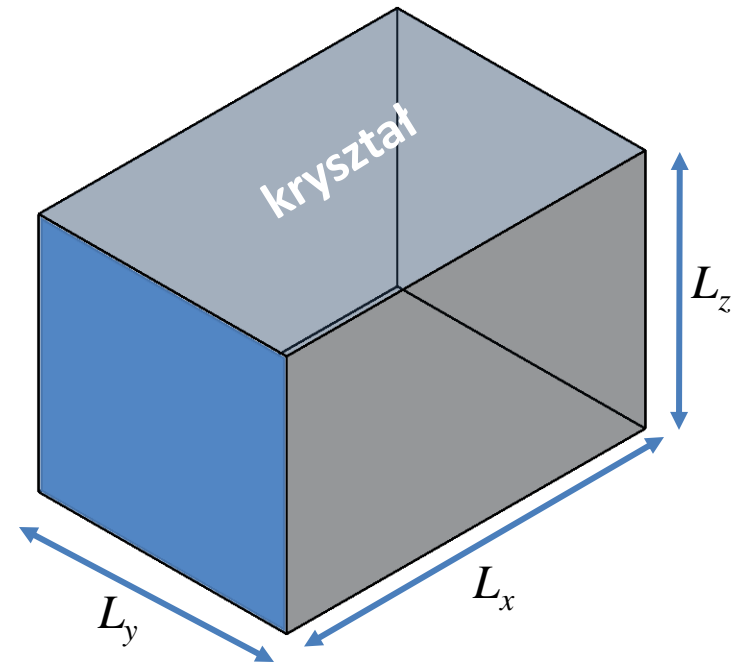
$$\Psi(x + L_x, y, z) = \Psi(x, y + L_y, z) = \Psi(x, y, z + L_z)$$

$$e^{ik_x L_x} = 1$$

$$e^{ik_y L_y} = 1$$

$$e^{ik_z L_z} = 1$$

$$\vec{k}_i = 0, \pm \frac{2\pi}{L_i}, \pm \frac{4\pi}{L_i}, \dots, \pm \frac{2\pi n_i}{L_i}$$



Stany te wyznaczają w przestrzeni odwrotnej siatkę o gęstości  $(V/2\pi)^3$   
Gęstość stanów na jednostkę trójwymiarowej przestrzeni  $k$

# Elektrony i dziury

## Gęstość stanów

Jeśli nasz kryształ ma skończone rozmiary zbiór wektorów  $\mathbf{k}$  jest skończony (choć olbrzymi!), np. możemy przyjąć periodyczne warunki brzegowe i wtedy:

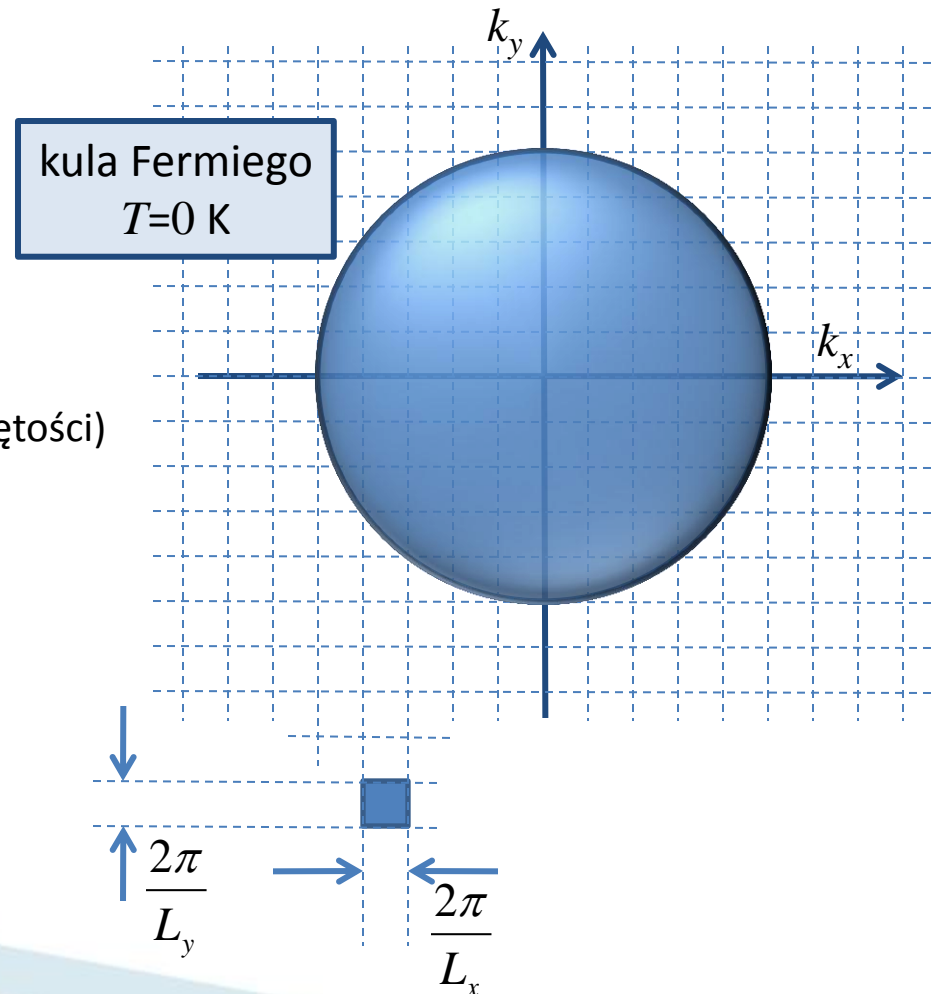
$$\vec{k}_i = 0, \pm \frac{2\pi}{L_i}, \pm \frac{4\pi}{L_i}, \dots, \pm \frac{2\pi n_i}{L_i}$$

$$\text{Ilość stanów w objętości} = \frac{1}{\frac{2\pi}{L_x} \times \frac{2\pi}{L_y} \times \frac{2\pi}{L_z}} = \frac{V}{(2\pi)^3}$$

Gęstość stanów w przestrzeni  $\mathbf{k}$  (w jednostkowej objętości)

$$\rho_k = 2 \left( \frac{1}{2\pi} \right)^3$$

przypadek 3D

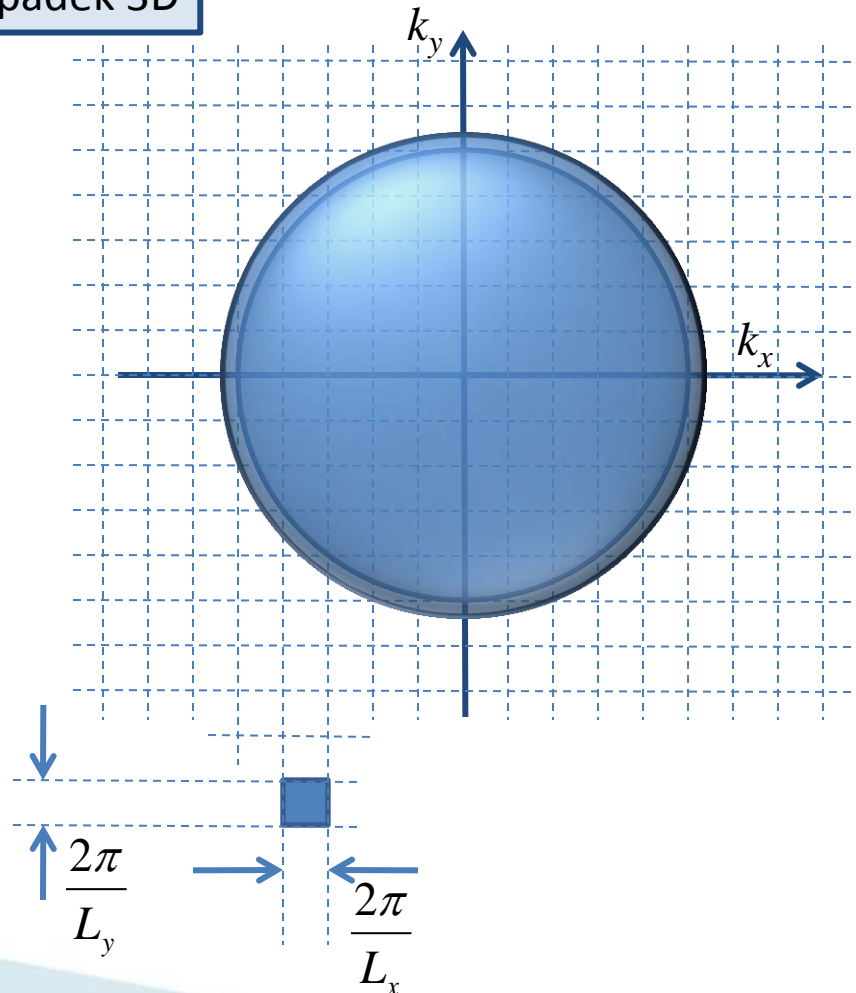
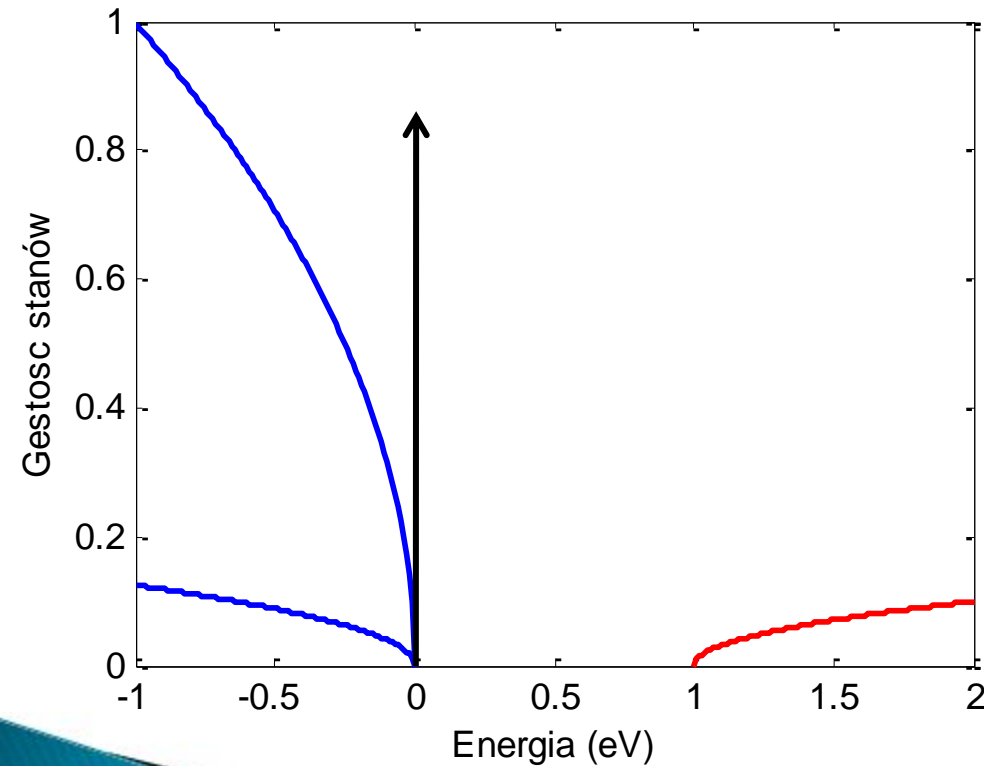


# Elektrony i dziury

## Gęstość stanów

Często wygodniejsza jest znajomość gęstości stanów w przestrzeni energii  $E$  (a więc ilość stanów w przedziale  $(E, E+dE)$ ). Dla pasma sferycznego i parabolicznego:

przypadek 3D





# Elektrony i dziury

## Gęstość stanów

Często wygodniejsza jest znajomość gęstości stanów w przestrzeni energii  $E$  (a więc ilość stanów w przedziale  $(E, E+dE)$ ). Dla pasma sferycznego i parabolicznego:

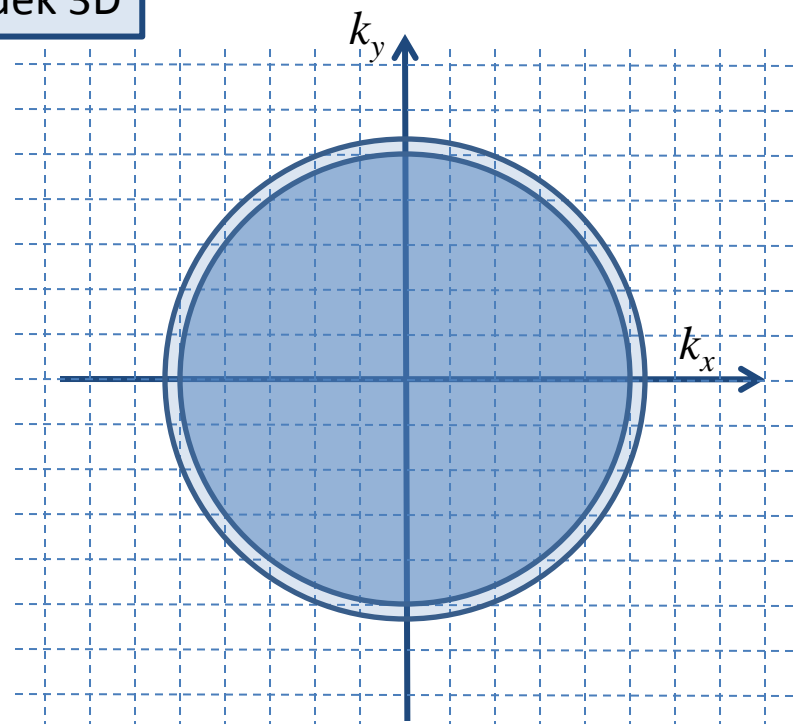
$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad \rho_k = 2 \left( \frac{1}{2\pi} \right)^3 \leftarrow \text{przypadek 3D}$$

gęstość stanów liczymy jako:

**Do domu: znajdź  $N(E)$**

$$\rho_k = 2 \left( \frac{1}{2\pi} \right)^2 \leftarrow \text{przypadek 2D}$$

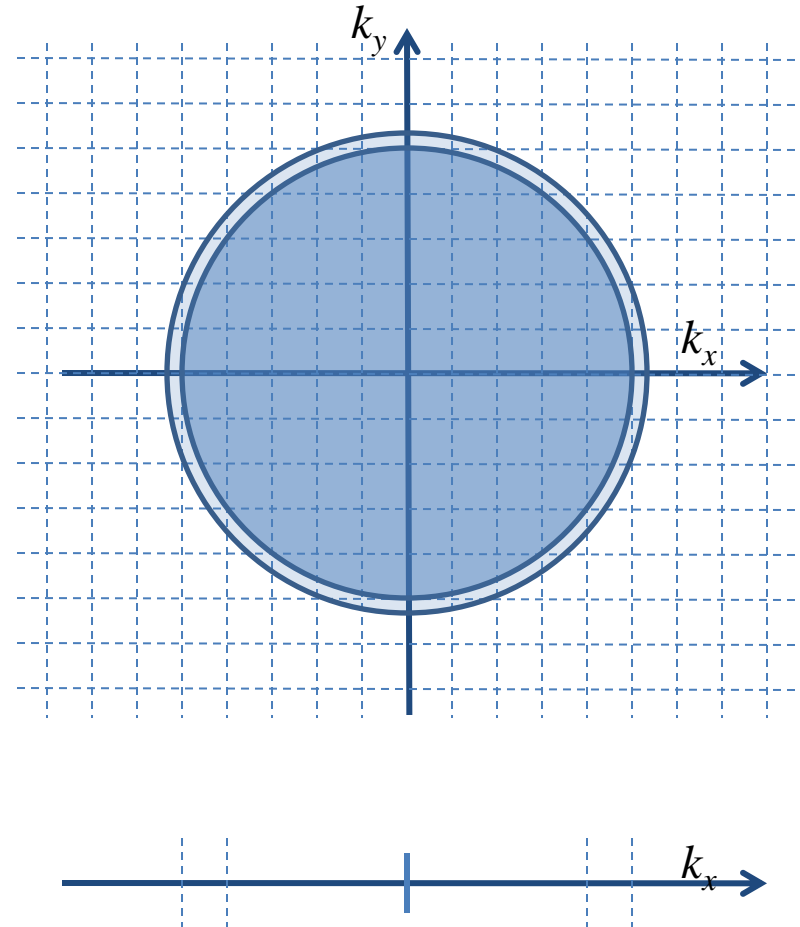
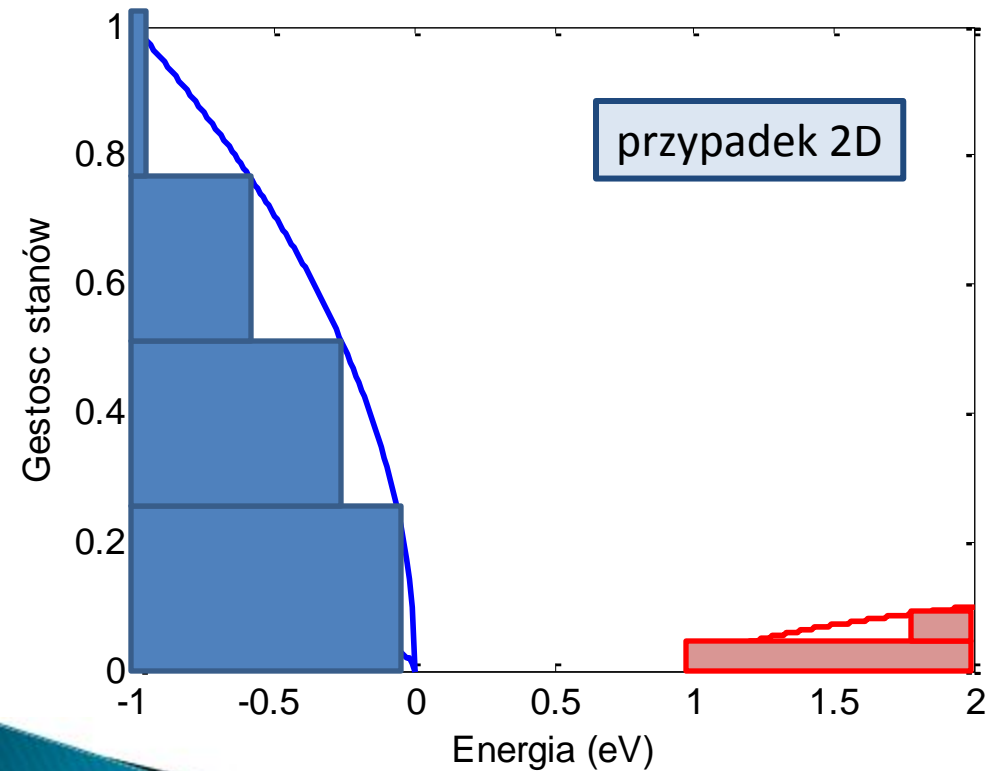
$$\rho_k = \frac{2}{2\pi} \leftarrow \text{przypadek 1D}$$



# Elektrony i dziury

## Gęstość stanów

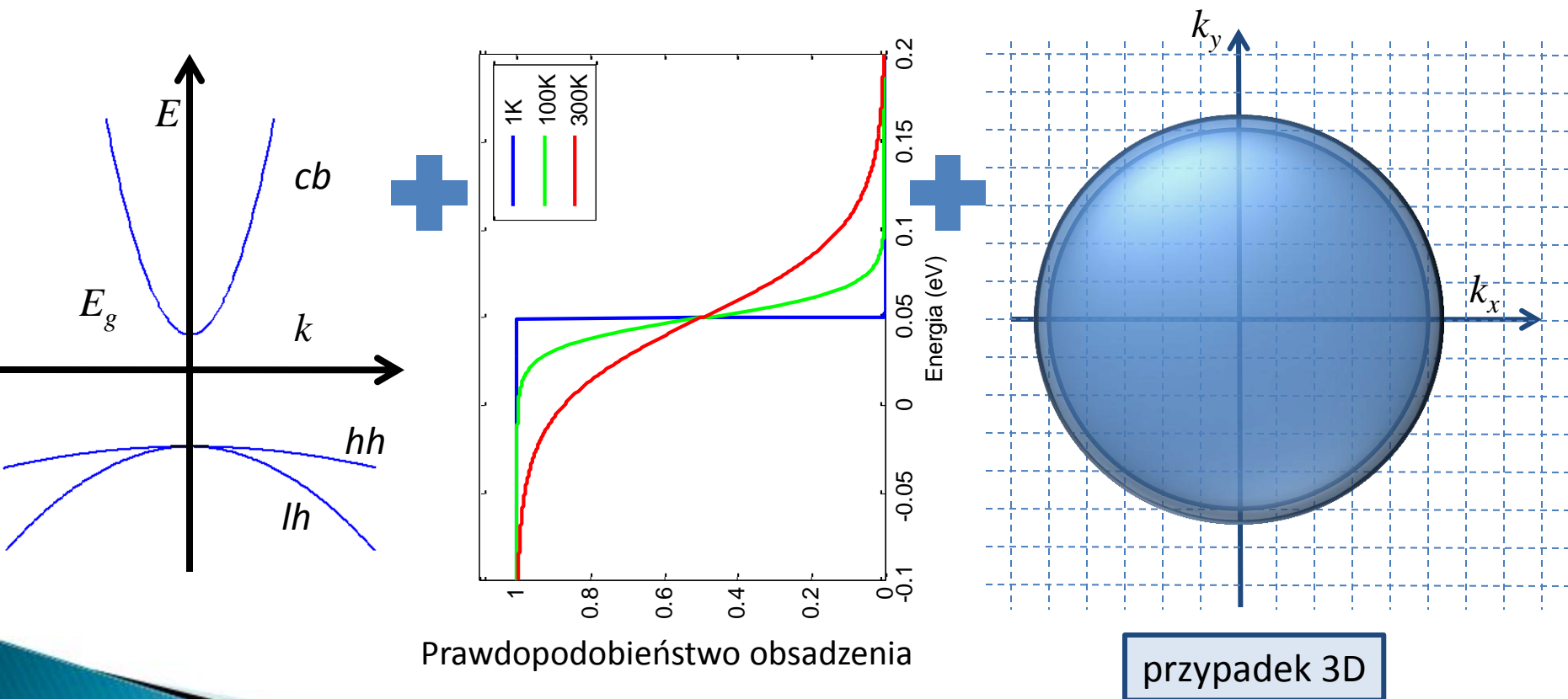
Często wygodniejsza jest znajomość gęstości stanów w przestrzeni energii  $E$  (a więc ilość stanów w przedziale  $(E, E+dE)$ ). Dla pasma sferycznego i parabolicznego:



# Koncentracja samoistna

## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.



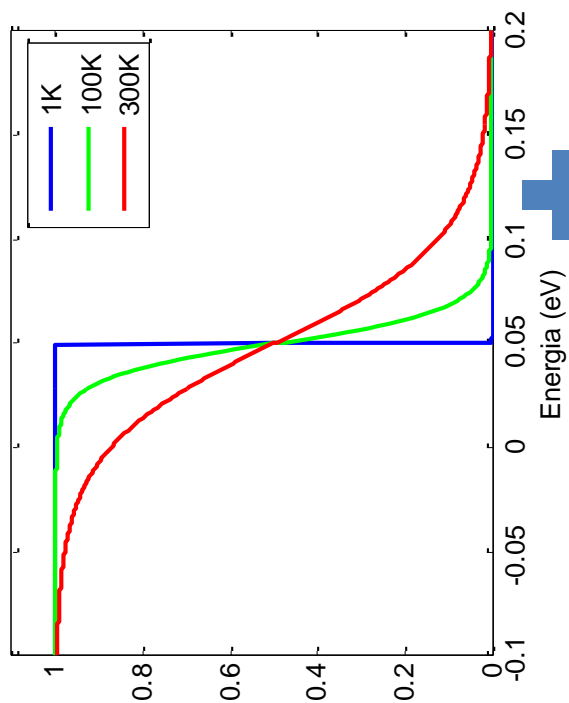
# Koncentracja samoistna

## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

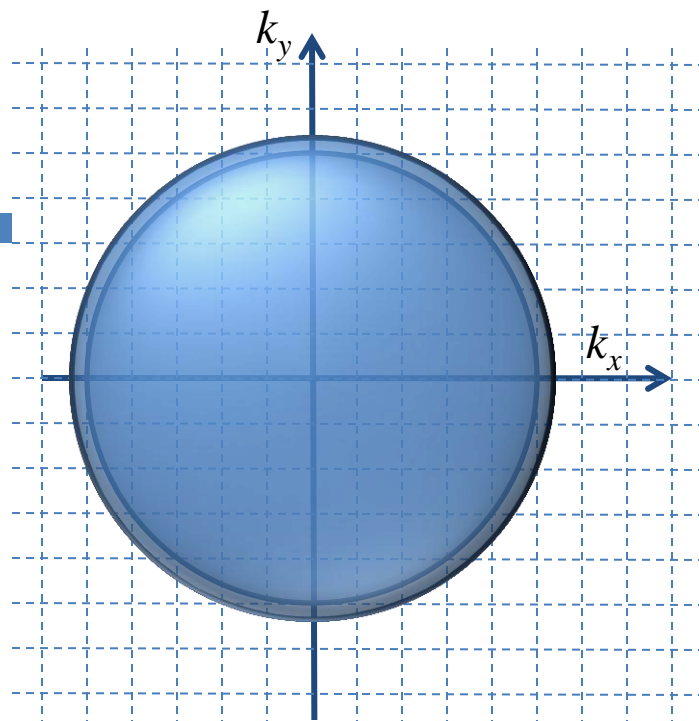
W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

$$E_c(k) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c^*}$$

$$E_h(k) = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*}$$



Prawdopodobieństwo obsadzenia



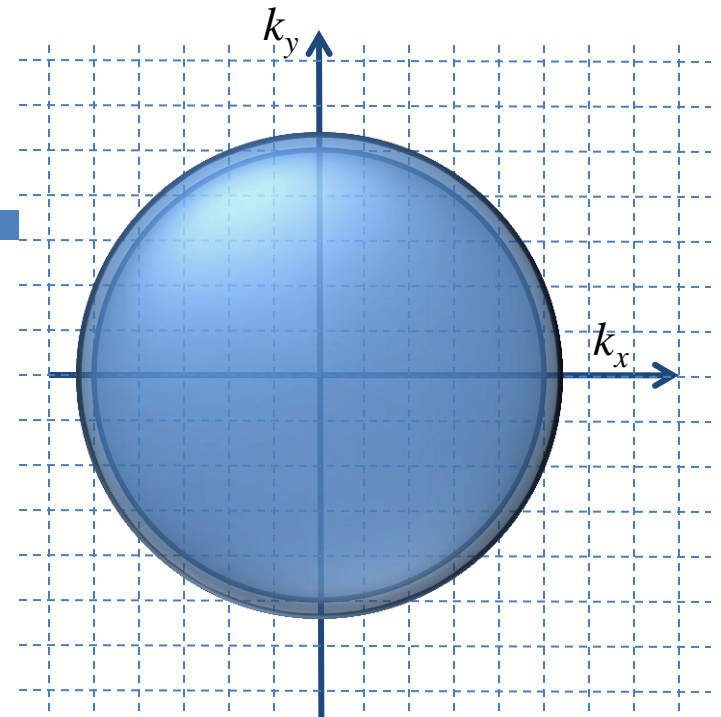
przypadek 3D

# Koncentracja samoistna

## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

$$E_c(k) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c^*} + f_0 = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} + \frac{1}{e^{\frac{E - E_F}{k_B T}} + 1}$$



przypadek 3D

# Koncentracja samoistna

## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

$$\begin{aligned} E_c(k) &= E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c^*} \\ E_h(k) &= -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \end{aligned} + f_0 = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1} + N_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_c^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_c} \\ N_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_h^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E_v - E}$$

# Koncentracja samoistna

## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

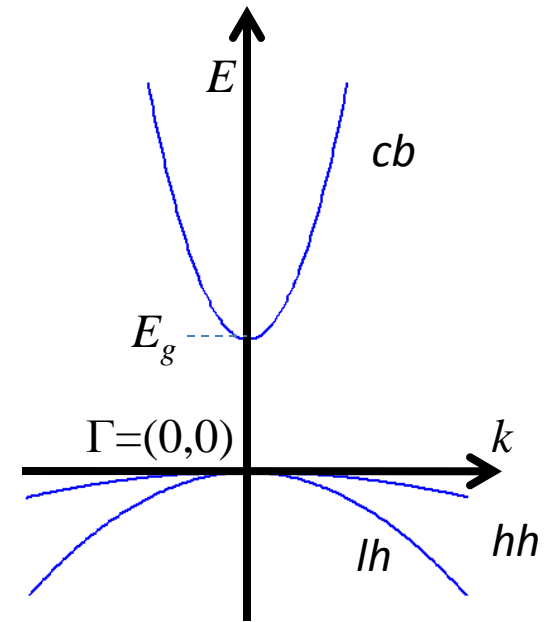
$$n = p = n_i$$

$$f_e = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1} \approx e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}}$$

$$f_h = 1 - f_0 = \frac{1}{1 + e^{\frac{(E-E_F)}{k_0 T}}} \approx e^{\frac{(E-E_F)}{k_0 T}}$$

$$N_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_c^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_g}$$

$$N_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_h^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{-E}$$



# Koncentracja samoistna

## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

$$n = p = n_i$$

$$n(E_F) = \int_{E_g}^{\infty} f_e N(E) dE = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \int_{E_g}^{\infty} e^{-\frac{(E-E_F)}{k_0T}} \sqrt{E - E_g} dE$$

$$\int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt = \Gamma(z)$$

$$\Gamma(n+1) = n\Gamma(n)$$

$$\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$$

Przy tablicy



# Koncentracja samoistna

## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

$$n = p = n_i$$

$$n(E_F) = \int_{E_g}^{\infty} f_e N(E) dE = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \int_{E_g}^{\infty} e^{-\frac{(E-E_F)}{k_0T}} \sqrt{E-E_g} dE$$

$$n = 2 \left( \frac{m_e^* k_0 T}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{E_F - E_c}{k_B T}} = N_c e^{\frac{E_F - E_c}{k_B T}}$$

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} f_h g_h dE$$

$$p = 2 \left( \frac{m_h^* k_0 T}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{(E_F - E_v)}{k_B T}} = N_v e^{-\frac{(E_F - E_v)}{k_B T}}$$

# Koncentracja samoistna

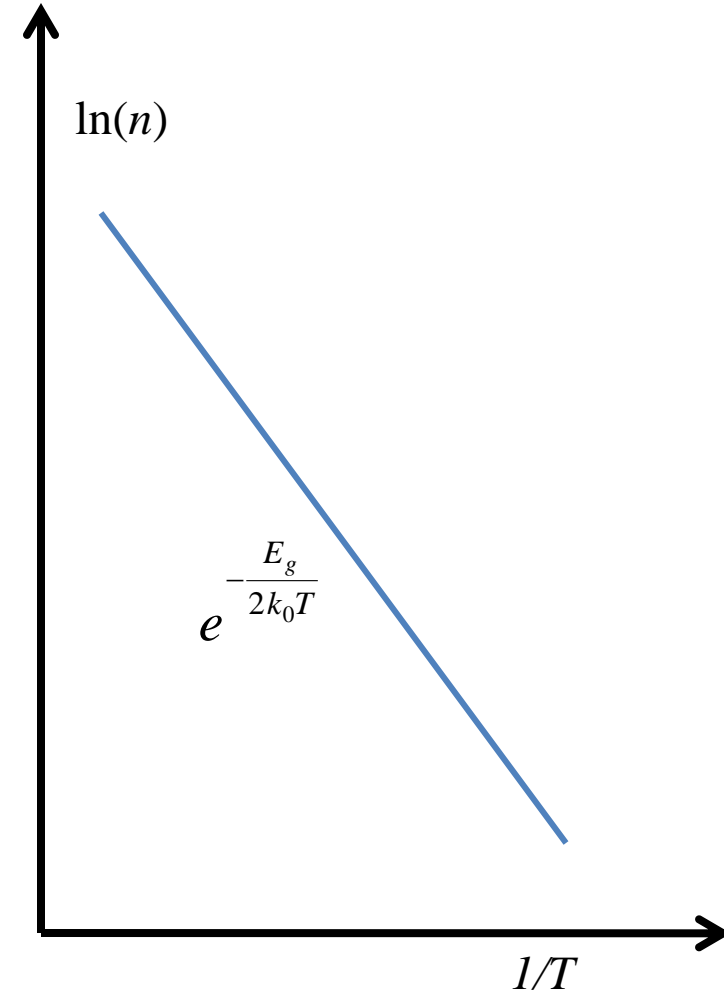
## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

$$n = p = n_i$$

$$n \cdot p = n^2 = 4 \left( \frac{k_0 T}{2\pi\hbar^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{k_0 T}} = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{k_0 T}}$$

$$n = p = 2 \left( \frac{k_0 T}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_e^* m_h^*)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{E_g}{2k_0 T}} = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2k_0 T}}$$



# Koncentracja samoistna

## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

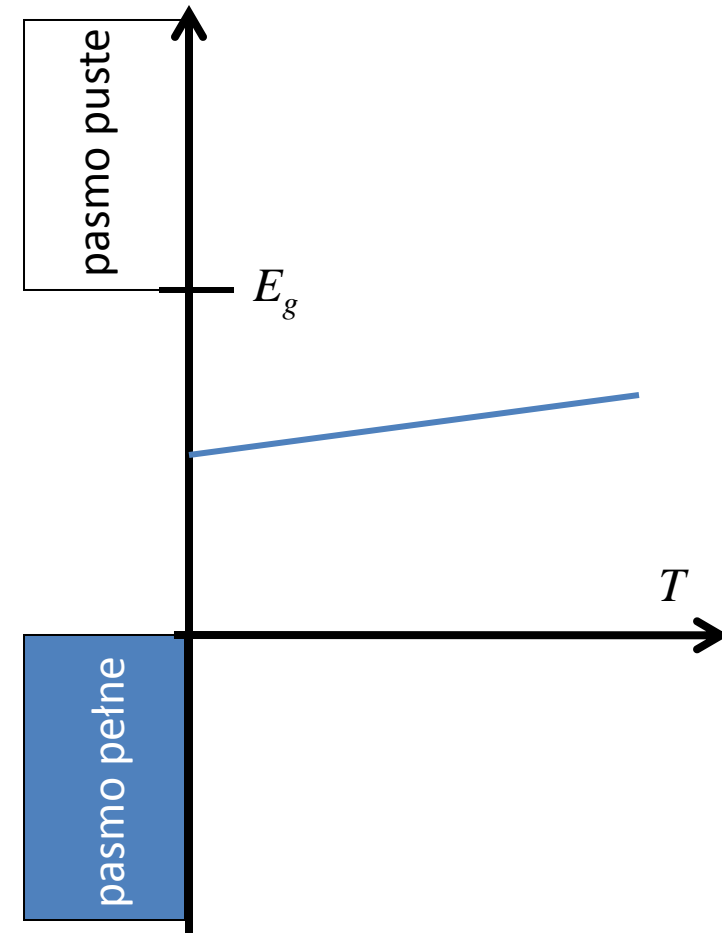
W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

$$n = p = n_i$$

$$n \cdot p = n^2 = 4 \left( \frac{k_0 T}{2\pi\hbar^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{k_0 T}} = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{k_0 T}}$$

$$n = p = 2 \left( \frac{k_0 T}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_e^* m_h^*)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{E_g}{2k_0 T}} = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2k_0 T}}$$

$$\frac{N_c}{N_v} = e^{\frac{(2E_F - E_g)}{k_0 T}} \Rightarrow E_F = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{3}{4}k_0 T \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)$$



# Koncentracja samoistna

## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

### Koncentracja samoistna typowych półprzewodników

$E_g \setminus T$	77K	300K	1200K	materiał
0,25eV	$10^9 \text{ cm}^{-3}$	$10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$10^{18} \text{ cm}^{-3}$	InSb PbSe
1eV	-	$10^{10} \text{ cm}^{-3}$	$10^{17} \text{ cm}^{-3}$	Ge, Si, GaAs
4eV	-	-	$10^{11} \text{ cm}^{-3}$	ZnS, SiC, GaN, ZnO, C (diament)

R. Stępniewski

W powyższej tabelce wartości poniżej  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  nie mają sensu gdyż koncentracja zanieczyszczeń, a co za tym idzie koncentracja wynikająca z nieintencjonalnego domieszkowania jest większa

$$n = p = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} \quad n = N_c e^{\frac{(E_F - E_c)}{k_B T}}$$

$$p = N_v e^{-\frac{(E_F - E_v)}{k_B T}}$$

# Koncentracja samoistna

## Jaka jest koncentracja nośników dla $T > 0$ ?

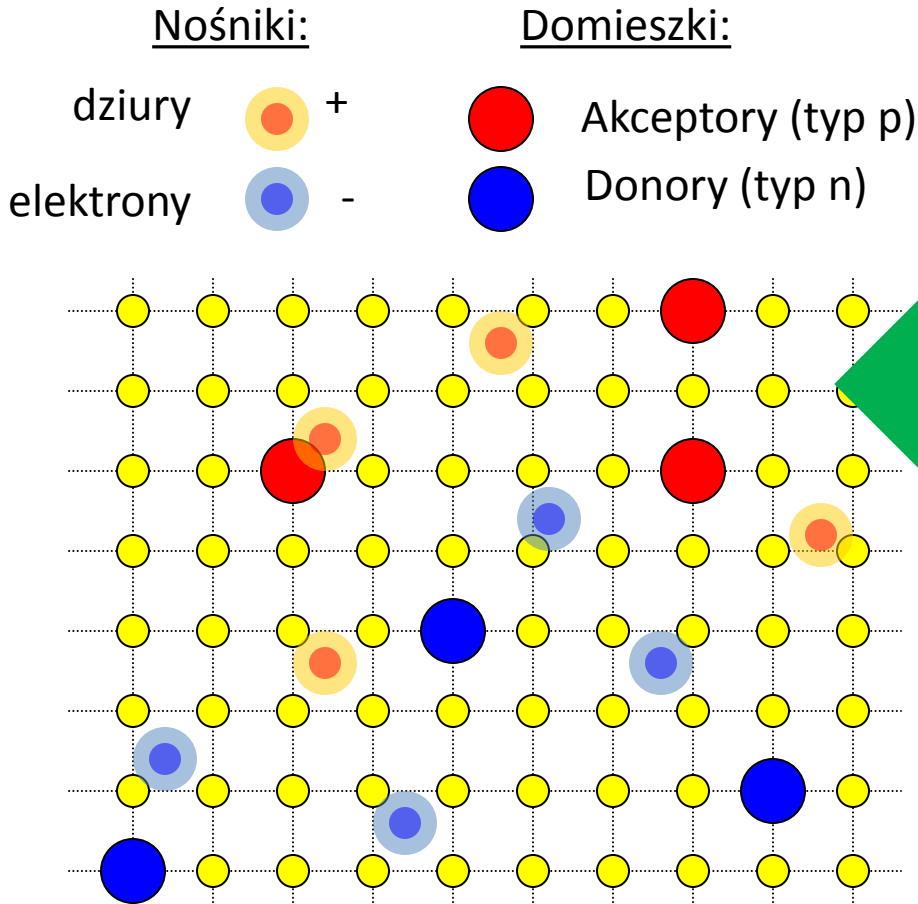
W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

Widać że wartość przerwy energetycznej nie jest wystarczającym kryterium na rozróżnienie półprzewodników i izolatorów, np. czysty Ge, Si i GaAs mają w temperaturze pokojowej bardzo niską koncentrację nośników co czyni je materiałami o właściwościach izolatorów.

**Lepsze kryterium** – dla półprzewodników istnieje możliwość domieszkowania powodującego znaczące zmiany koncentracji i typu przewodnictwa (elektrony lub dziury).

# Domieszki i defekty

## Półprzewodniki



	II	III	IV	V	VI
	Be	B	C	N	O
	Mg	Al	Si	P	S
	Zn	Ga	Ge	As	Se
	Cd	In	Sn	Sb	Te

Jonowość ← → Jonowość

**Grupa IV:** diament, Si, Ge

**Grupy III-V:** GaAs, AlAs, InSb, InAs...

**Grupy II-VI:** ZnSe, CdTe, ZnO, SdS...

# Domieszki i defekty

## W jaki sposób kontrolować koncentrację nośników?

W półprzewodnikach spotykamy szereg odstępstw od idealnej struktury kryształu:

- defekty struktury kryształu, luki, atomy w położeniu międzywęzłowym, dyslokacje powstałe np. w procesie wzrostu.
- obce atomy (**domieszki**) wprowadzane intencjonalnie lub wskutek zanieczyszczeń (poziom czystości)

Wskutek ich występowania pojawiają się między innymi:

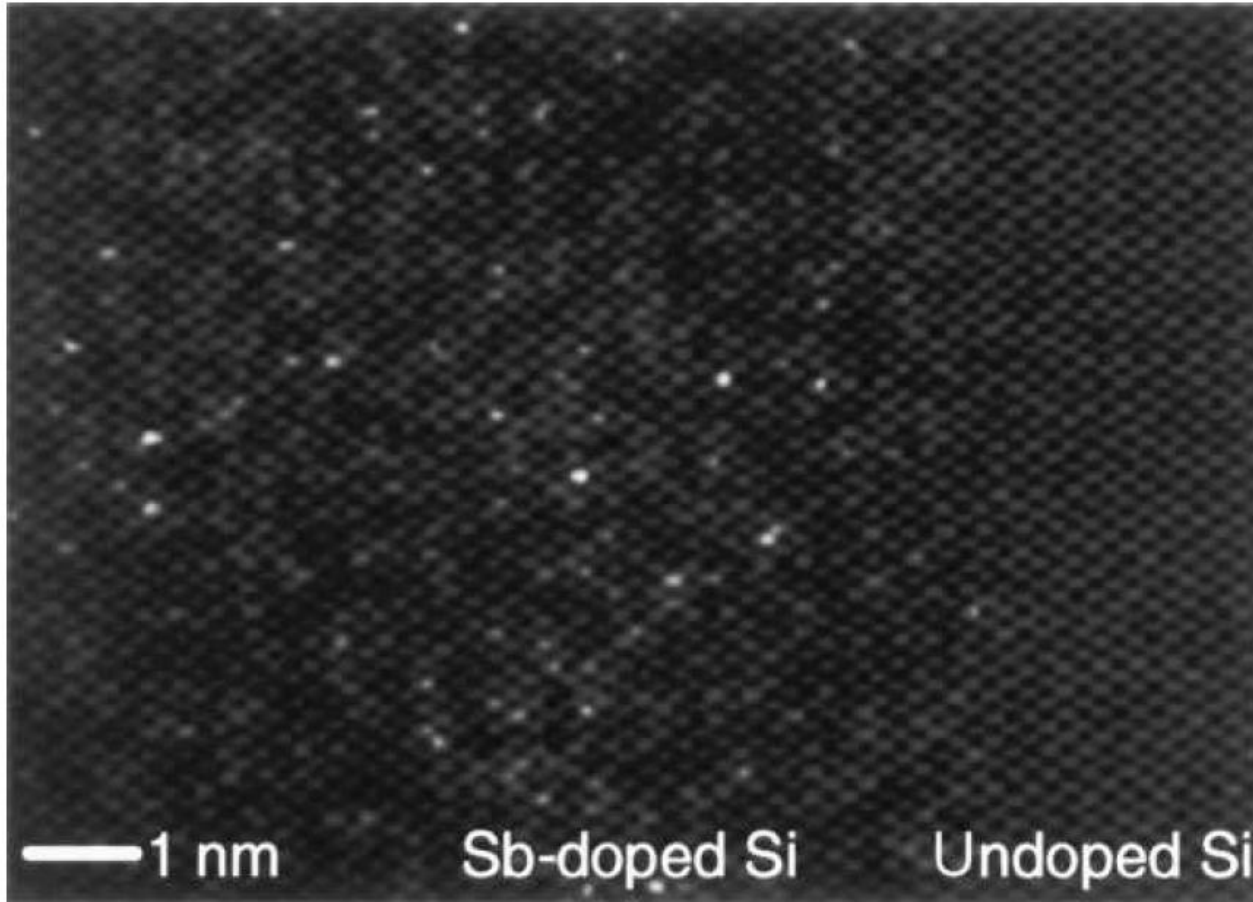
- stany dozwolone w przerwie wzbronionej na skutek odstępstw od potencjału idealnej sieci
- ładunki przestrzenne w izolatorach
- ekranowanie przez swobodne nośniki

**Stany domieszkowe** dzielimy na:

- głębokie – potencjał krótkozasięgowy, zlokalizowany głównie w obszarze jednej komórki elementarnej – np. luka, domieszka izoelektronowa (o tej samej wartościowości co macierzysty atom np. N w InP).
- płytkie - głównie potencjał długozasięgowy – kulombowski

# Domieszki i defekty

Voyles, P. M. *et al.* *Nature* **416**, 826-829 (2002)



$10^{22}$  atomów Si

$10^{17}$  domieszek

Rozmiar tranzystora 50 nm

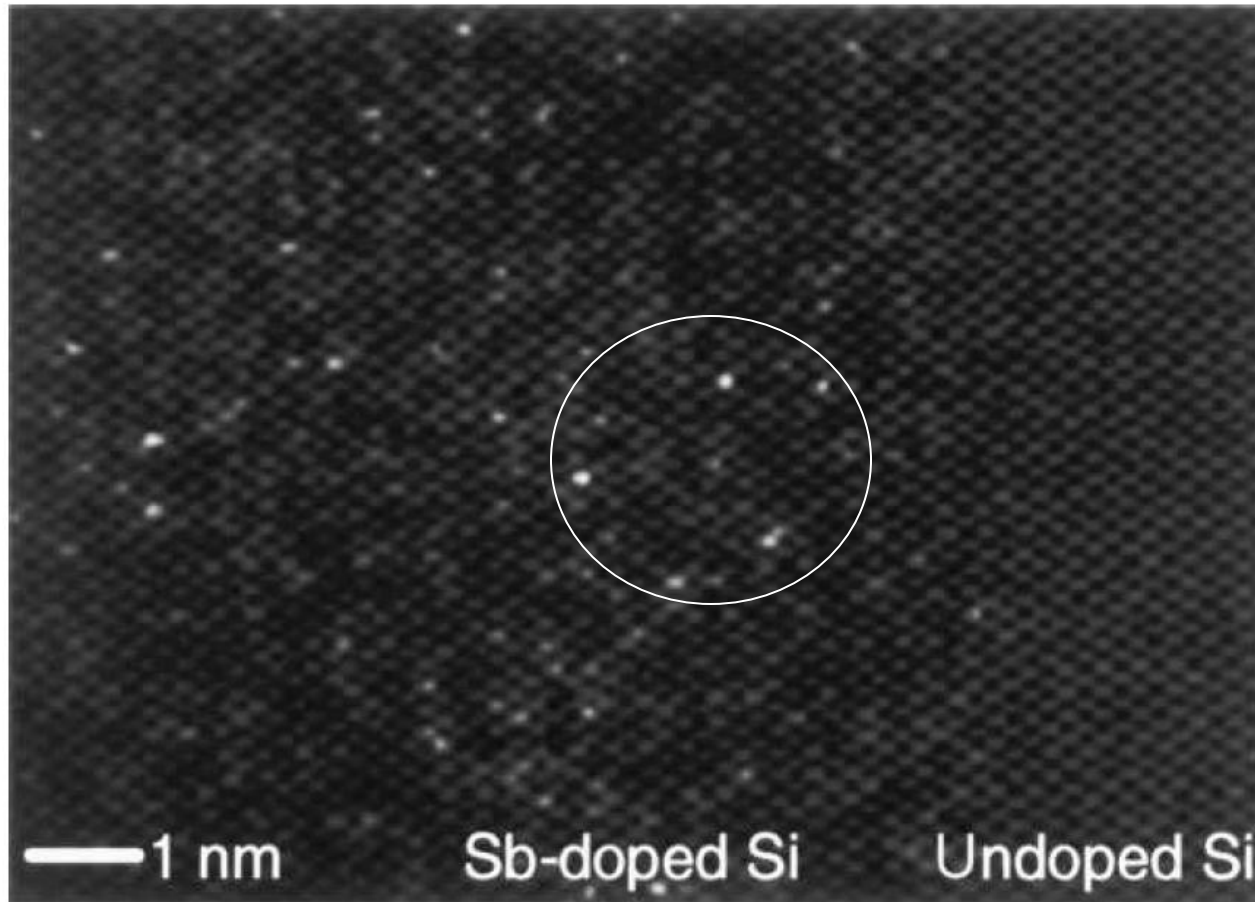
Średnia ilość domieszek 12.5

State-of-the-art TEM image of ultrathinned (5 nm) sample.



# PROBLEM: Statystyka domieszek

Voyles, P. M. *et al.* *Nature* **416**, 826-829 (2002)



$10^{22}$  atomów Si

$10^{17}$  domieszek

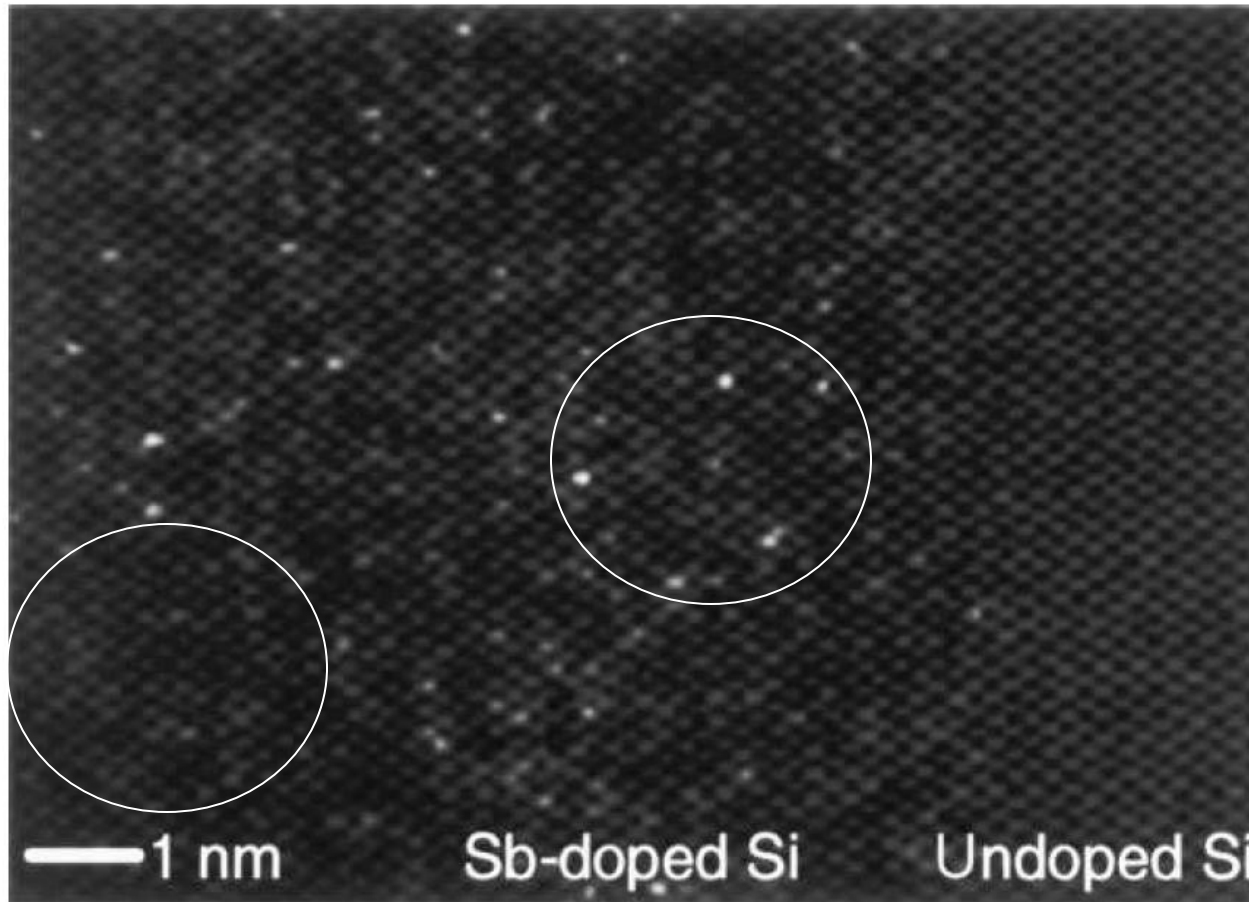
Rozmiar tranzystora 50 nm

Średnia ilość domieszek 12.5

State-of-the-art TEM image of ultrathinned (5 nm) sample.

# PROBLEM: Statystyka domieszek

Voyles, P. M. *et al.* *Nature* **416**, 826-829 (2002)



$10^{22}$  atomów Si

$10^{17}$  domieszek

Rozmiar tranzystora 50 nm

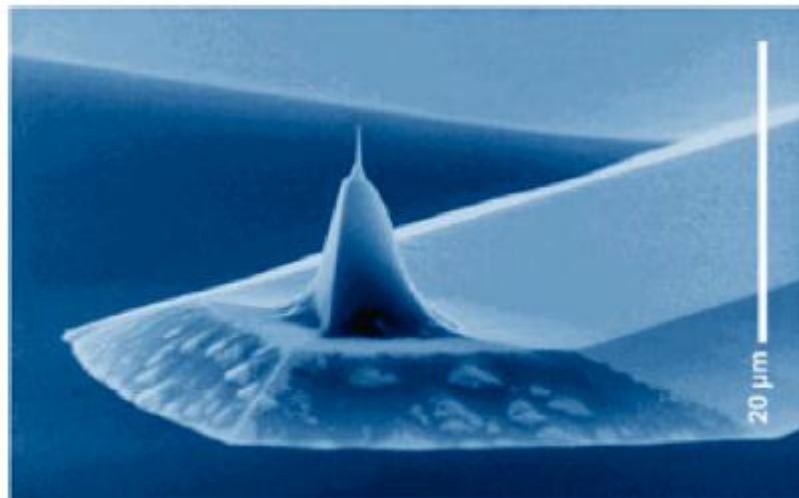
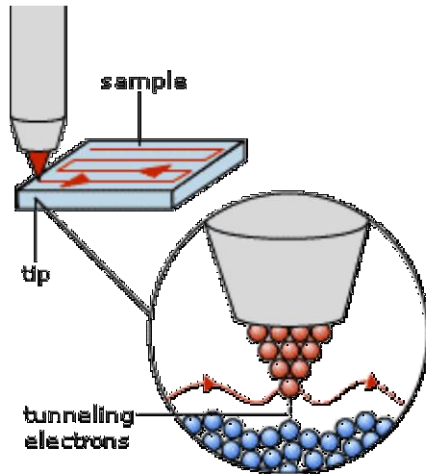
Średnia ilość domieszek 12.5

State-of-the-art TEM image of ultrathinned (5 nm) sample.

# Domieszki i defekty

## STM – Scanning Tunnelling Microscope

Nobel 1986 Gerd Binnig, Heinrich Rohrer

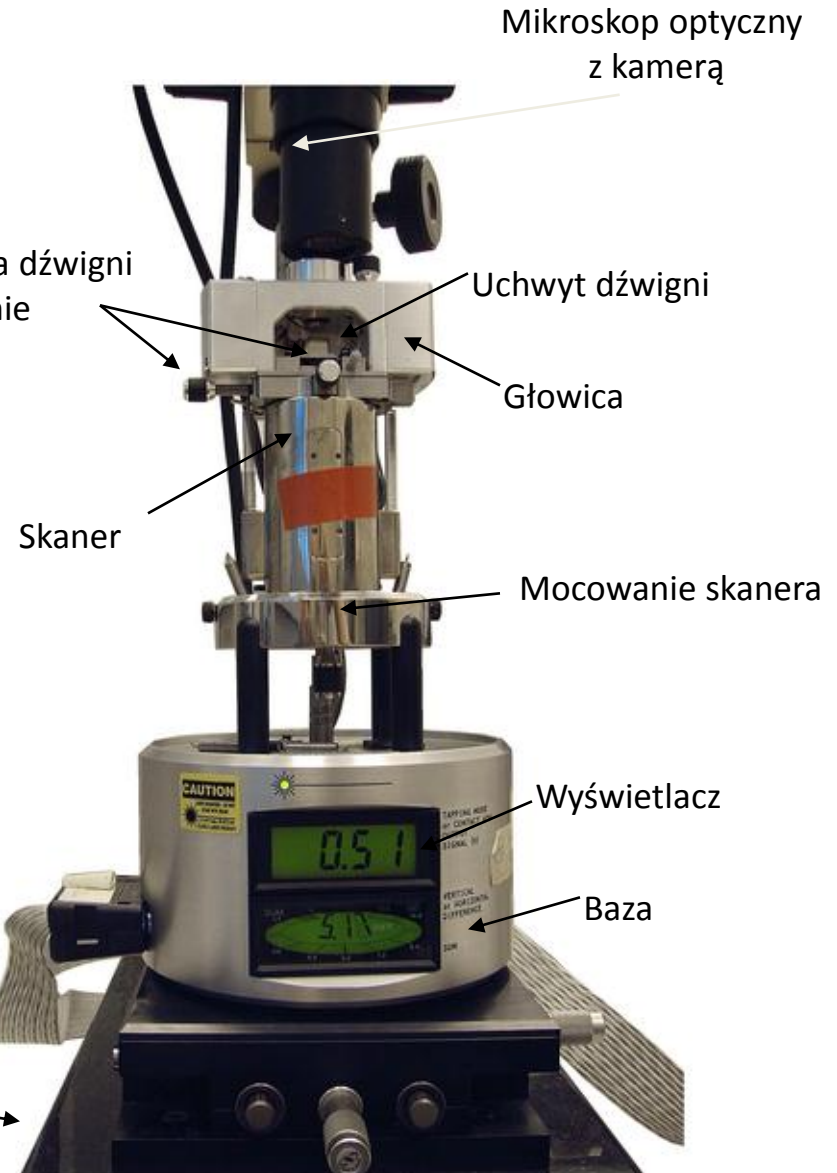


[www.nanosensors.com](http://www.nanosensors.com)

Regulacja położenia dźwigni  
w płaszczyźnie

Przewody

Podstawa



Mikroskop optyczny  
z kamerą

Uchwyt dźwigni

Głowica

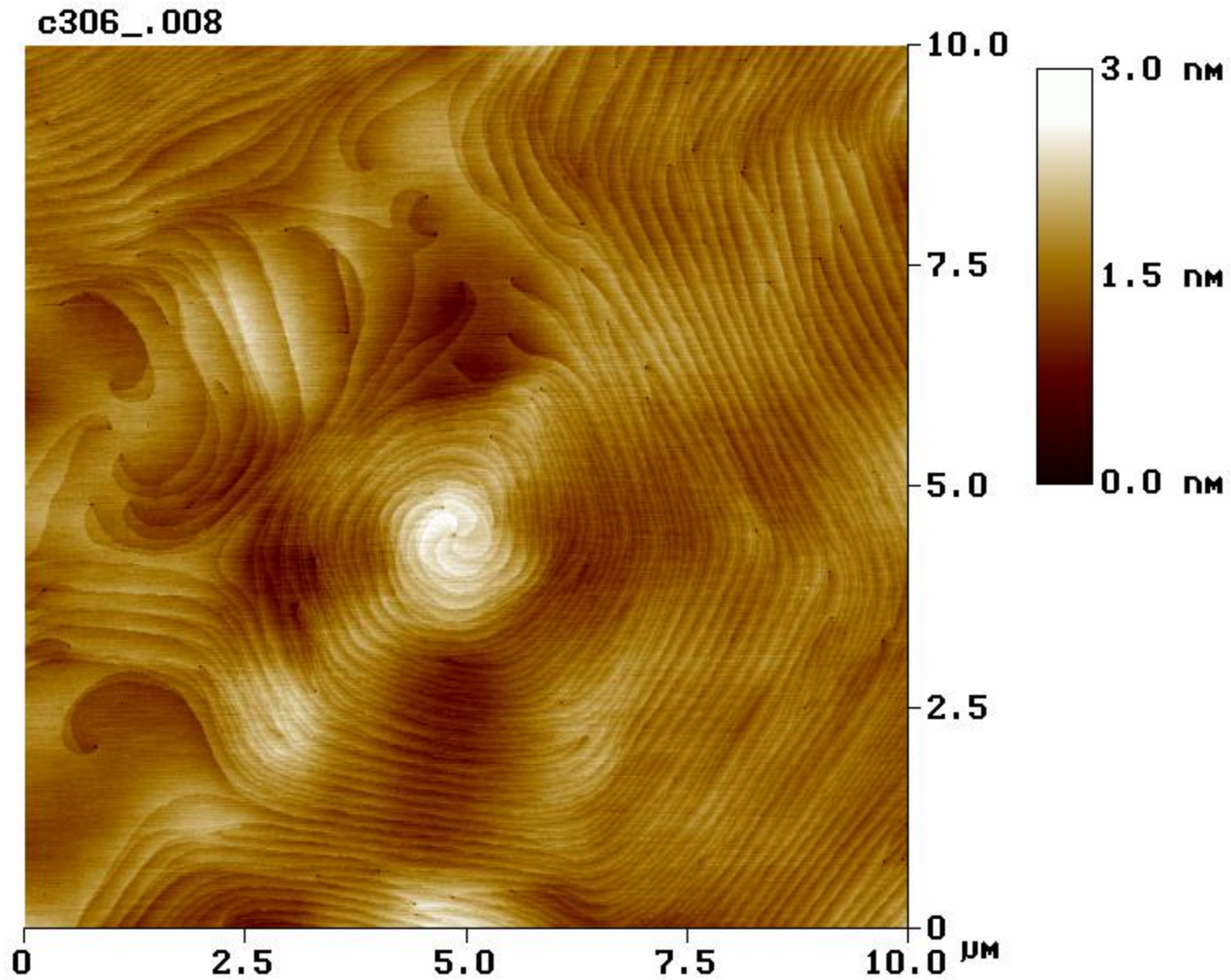
Skaner

Mocowanie skanera

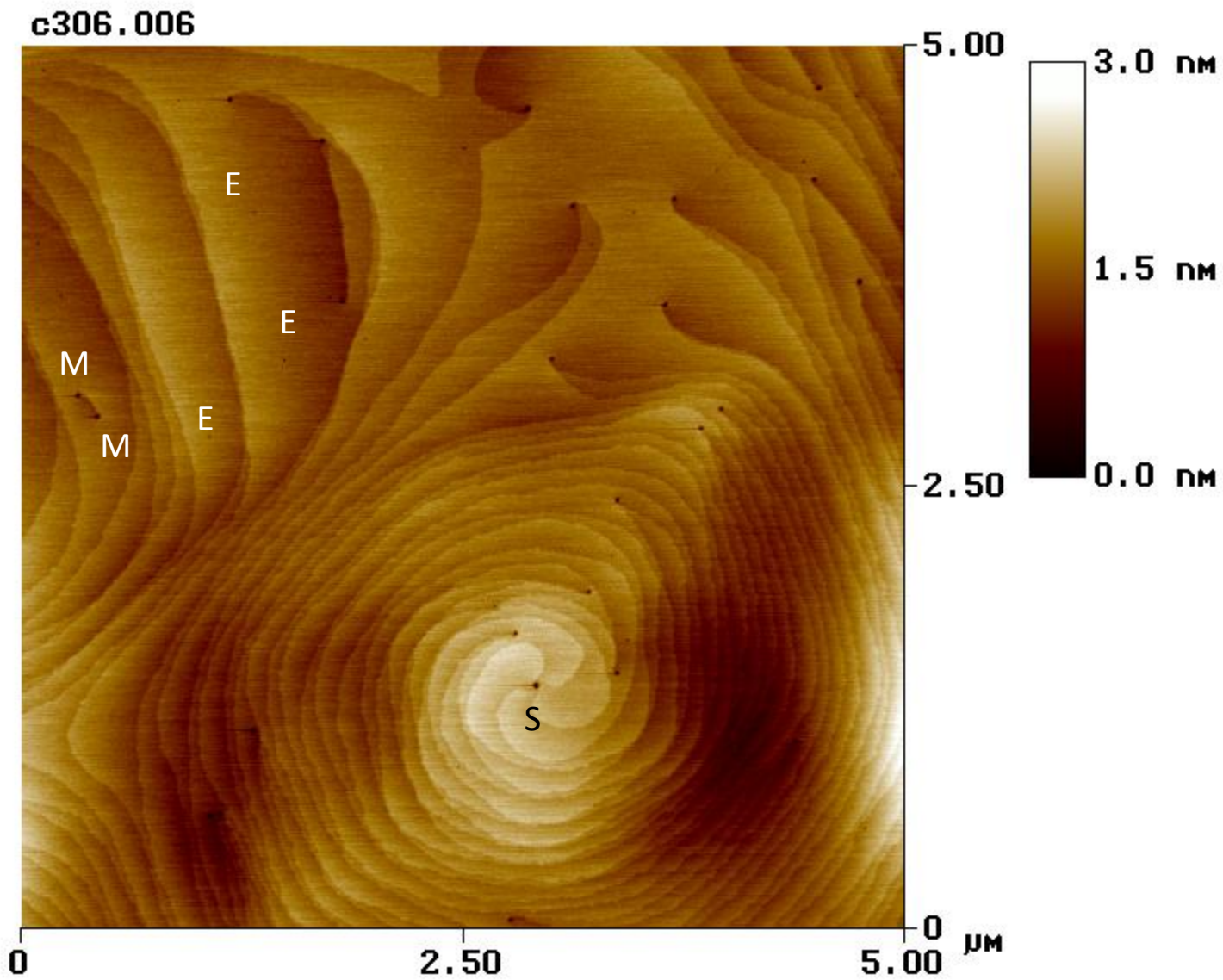
Wyświetlacz

Baza

Rafał Bożek, FUW

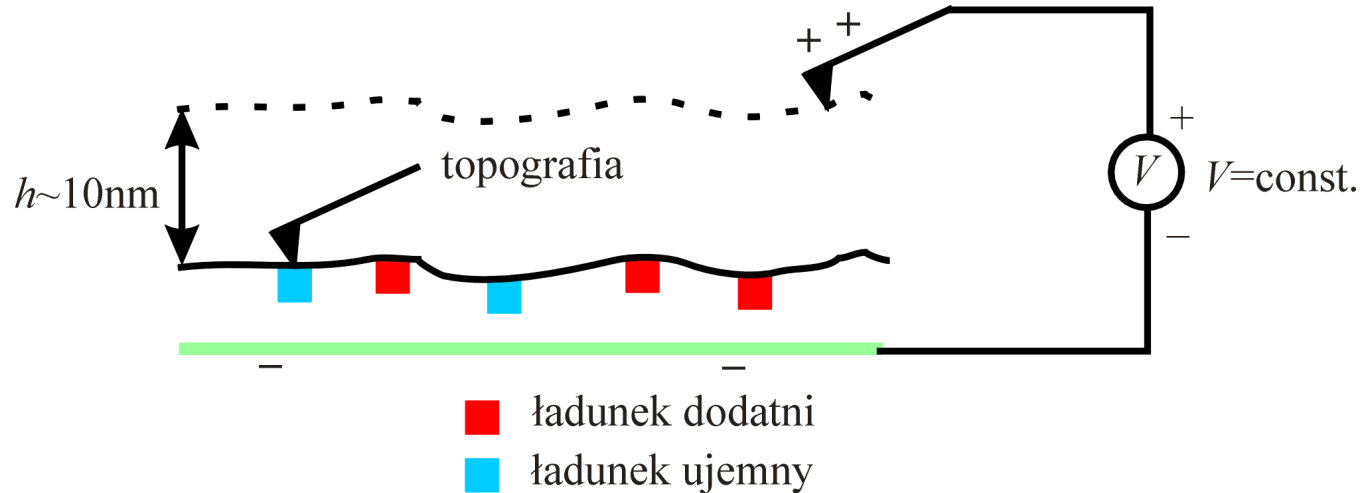


GaN na szafirze (0001) - widoczna symetria heksagonalna



GaN na szafirze (0001) - dyslokacje: śrubowa (S), krawędziowa (E)  
i mieszana (M) - przykłady

# EFM – Electric Force Microscopy



$$F(x) = F(x_0) + (x - x_0) \frac{\partial F}{\partial x} + \dots$$

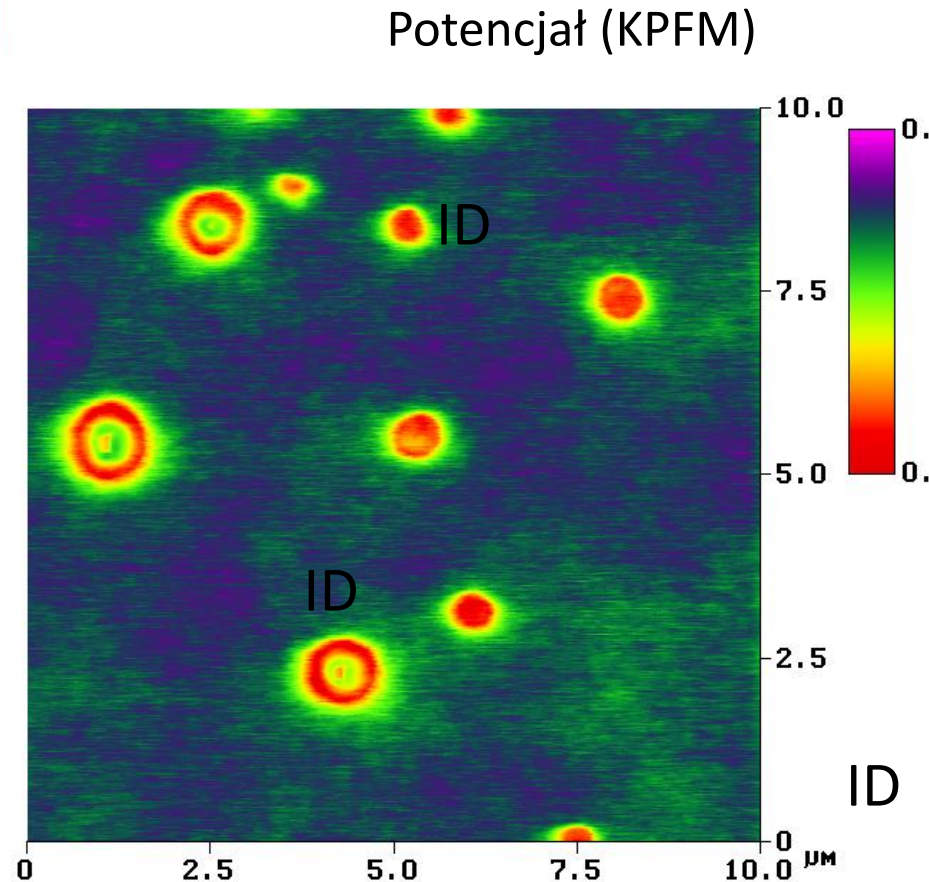
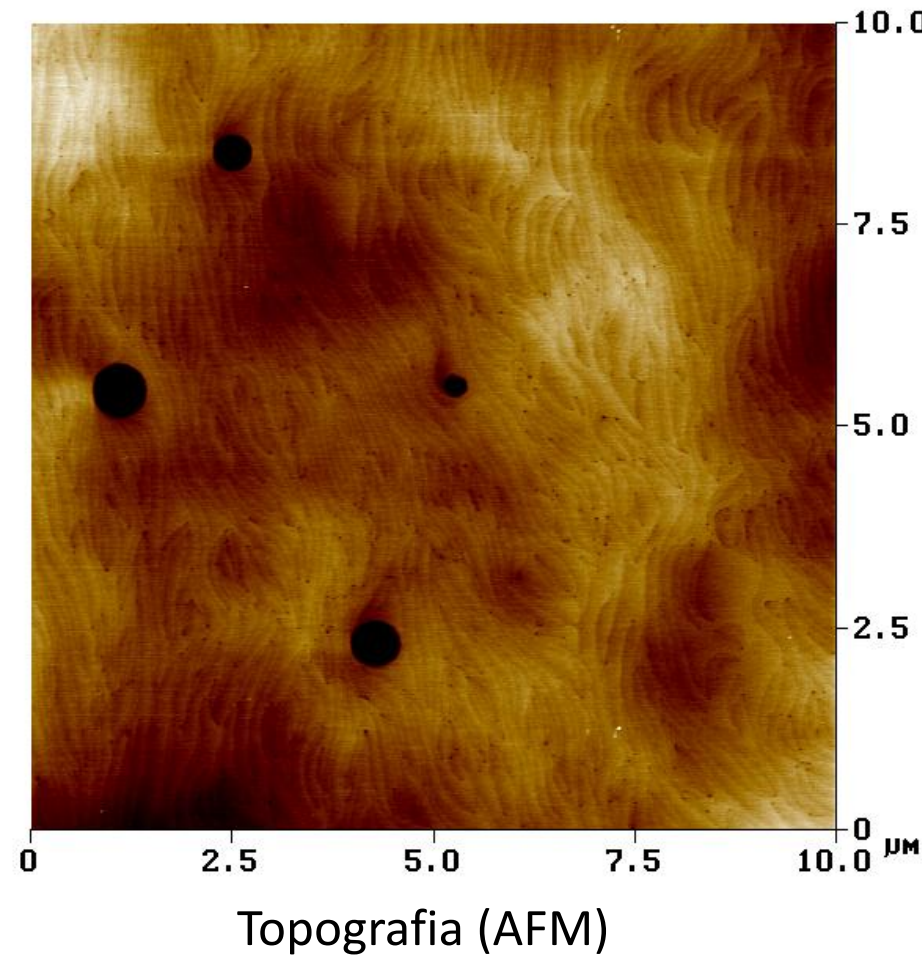
$$\Delta f_0 = \frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial x} \frac{f_0}{k}$$

Siła elektryczna (gradient)  $\Leftrightarrow$  zmiana częstotliwości rezonansowej

Pętla sprzężenia zwrotnego: utrzymanie rezonansu

# Domieszki i defekty

GaN polarność galowa - „pinholes” i domeny inwersyjne



# Domieszki i defekty

## Model wodoropodobny

Atom o wartościowości wyższej o jeden niż atom macierzysty staje się źródłem potencjału kulombowskiego zmodyfikowanego stałą dielektryczną kryształu, wywołanego dodatkowym protonem w jądrze. Dodatkowy elektron będący w paśmie przewodnictwa odczuwa ten potencjał. Jego stany są opisane równaniem masy efektywnej:

$$T = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \Delta \quad U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\epsilon r}$$

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \Delta - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\epsilon r} \right] \phi(r) = E\phi(r)$$

II	III	IV	V	VI
Be	B	C	N	O
Mg	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te

**Grupa IV:** diament, Si, Ge

**Grupy III-V:** GaAs, AlAs, InSb, InAs...

**Grupy II-VI:** ZnSe, CdTe, ZnO, SdS...



# Domieszki i defekty

## Model wodoropodobny

Ostatecznie zagadnienie sprowadza się do problemu atomu wodoru z nośnikiem swobodnym o masie  $m^*$ , w ośrodku dielektrycznym ze stałą  $\epsilon$  i małą „poprawką” do potencjału.

$$E_n = - \left( \frac{m^*}{m_0} \right) \frac{13.6 eV}{\epsilon^2 n^2}$$

Dla typowych półprzewodników  $m_e^* \approx 0.1 m_e$ ,  $\epsilon_s \approx 10$ , zatem energia wiązania dla stanu podstawowego jest rzędu kilkudziesięciu meV. Promień Bohra dla stanu podstawowego jest rzędu 100Å:

$$r_B^* = - \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_0 e^2} \epsilon_s \left( \frac{m_0}{m_e^*} \right) \approx 0,5 \text{ \AA} \epsilon_s \left( \frac{m_0}{m_e^*} \right)$$

II	III	IV	V	VI
Be	B	C	N	O
Mg	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te

**Grupa IV:** diament, Si, Ge

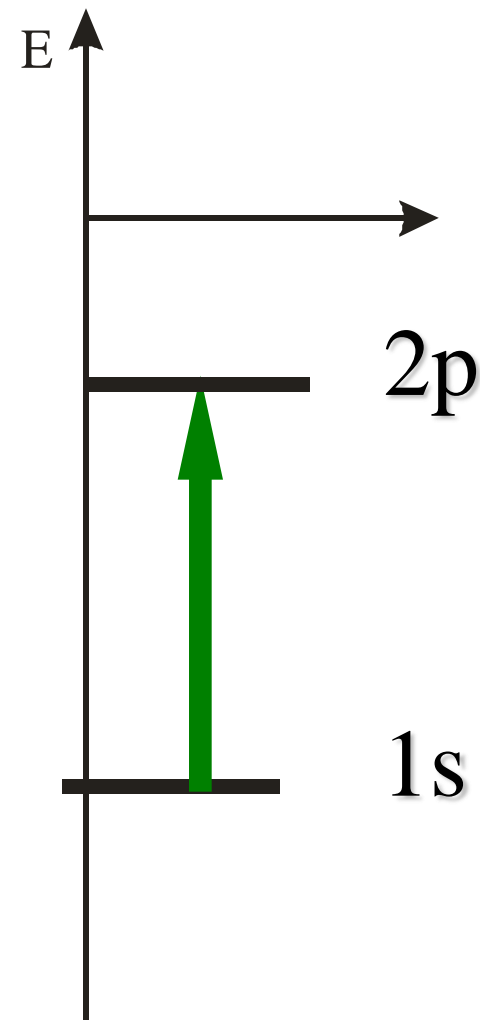
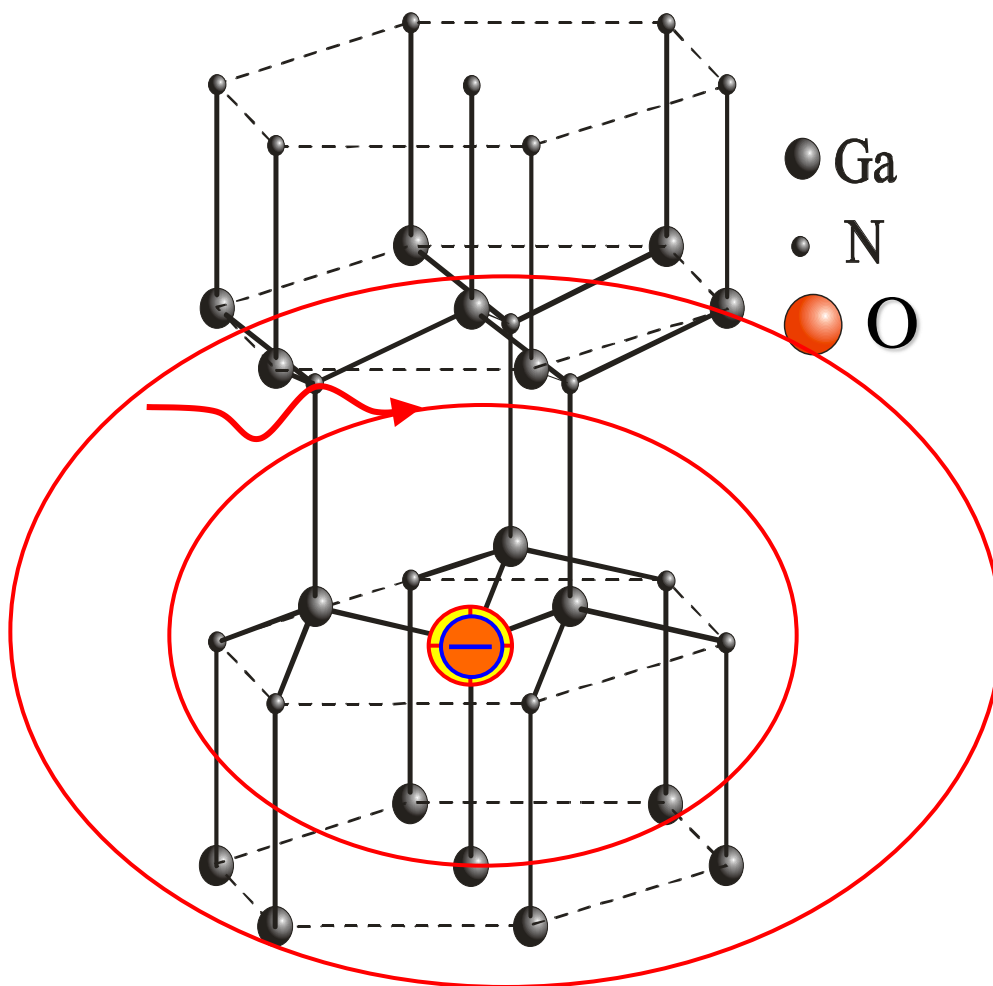
**Grupy III-V:** GaAs, AlAs, InSb, InAs...

**Grupy II-VI:** ZnSe, CdTe, ZnO, SdS...

# Neutralny donor

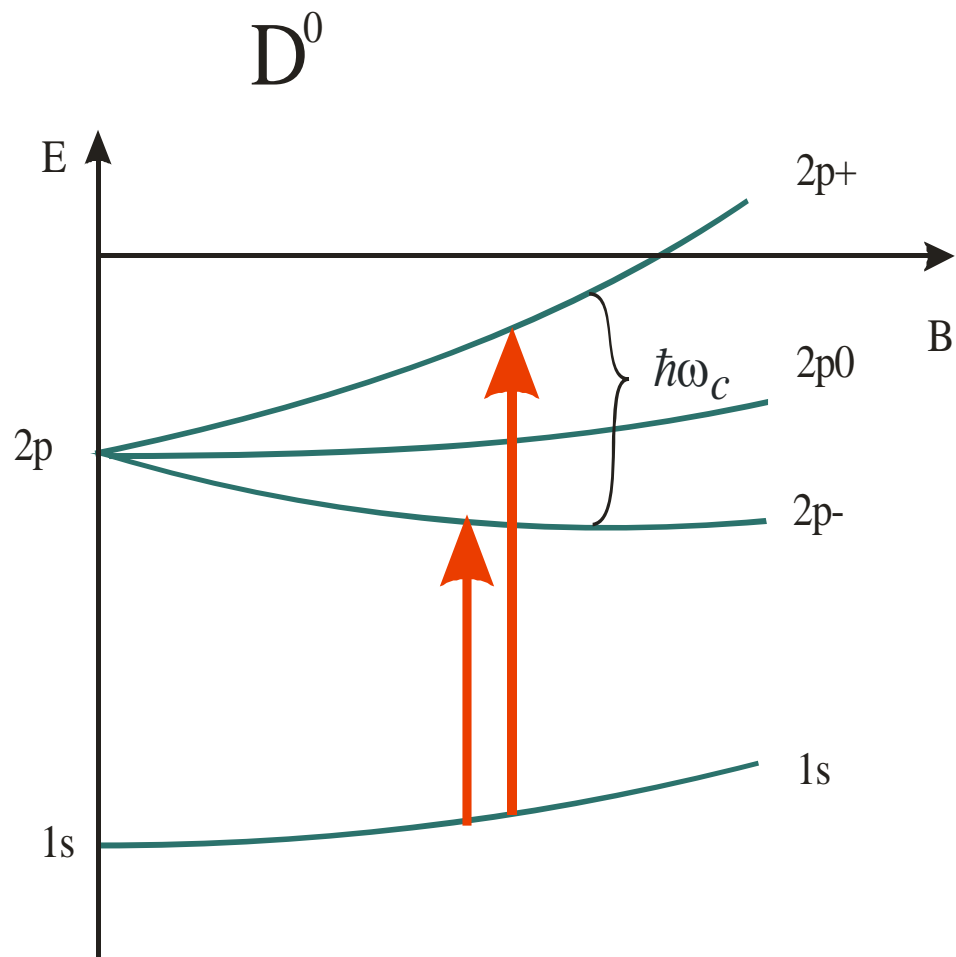
Magneto-spektroskopia w silnych polach magnetycznych

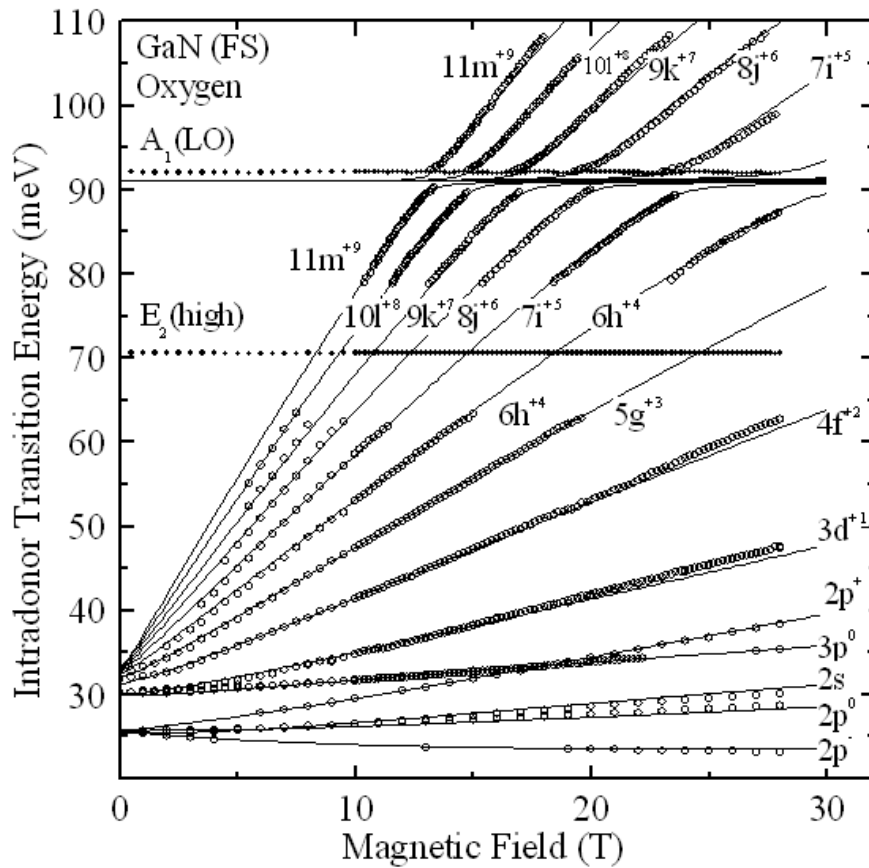
$m^*$



Andrzej Wysmołek

# Spektroskopia w dalekiej podczerwieni





### Oxygen

$$R_y = 30.28(5) \text{ meV}$$

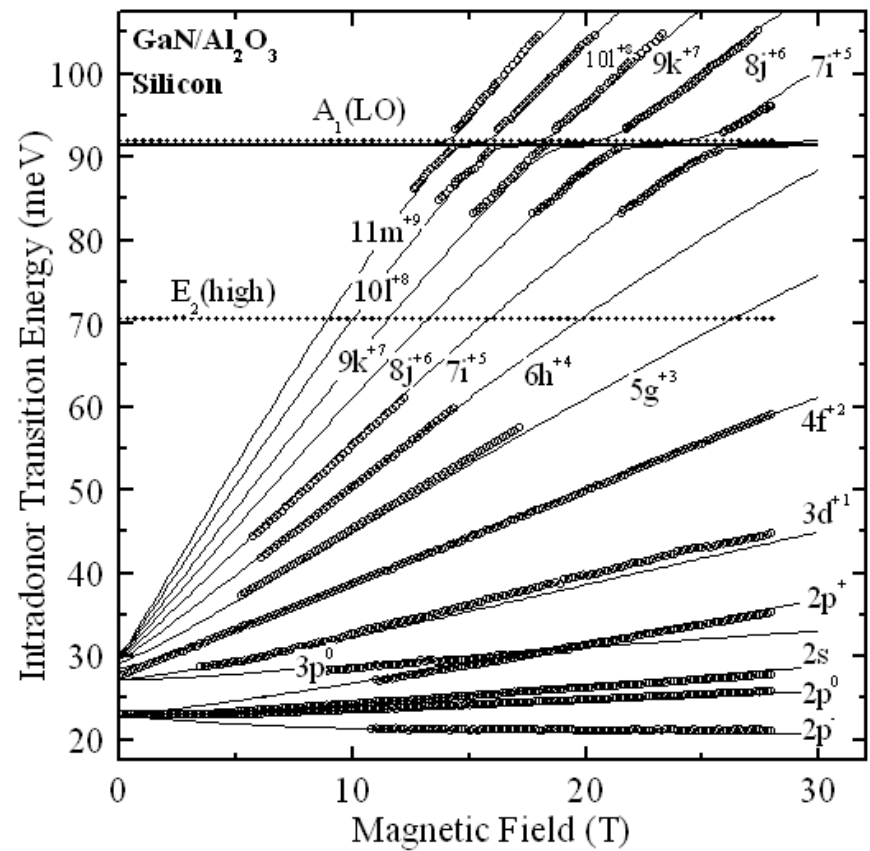
$$\Delta_{1s} = 2.9 \text{ meV}$$

$$E_B = 33.18 \text{ meV}$$

$$\Delta E_p = 1.3(1) \text{ meV},$$

$$\Delta g = 0.4(1)$$

$$\rho = 2.2(1)$$



### Silicon

$$R_y = 30.28(5) \text{ meV}$$

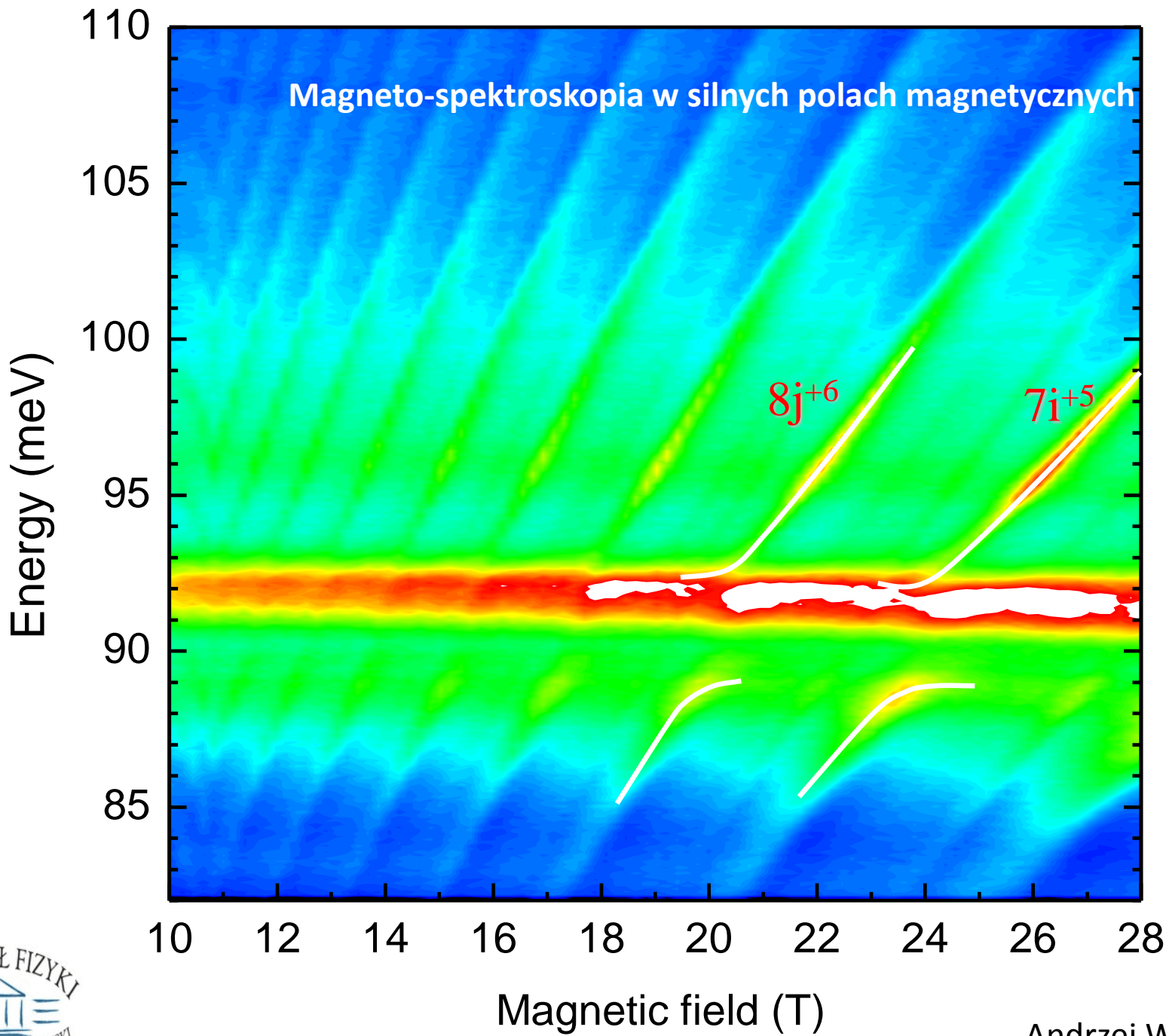
$$\Delta_{1s} = 0$$

$$E_B = 30.28 \text{ meV}$$

$$\Delta E_p = 1.3(1) \text{ meV}$$

$$\Delta g = 0.3(1)$$

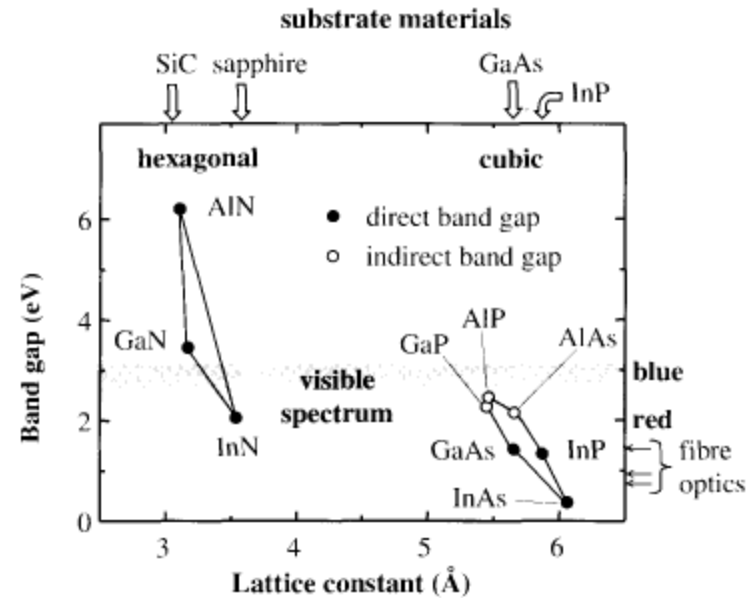
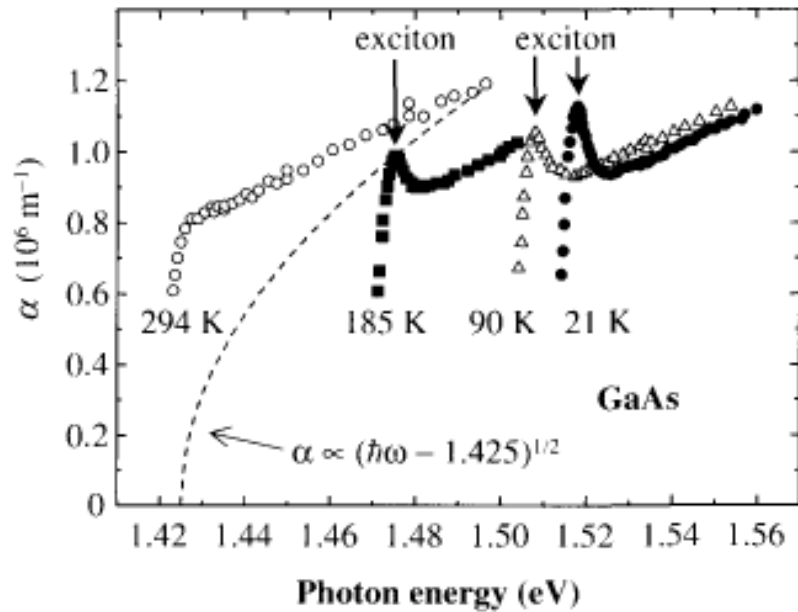
$$\rho = 2.3(1)$$



# Elektrony i dziury

## Przerwa energetyczna

Wyznaczanie przerwy energetycznej:



# Domieszki i defekty

## Model wodoropodobny

Ostatecznie zagadnienie sprowadza się do problemu atomu wodoru z nośnikiem swobodnym o masie  $m^*$ , w ośrodku dielektrycznym ze stałą  $\epsilon$  i małą „poprawką” do potencjału.

$$E_n = - \left( \frac{m^*}{m_0} \right) \frac{13.6 eV}{\epsilon^2 n^2}$$

Dla typowych półprzewodników  $m_e^* \approx 0.1 m_e$ ,  $\epsilon_s \approx 10$ , zatem energia wiązania dla stanu podstawowego jest rzędu meV.

Promień Bohra dla stanu podstawowego jest rzędu 100Å:

$$r_B^* = - \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_0 e^2} \epsilon_s \left( \frac{m_0}{m_e^*} \right) \approx 0,5 \text{ \AA} \epsilon_s \left( \frac{m_0}{m_e^*} \right)$$

II	III	IV	V	VI
Be	B	C	N	O
Mg	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te

**Grupa IV:** diament, Si, Ge

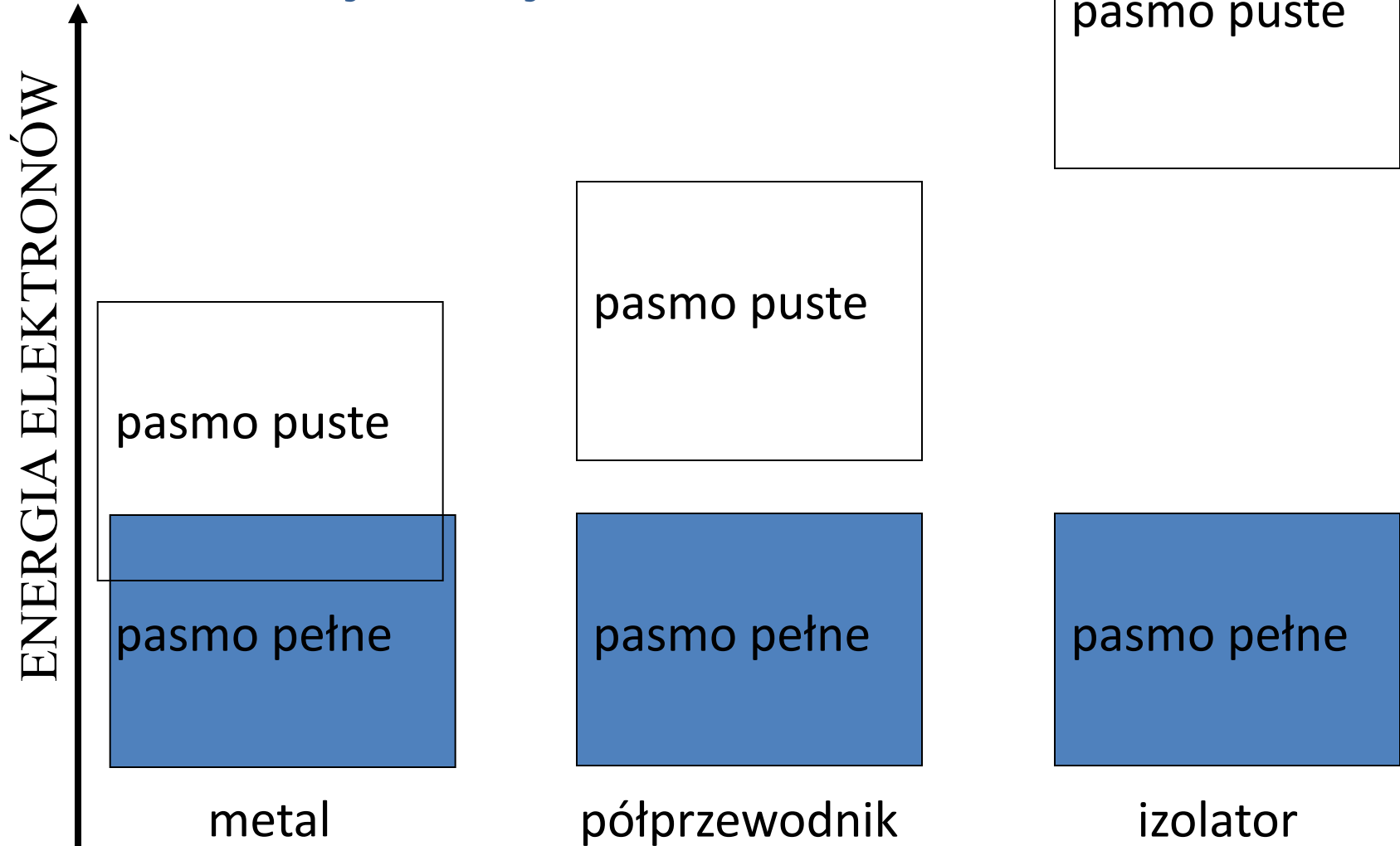
**Grupy III-V:** GaAs, AlAs, InSb, InAs...

**Grupy II-VI:** ZnSe, CdTe, ZnO, SdS...

# Domieszki i defekty

## Model wodoropodobny

– jonizacja domieszki

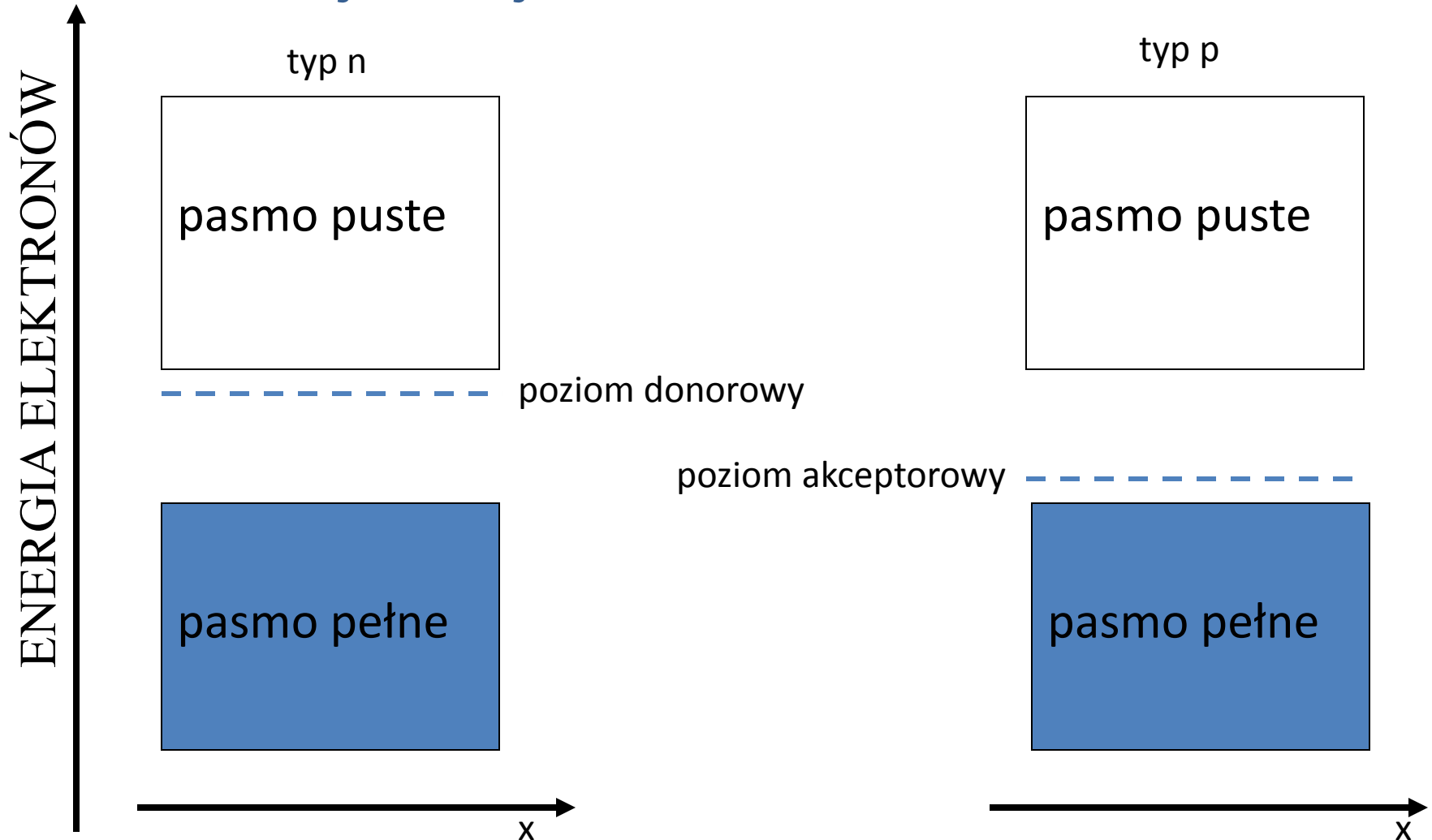




# Domieszki i defekty

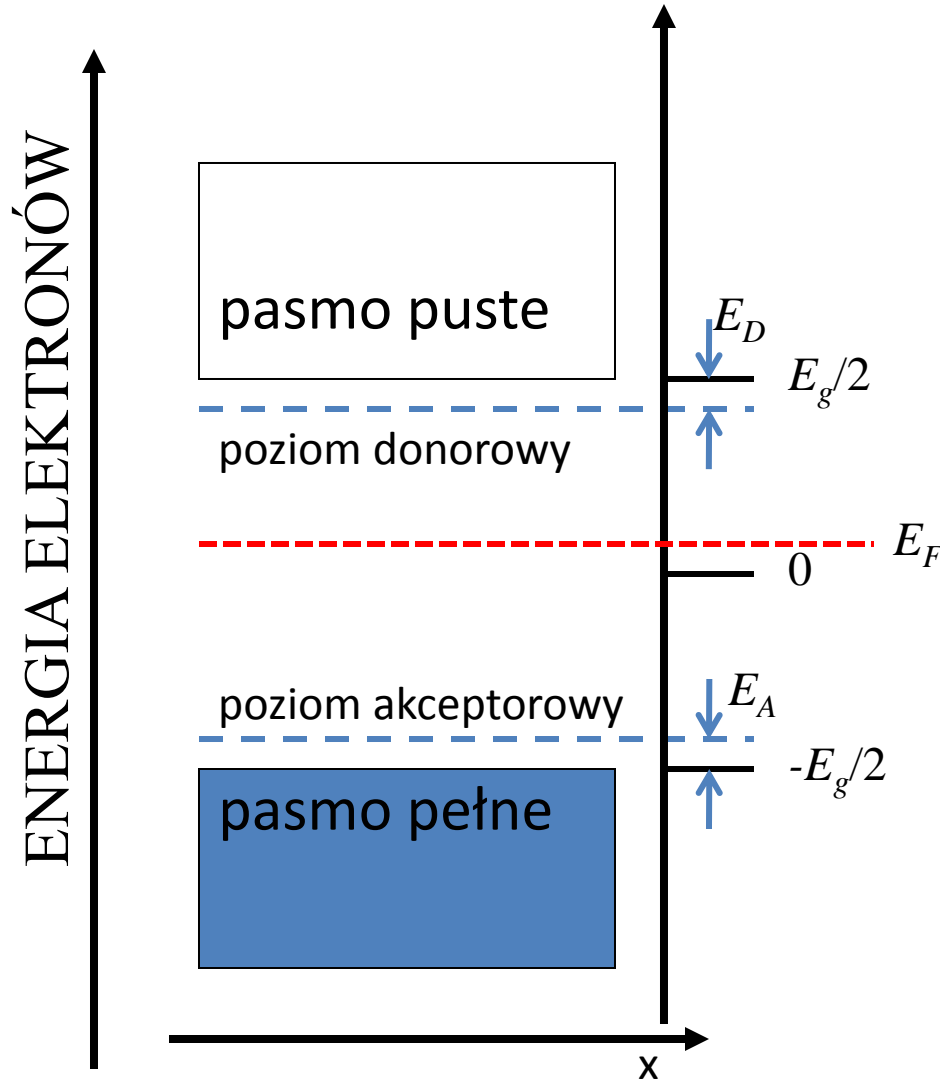
## Model wodoropodobny

### – jonizacja domieszki



# Domieszki i defekty

## Domieszkowanie



### Koncentracja nośników w półprzewodniku niesamoistnym

Rozważmy półprzewodnik, w którym:

$N_A$  – koncentracja akceptorów

$N_D$  – koncentracja donorów

$p_A$  – koncentracja neutralnych akceptorów

$n_D$  – koncentracja neutralnych donorów

$n_c$  – koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa

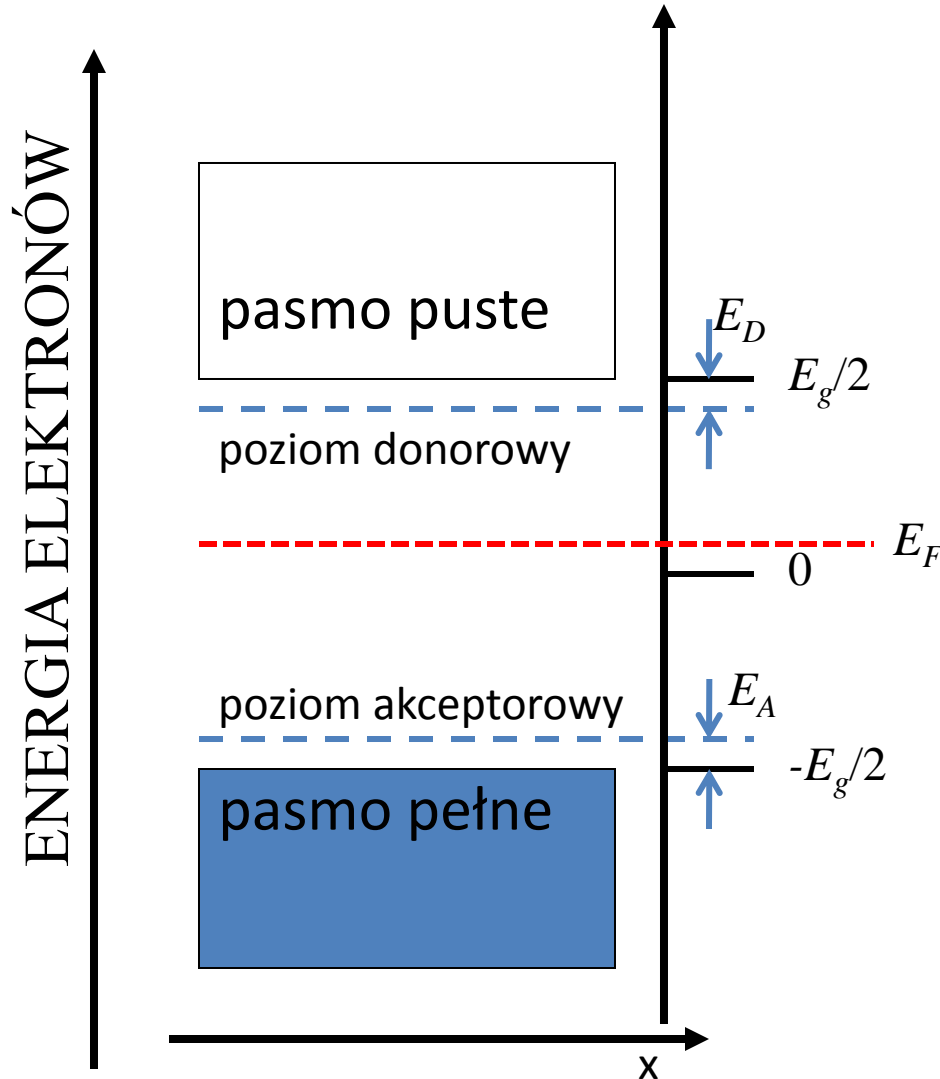
$p_v$  – koncentracja dziur w paśmie walencyjnym

**Z warunku neutralności kryształu:**

Przy tablicy!

# Domieszki i defekty

## Domieszkowanie



### Koncentracja nośników w półprzewodniku niesamoistnym

Rozważmy półprzewodnik, w którym:

$N_A$  – koncentracja akceptorów

$N_D$  – koncentracja donorów

$p_A$  – koncentracja neutralnych akceptorów

$n_D$  – koncentracja neutralnych donorów

$n_c$  – koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa

$p_v$  – koncentracja dziur w paśmie walencyjnym

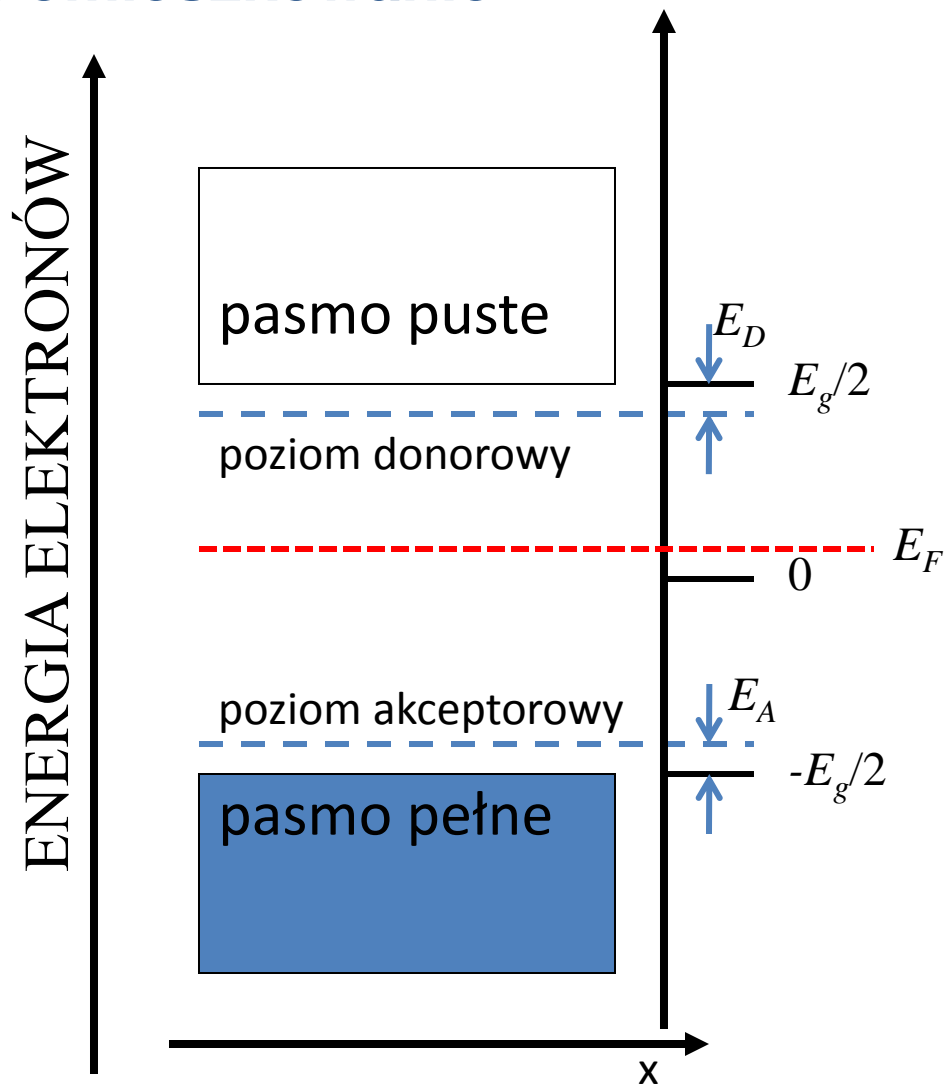
**Z warunku neutralności kryształu:**

$$n_c + (N_A - p_A) = p_v + (N_D - n_D)$$

$$n_c + n_D = (N_D - N_A) + p_v + p_A$$

# Domieszki i defekty

## Domieszkowanie



### Koncentracja nośników w półprzewodniku niesamoistnym

Rozważmy półprzewodnik, w którym:

$N_A$  – koncentracja akceptorów

$N_D$  – koncentracja donorów

$p_A$  – koncentracja neutralnych akceptorów

$n_D$  – koncentracja neutralnych donorów

$n_c$  – koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa

$p_v$  – koncentracja dziur w paśmie walencyjnym

Z warunku neutralności kryształu:

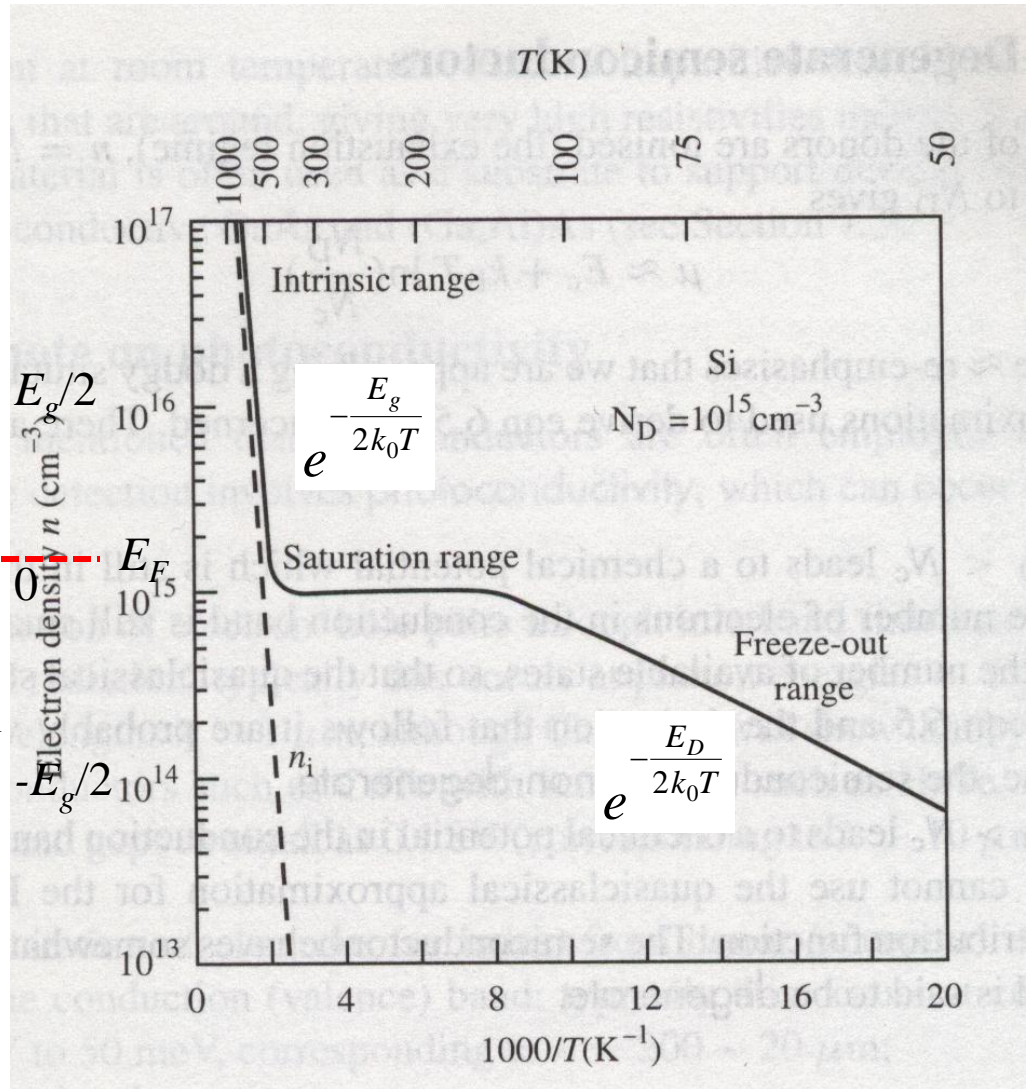
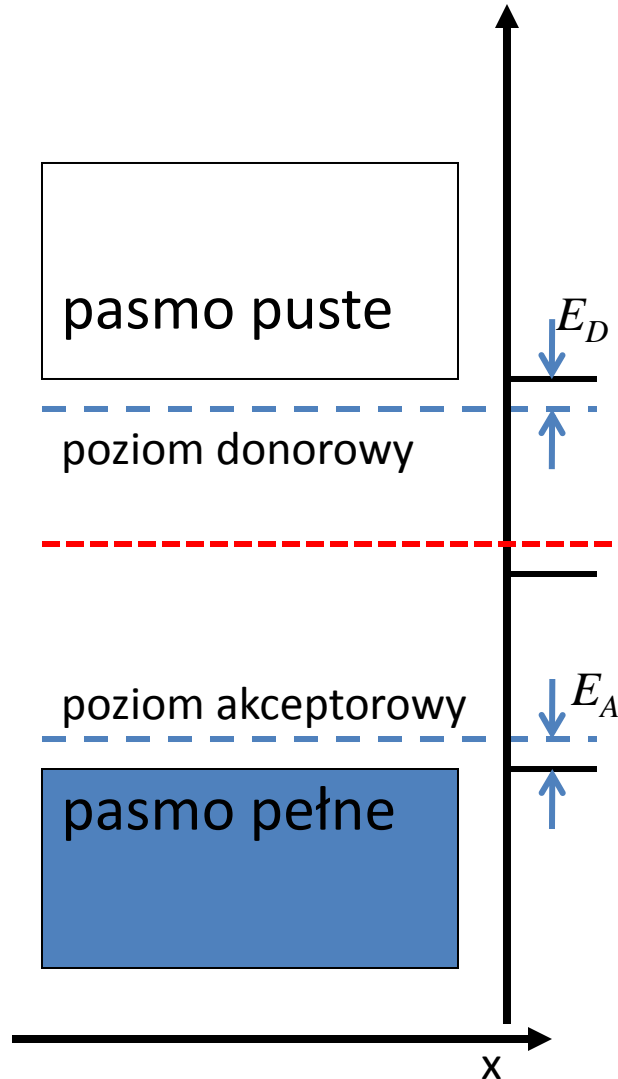
$$n_c + (N_A - p_A) = p_v + (N_D - n_D)$$

$$n_c + n_D = (N_A - p_A) + p_v + p_A$$

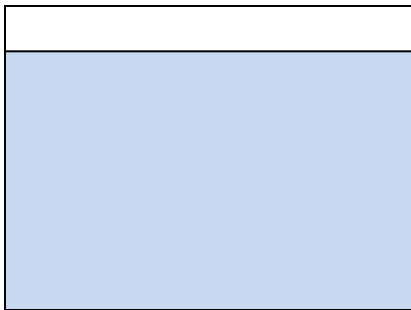
Na ćwiczeniach!

# Domieszki i defekty

## Domieszkowanie



# Teoria pasmowa ciał stałych.



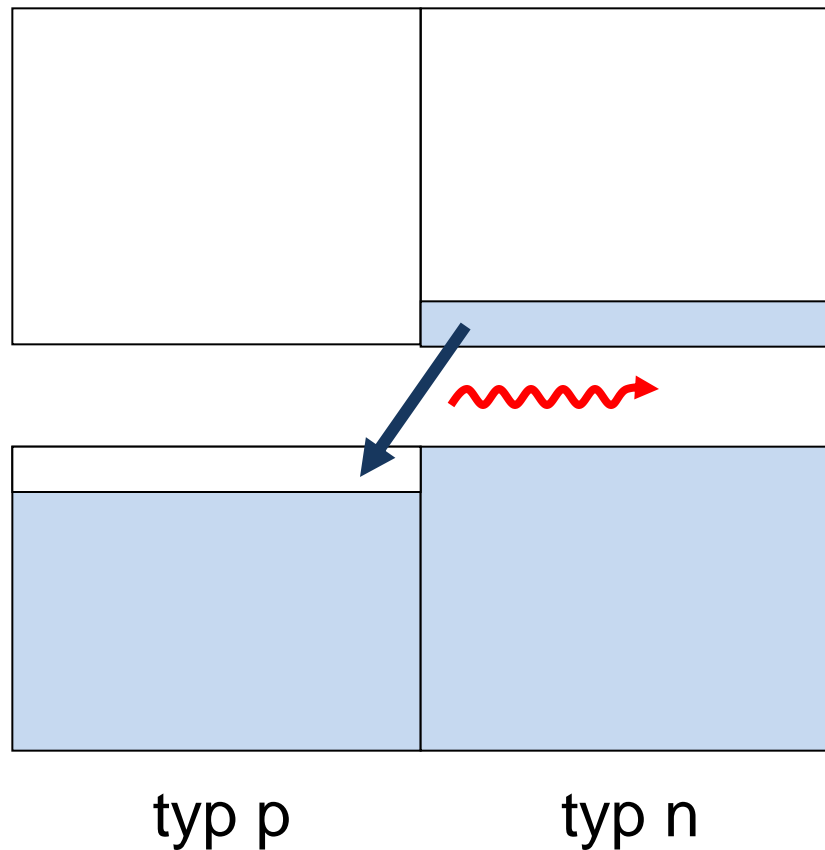
półprzewodnik typu p



półprzewodnik typu n

# Teoria pasmowa ciał stałych.

Dioda – czyli złącze  $p$ - $n$



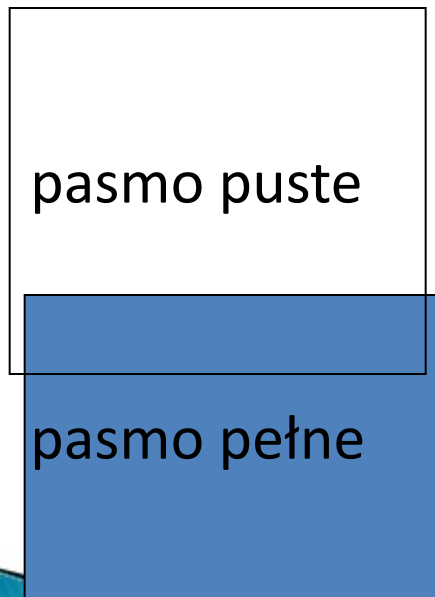
Flat band

# Domieszki i defekty

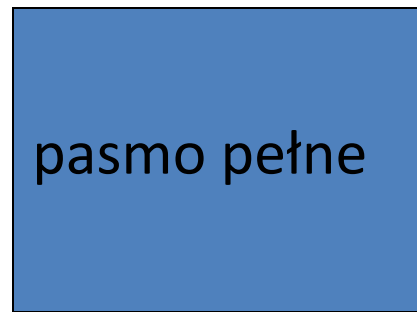
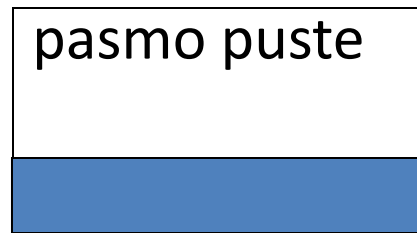
## Półprzewodniki zdegenerowane

- Pasmo domieszkowe.

- Przejście Motta  $N_D \geq \left( \frac{1}{a_B^*} \right)^3$



metal



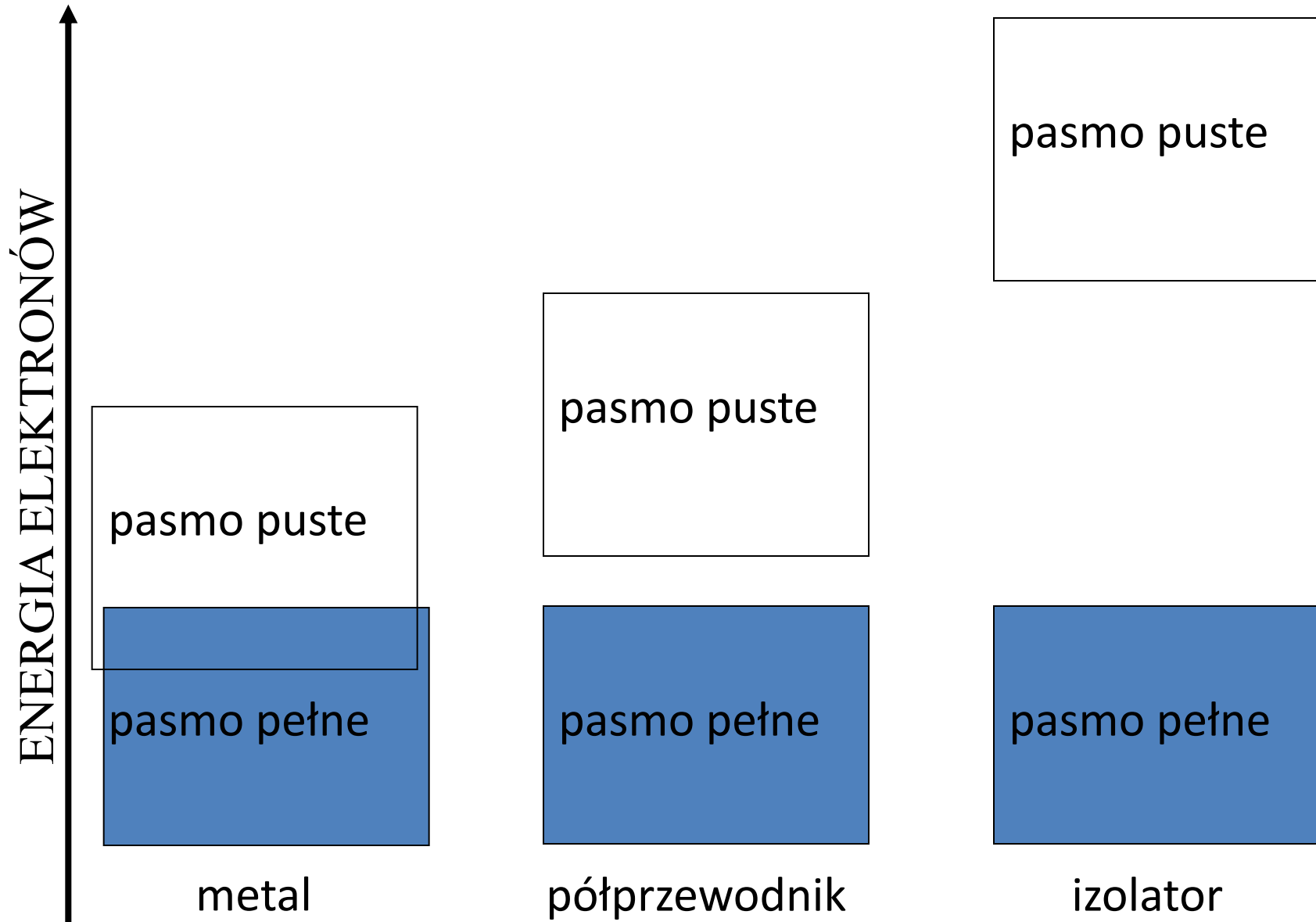
półprzewodnik



Nevill Francis Mott



# Teoria pasmowa ciał stałych.



# Przerwa energetyczna

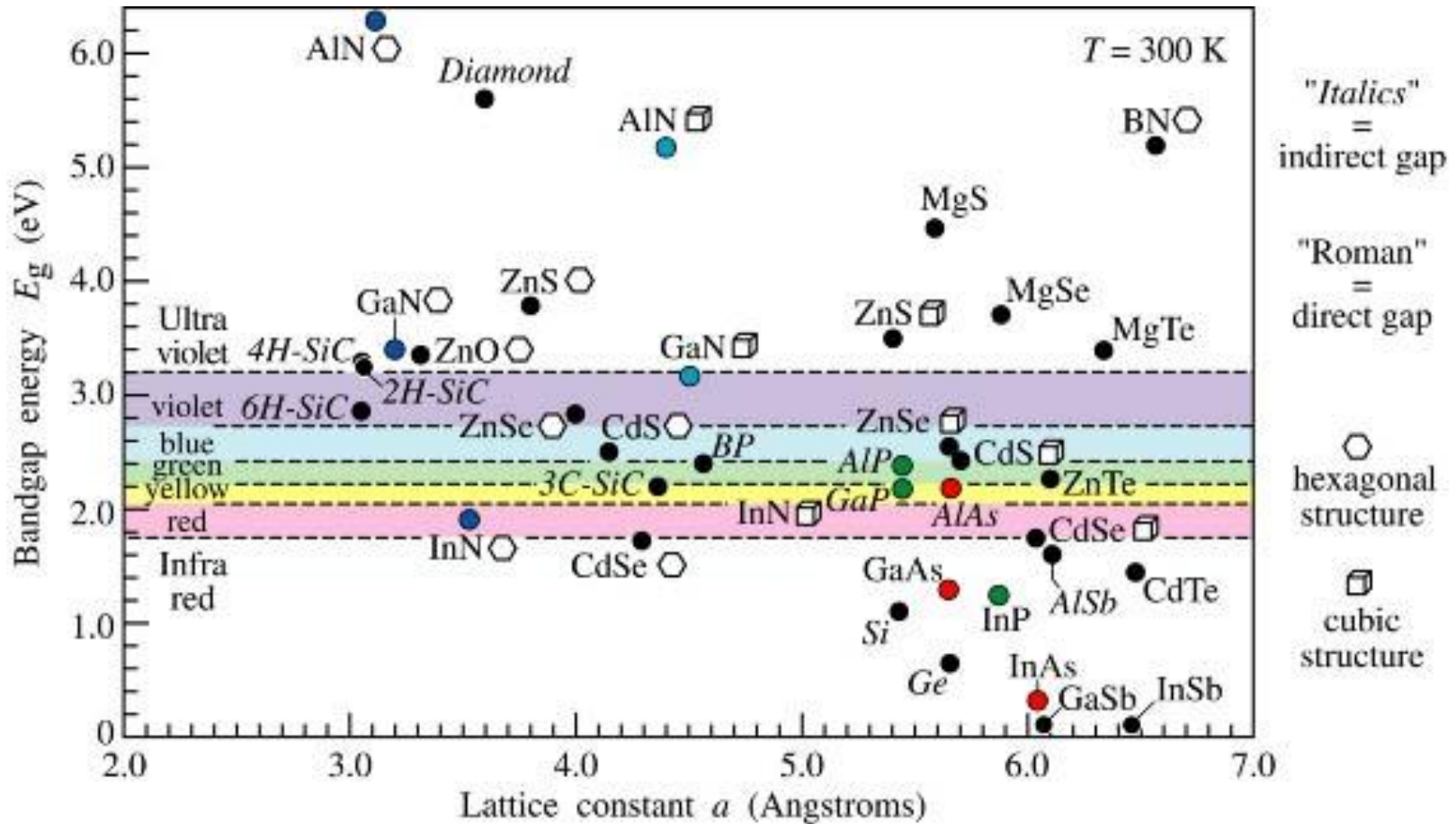
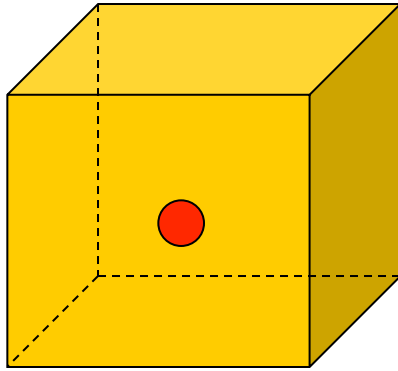
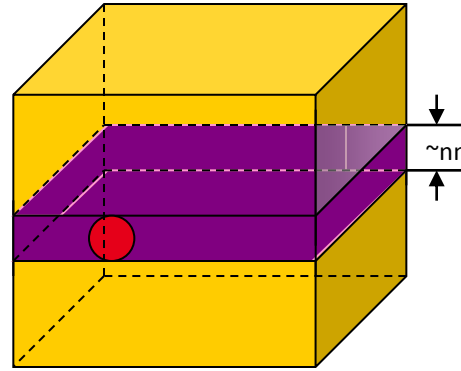


Fig. 11.4. Room-temperature bandgap energy versus lattice constant of common elemental and binary compound semiconductors.

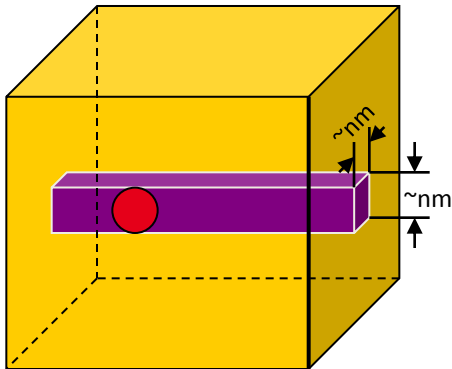
# Wymiary świata



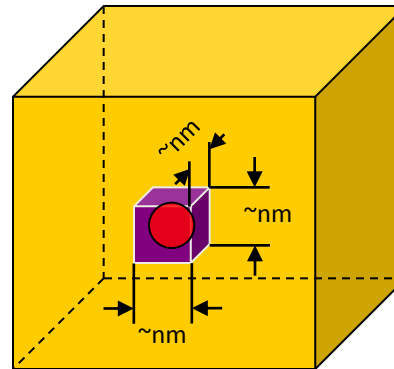
3D: Krysztal objętościowy





2D: Studnia kwantowa



1D: Drut kwantowy



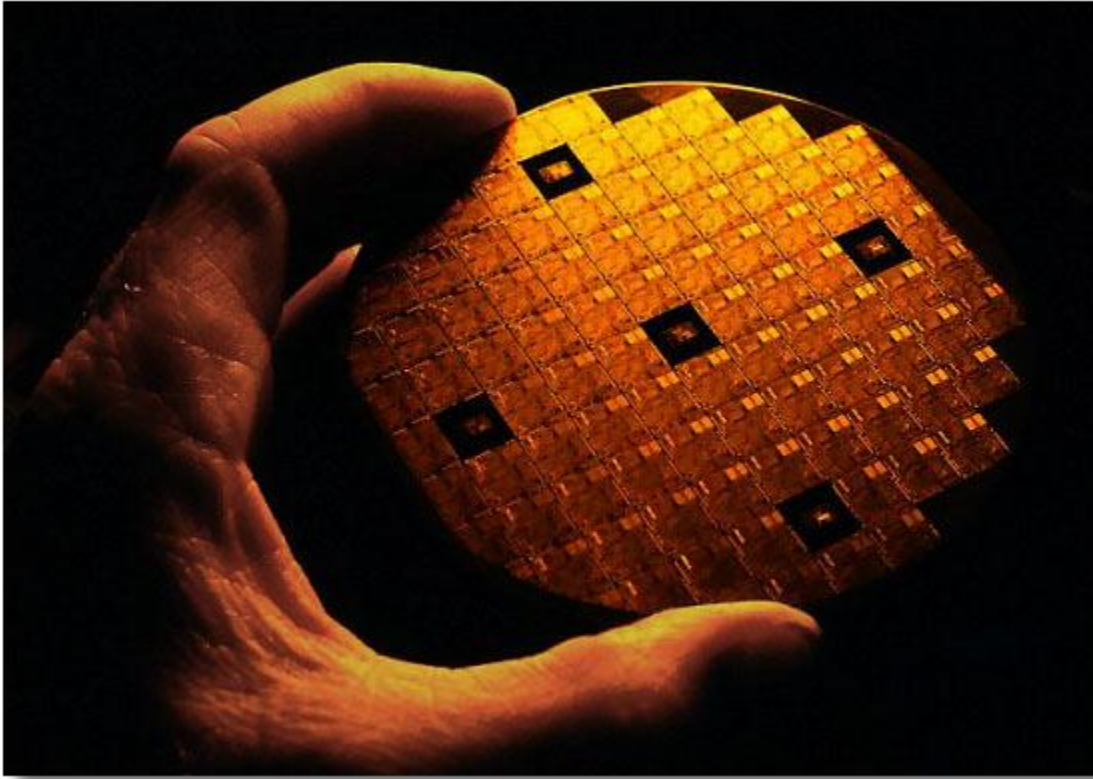
0D: Kropka kwantowa

  $E_g^B$   
  $E_g^Q < E_g^B$ ,  
nm wymiar

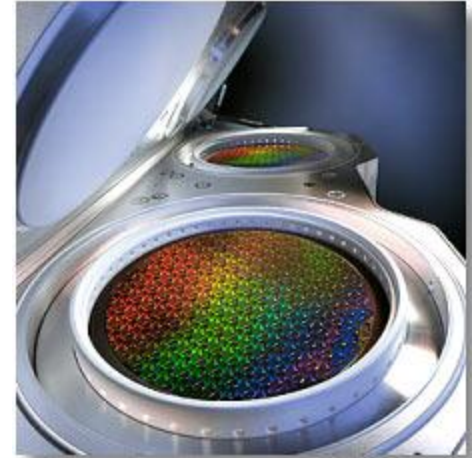
Elektron w kropce kwantowej jest związany w trzech wymiarach (jak w atomie)

# Top-down, czyli małe jest piękne!

Prescot, Intel



Nanotechnologia  
Litografia  
Udoskonalenia  
Galeria  
Fizyka na Hożej



# Metoda Czochralskiego



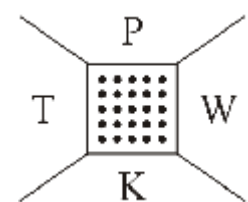
Prof. Jan Czochralski 1885 - 1953,

Urodzony w 1885 roku jako ósmy syn ubogiego stolarza.  
Nie jest pewne czy zdał maturę.  
Nie stać go było na opłacenie studiów.  
Odkrywca metody wzrostu kryształów - *"metody Czochralskiego"*.  
Uznawany za *"praojca elektroniki"*  
Polski uczyony **najczęściej wymieniany w literaturze światowej**.  
W Polsce prawie nieznany...

# Metoda Czochralskiego



<http://www.ptwk.org.pl/pol/patron.html>



STANOWISKO SENACKIEJ KOMISJI HISTORII I TRADYCJI  
SZKOŁY PW W SPRAWIE UCHWAŁY SENATU Z DNIA 19  
GRUDNIA 1945 R. DOTYCZĄCEJ PROF. DR. H.C. JANA  
CZOCHRALSKIEGO

Jak wynika z zeznań świadków, w tym mgr. inż. Ludwika Szenderowskiego, b. kierownika warsztatu i odlewni w Zakładzie Badań Materiałów, a jednocześnie członka ruchu oporu, w r. 1942 na terenie ZBM rozpoczęła swą potajną działalność komórka organizacyjna AK w zakresie produkcji odlewów żeliwnych skorup do granatów, elementów drukarni polowych i części do pistoletów. Prof. Czochralski wiedział o tym i nie tylko tolerował, ale i ochraniał działalność konspiracyjną w swym zakładzie wobec władz niemieckich i gestapo.

Na korzyść prof. Czochralskiego należy również zaliczyć jego działalność poza ZBM. Wykorzystując swe rozległe znajomości, interweniował wielokrotnie i dość skutecznie u władz okupacyjnych w celu uwolnienia różnych osób z obozów niemieckich, więzień i obozów koncentracyjnych. Wśród osób uwolnionych można znaleźć m.in. nazwisko dr. Mariana Świderka, późniejszego profesora PW, wnuka Ludwika Solskiego.

Znamienna jest tu wypowiedź b. asystentki prof. Czochralskiego prof. dr. Zofii Wendorff, że "nie zna ona przypadku, aby prof. Czochralski odmówił pomocy Polakom, którzy się do niego zwrócili".

# Metoda Czochralskiego



<http://www.ptwk.org.pl/pol/patron.html>

Uzasadnienie Sądu i decyzja o zwolnieniu z zarzutów, Łódź, dnia 13.sierpnia 1945r

## Uzasadnienie

62/101  
Jan Czochralski, Mieczysław Wojciechowski i Leonia z Czochralskich Wojciechowska podejrzani są o współpracę z niemieckimi władzami okupacyjnymi na szkodę osób spośród ludności cywilnej względnie Państwa Polskiego.

W toku przeprowadzonego dochodzenia ustalono, że Jan Czochralski przybył do kraju w roku 1928 r. z Niemiec na wezwanie władz państwowych, jako fachowiec w dziedzinie metalurgii i otrzymał katedrę metalurgii na Politechnice Warszawskiej. Następnie zostało mu również powierzono kierownictwo Instytutu Metalurgii i Metaloznawstwa w Warszawie /k.32/.

Wskutek działań wojennych we wrześniu 1939 r. Instytut ten zawiesił swą pracę. Na początku 1940 r. Instytut, za pozwoleniem niemieckich władz okupacyjnych wznowił swą pracę, lecz już jako przedsiębiorstwo przemysłowo-handlowe /k.8,33-34,43,46,58/. Między innymi przedsiębiorstwo to produkowało panewki i tłoki dla wojskowych reperacyjnych warsztatów samochodowych. W związku z tym Czochralski wszedł w kontakt z niemieckimi władzami okupacyjnymi, co było niewątpliwie asumptem do przypuszczeń, że Czochralski uprawia działalność, szkodliwą dla Państwa Polskiego względnie osób spośród ludności cywilnej. Jednakże materiały zebrane w dochodzeniu nie potwierdziły tych przypuszczeń. Przeciwnie z akt dochodzenia wynika, że dzięki stosunkom Czochralskiego udało się wydostać szereg osób z obozów koncentracyjnych względnie więzień /k.25,35,36,39,46,58/.

Dochodzenie nie dostarczyło również żadnych konkretnych faktów szkodliwej działalności ze strony innych członków rodziny Jana Czochralskiego, a w szczególności ze strony Mieczysława i Leonii Wojciechowskich. Zaznaczyć przy tym należy, że Leonia Wojciechowska w szeregu wypadków skutecznie interweniowała u władz niemieckich na rzecz osób, aresztowanych przez władze okupacyjne /k.12,13,15,19-23/.

W świetle tych ustaleń brak jest podstaw do ścigania Jana Czochralskiego oraz Mieczysława i Leonii Wojciechowskich przed Specjalnym Sądem Karnym w kierunku jednego z przestępstw, przewidzianych w dekreście P.K.W. N. z dnia 31.8.1944 r. w brzmieniu dekretu z dnia 16.2.1945 r./Dz.U.R.P. Nr.7/45, poz.29/.

p.o. Prokurator

St. Walczak

## Postanowienie

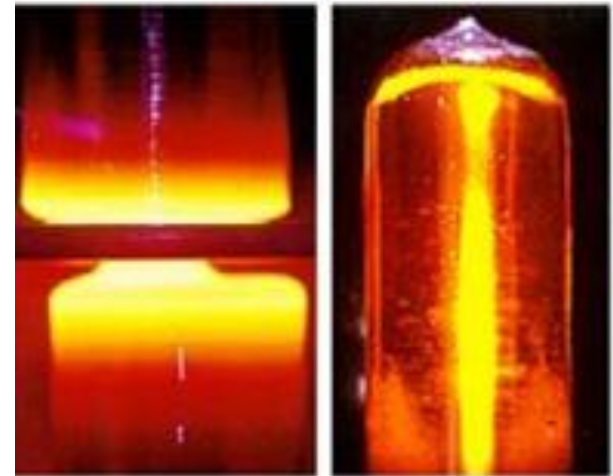
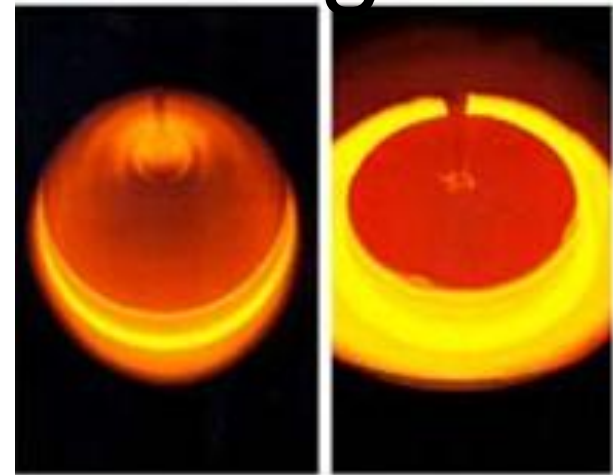
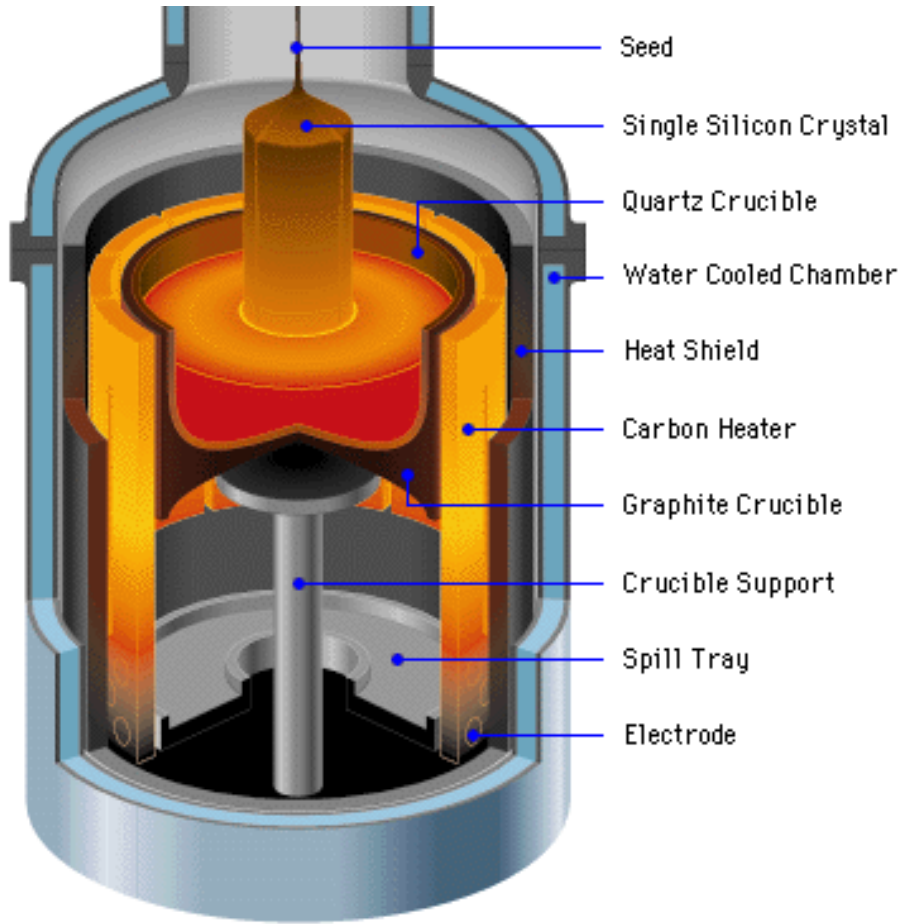
Postanawiam zgodnie z wnioskiem Wicoprokuratora rejonowego.

Odniesiono

Prokurator

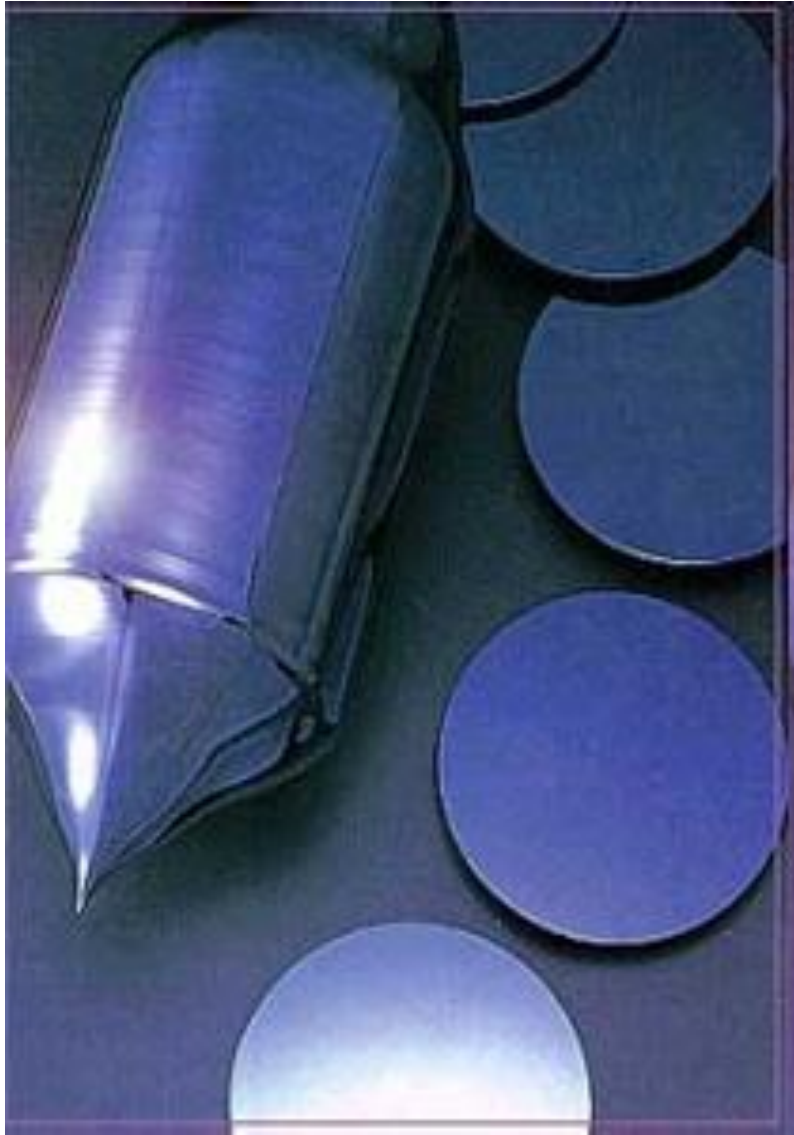
Łódź, dnia 13 sierpnia 1945 r.

# Metoda Czochralskiego

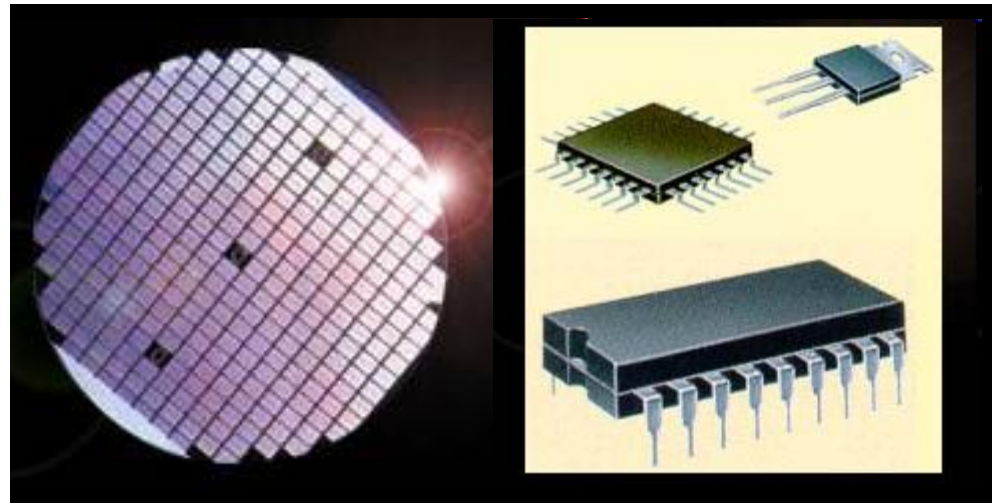




# Metoda Czochralskiego



<http://www.sehmy.com/Product/abtWafers.htm>



# Metoda Czochralskiego

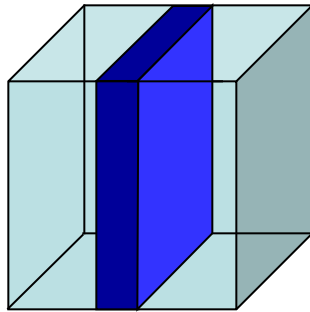


© "Smithsonian", Jan 2000, Vol 30, No. 10

# Struktury niskowymiarowe

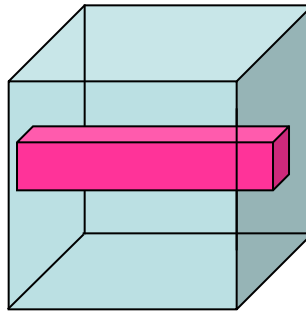
## Low-dimensional Semiconductor Systems

Studnie  
kwantowe



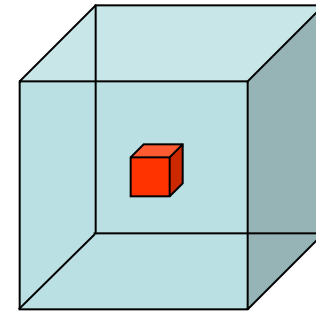
2D

Druty  
kwantowe



1D

Kropki  
kwantowe



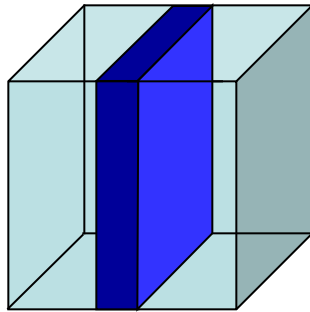
“0D”

Dyskretna struktura elektronowa

# Struktury niskowymiarowe

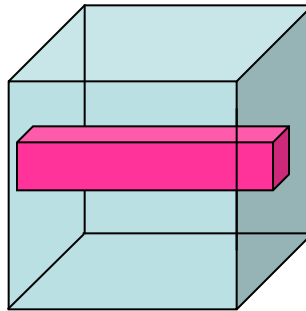
## Low-dimensional Semiconductor Systems

Studnie  
kwantowe



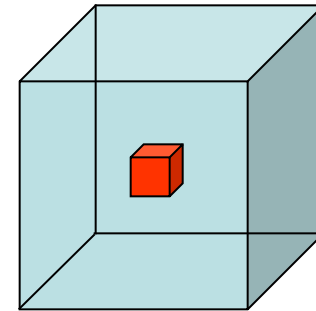
2D

Druty  
kwantowe



1D

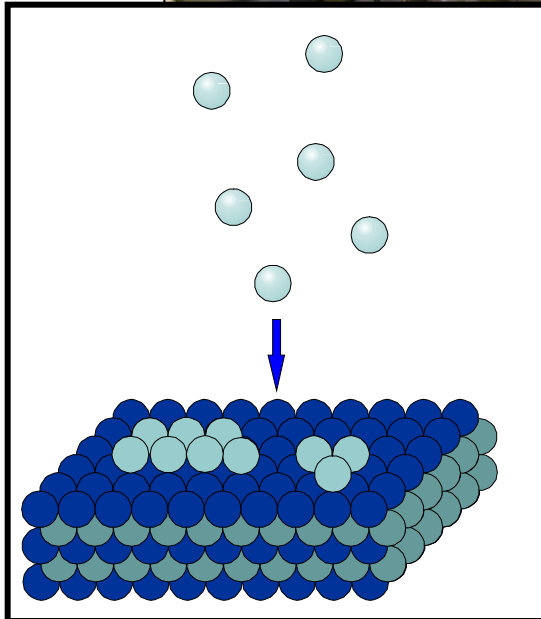
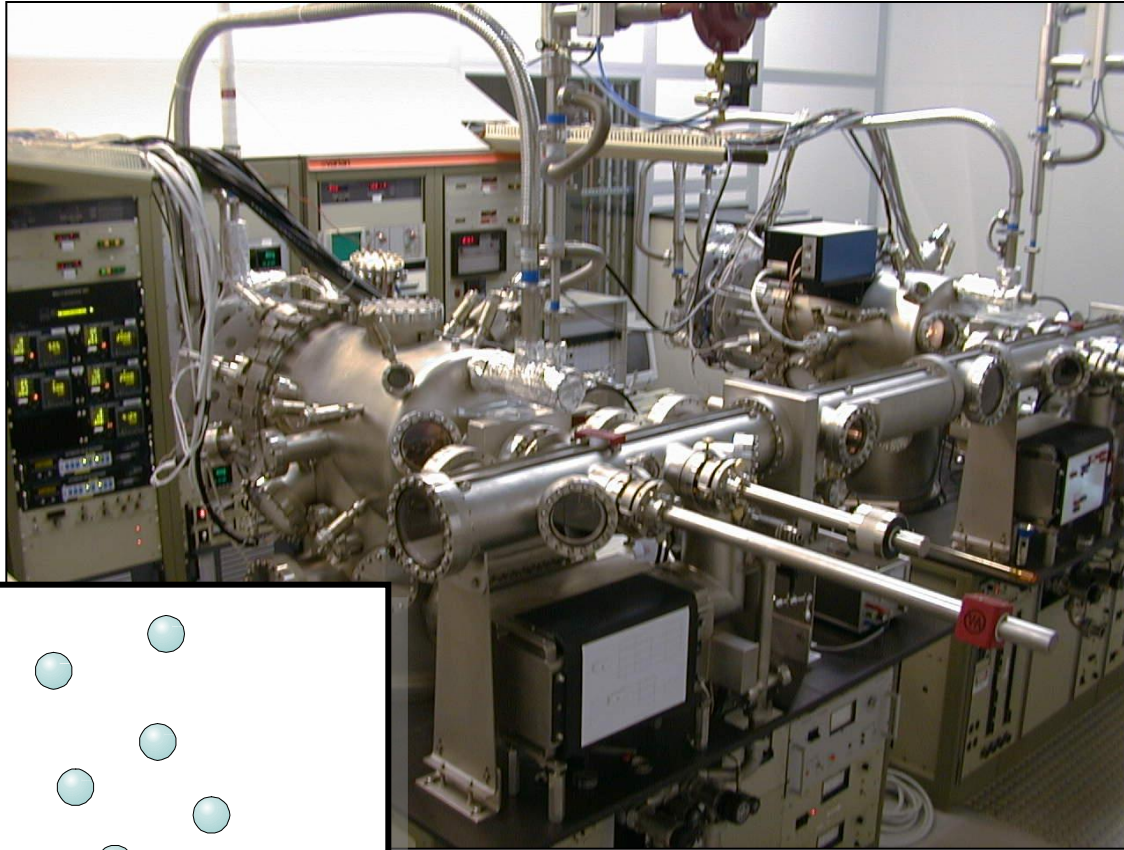
Kropki  
kwantowe



“0D”

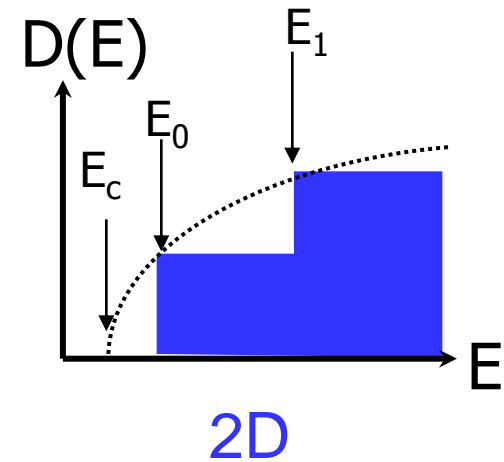
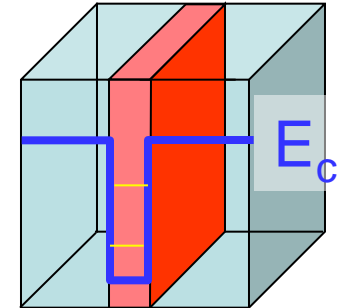
Dyskretna struktura elektronowa

# MBE

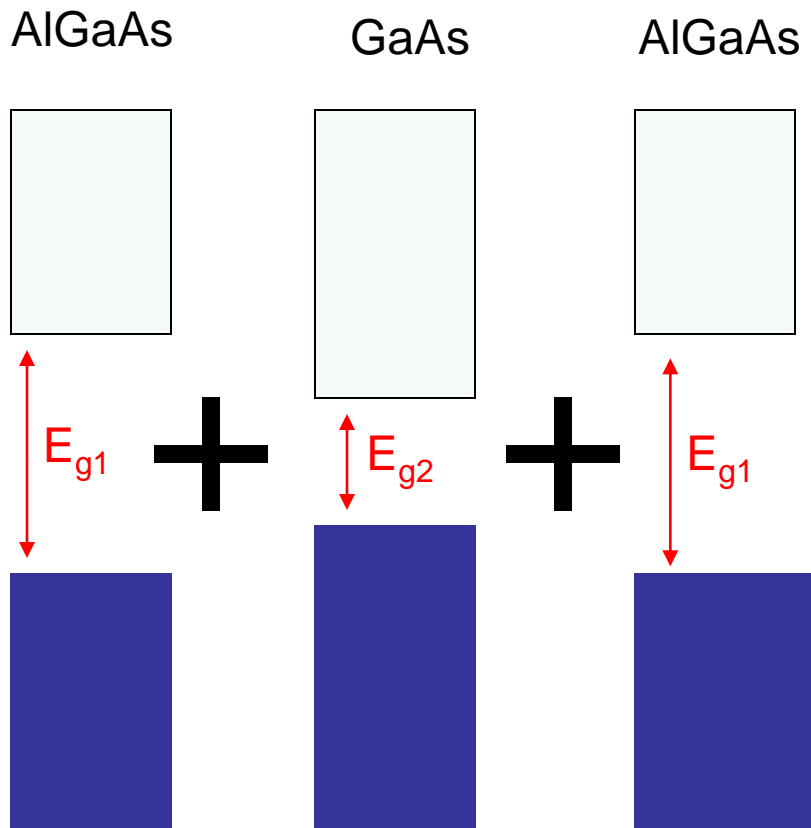
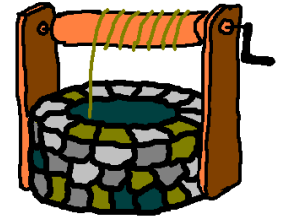


MBE → Osadzanie z atomową precyzją warstw o różnym składzie lub domieszkowaniu

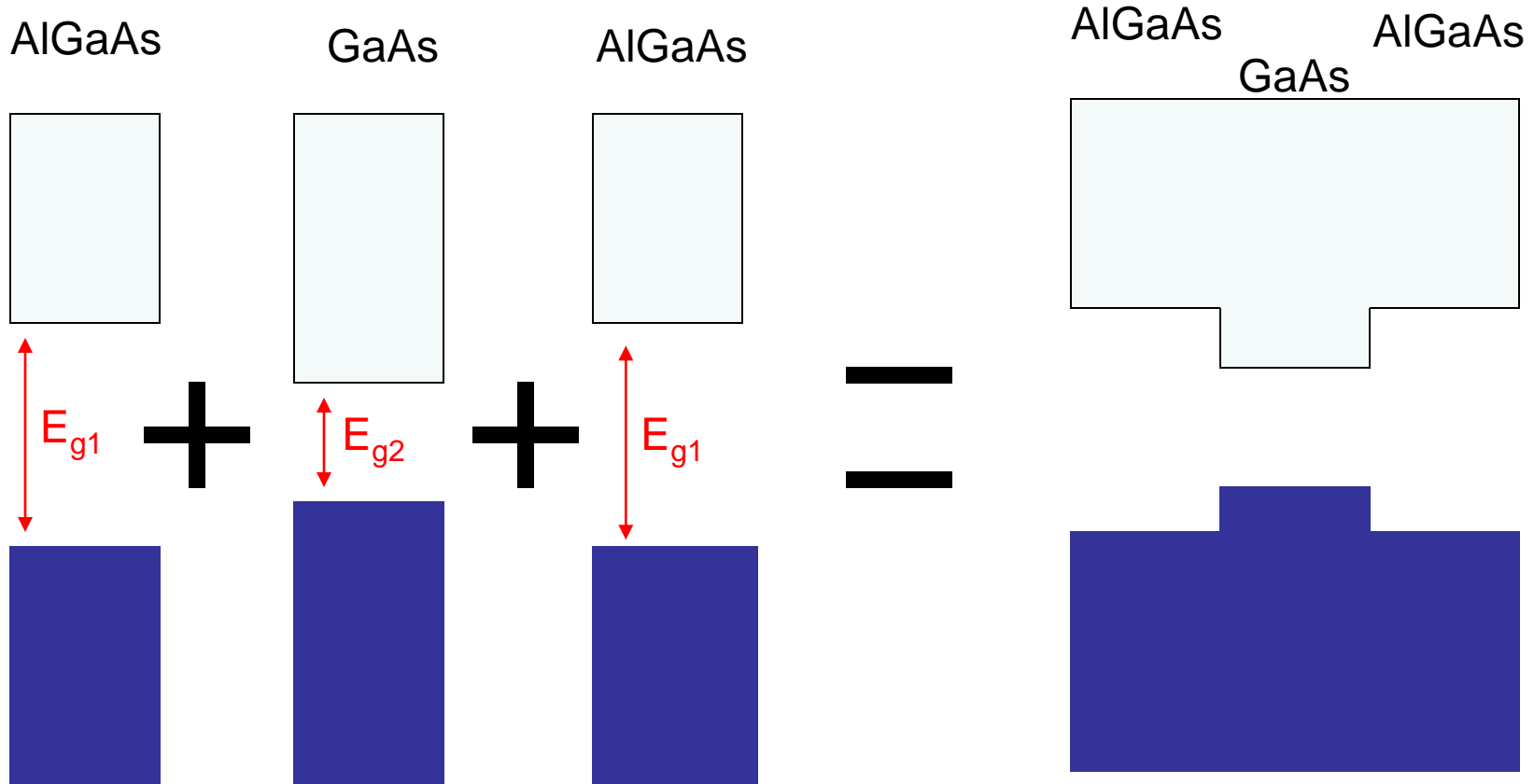
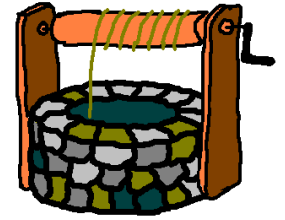
Studnia kwantowa



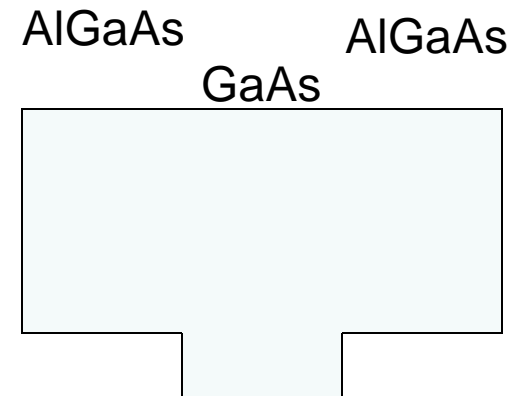
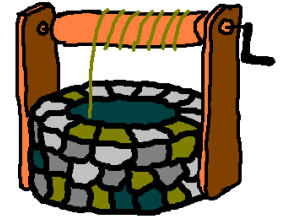
# Studnia Kwantowa



# Studnia Kwantowa

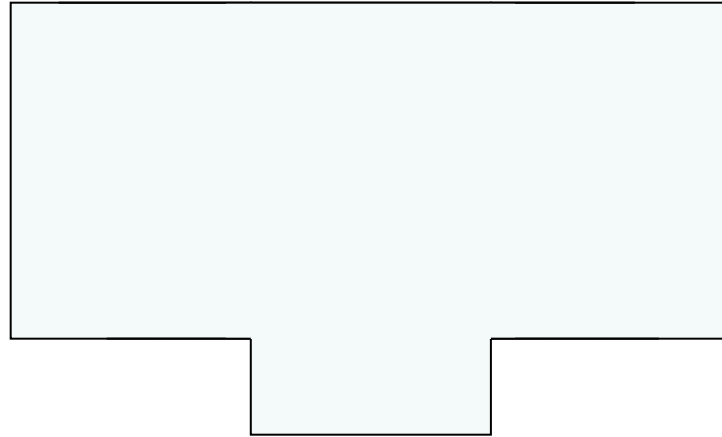


# Studnia Kwantowa

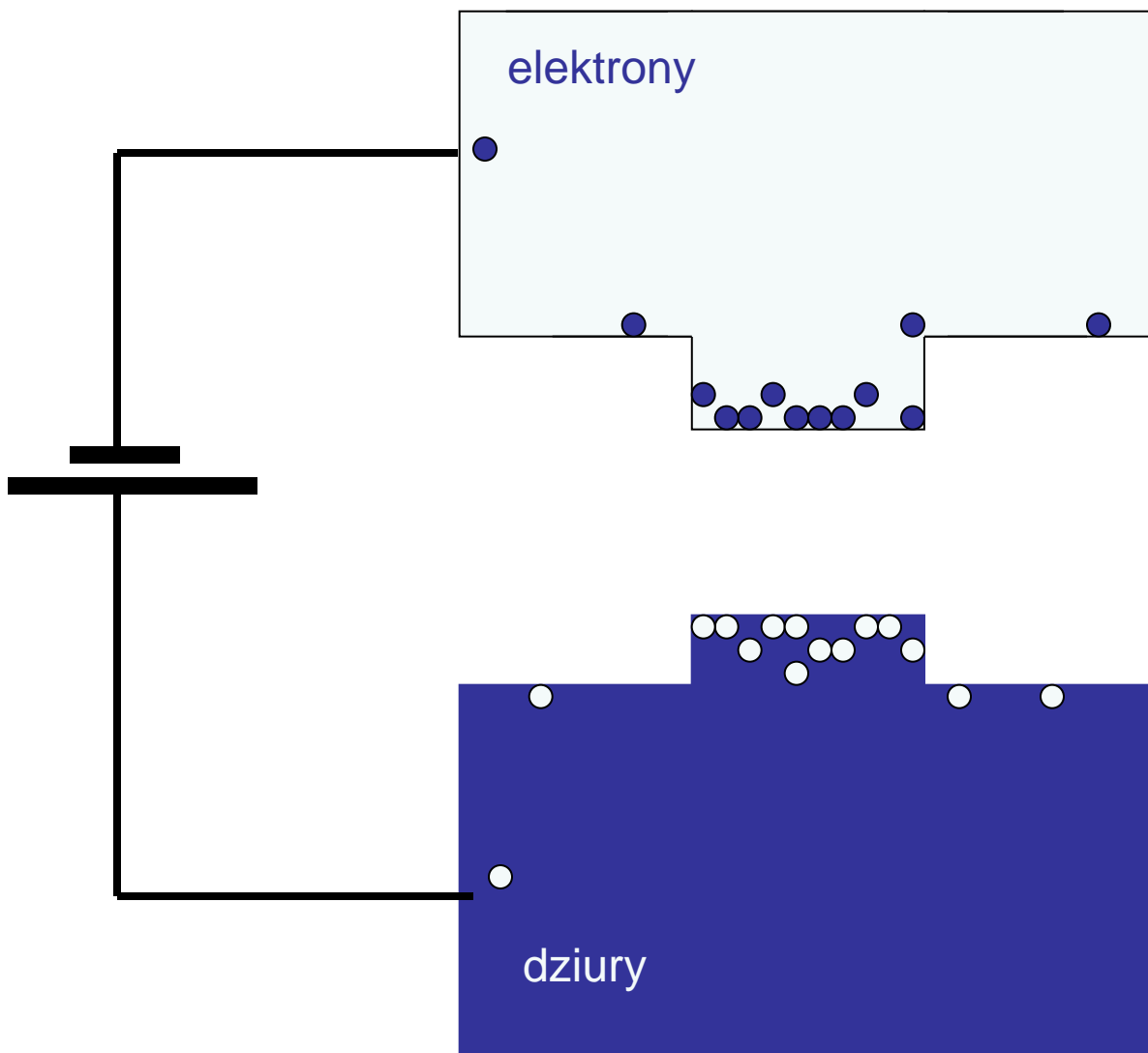




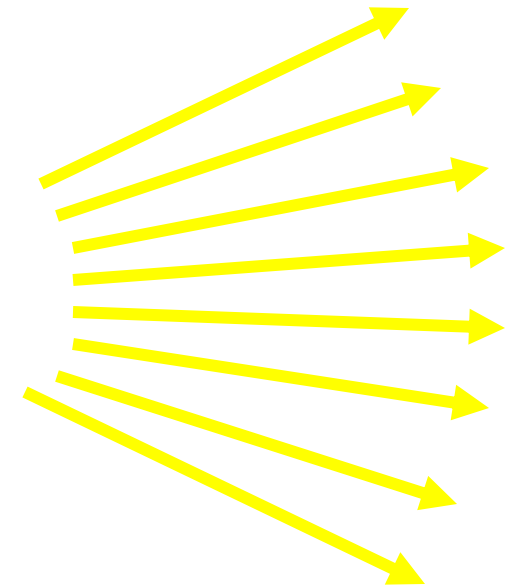
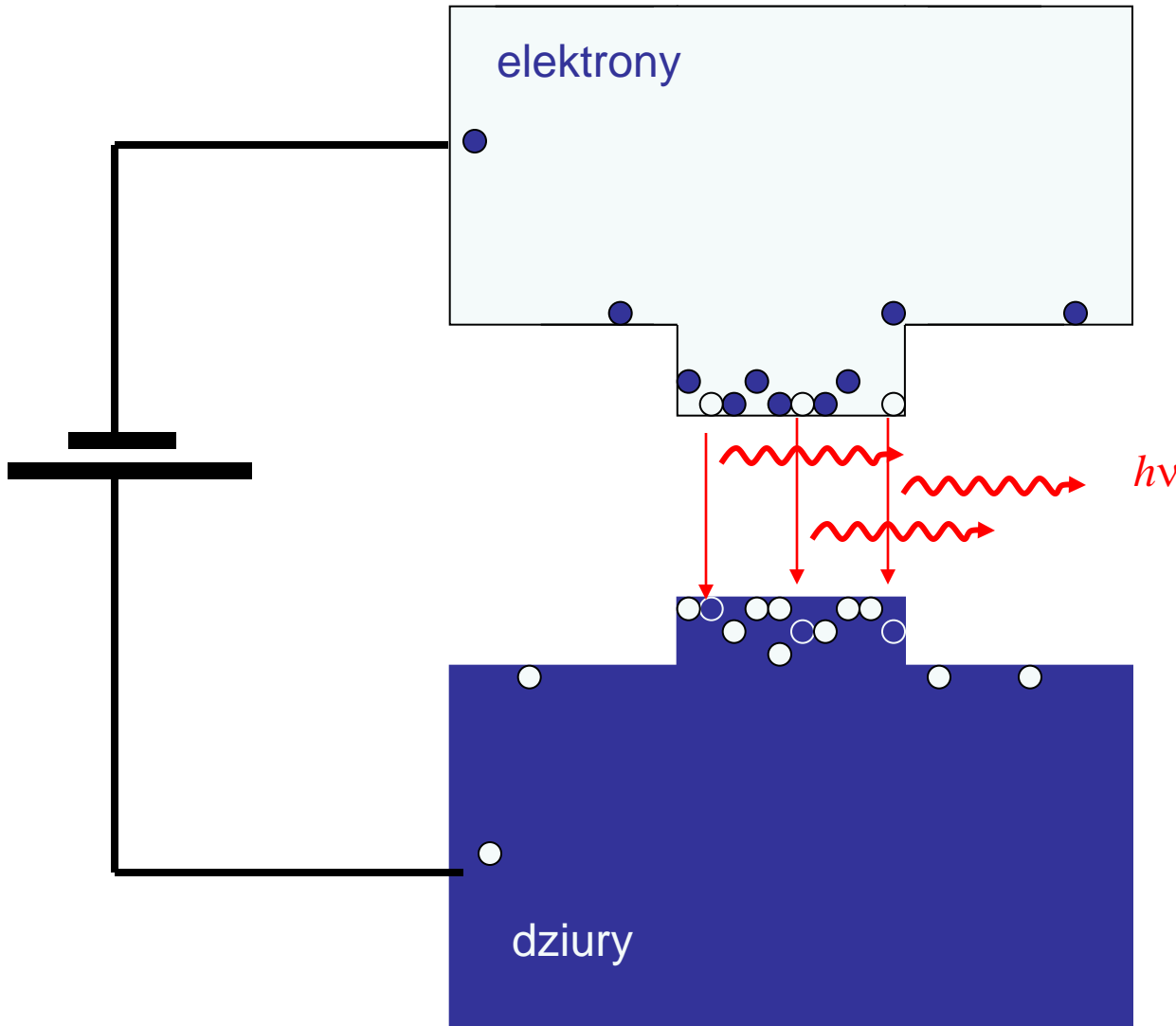
# Studnia Kwantowa



# Studnia Kwantowa

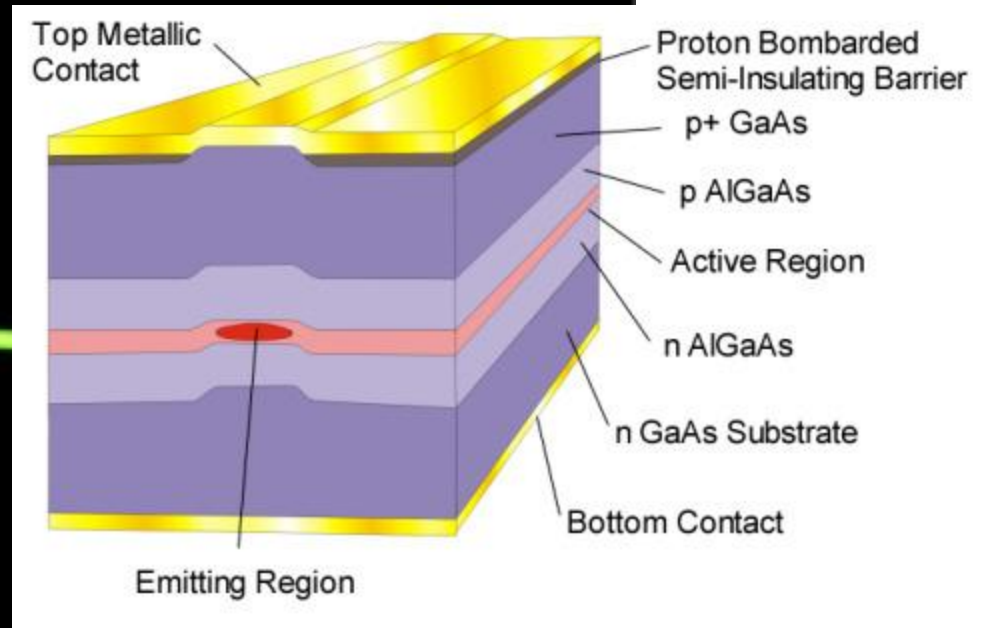
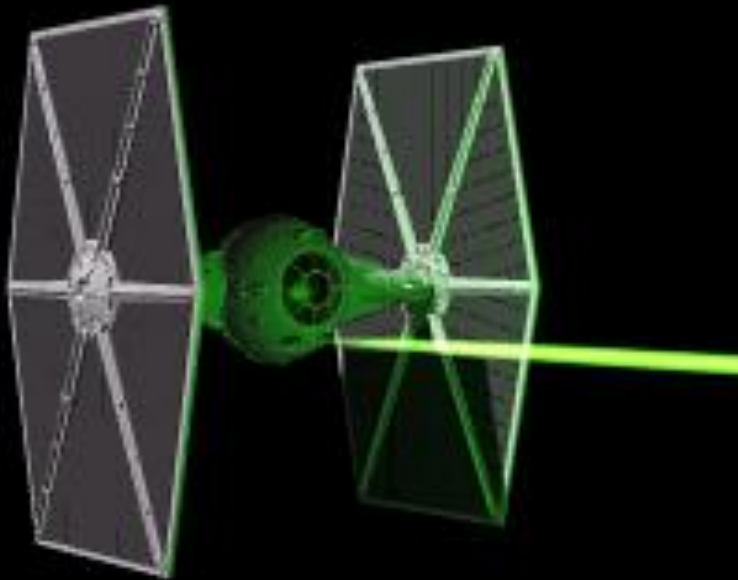


# Studnia Kwantowa



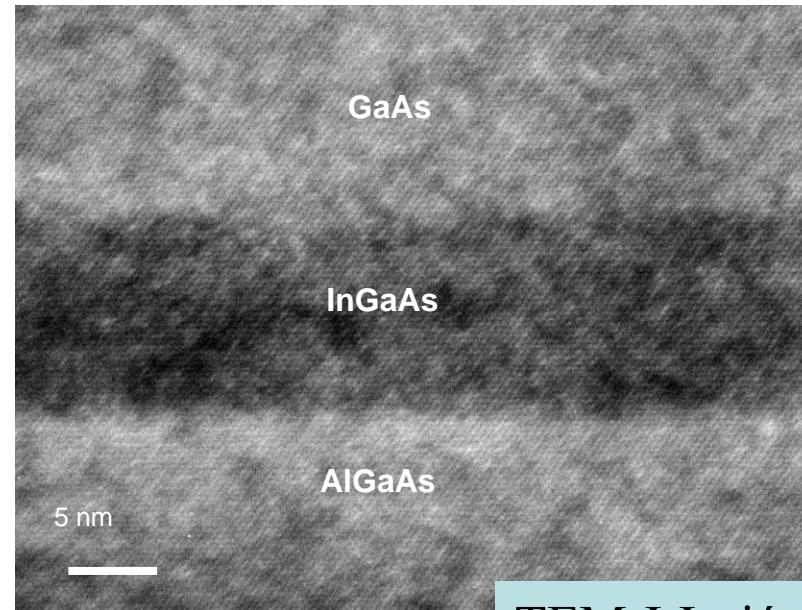
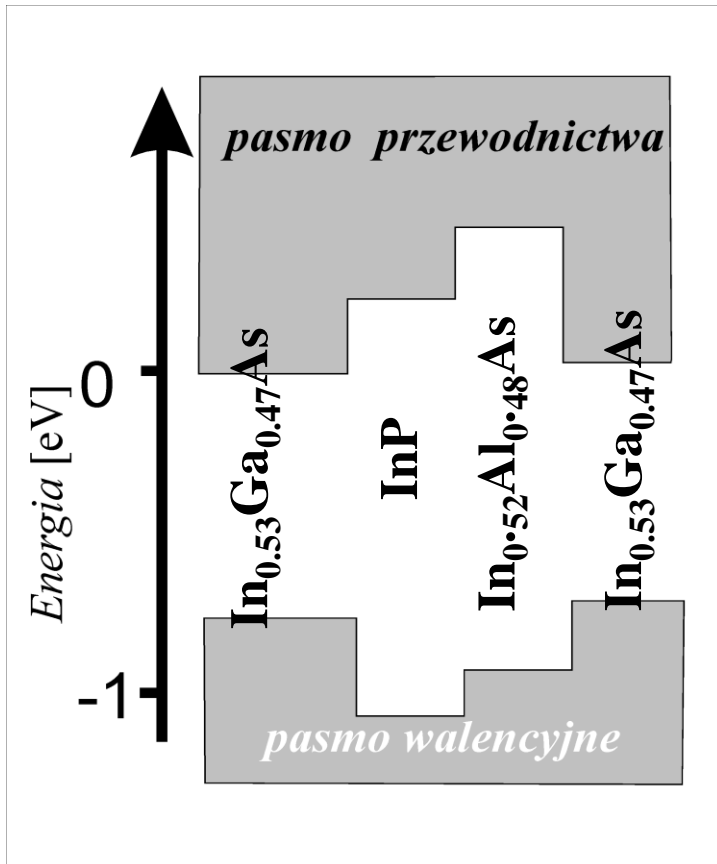
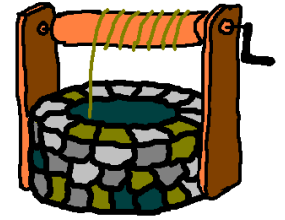
# Studnie Kwantowe

## Lasery półprzewodnikowe

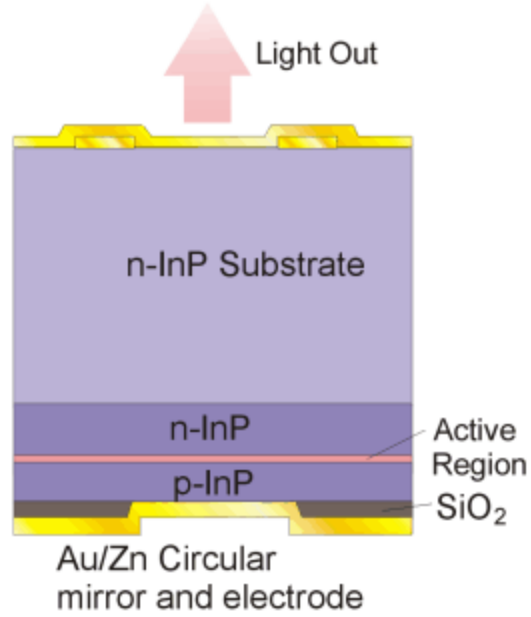


# Studnia Kwantowa

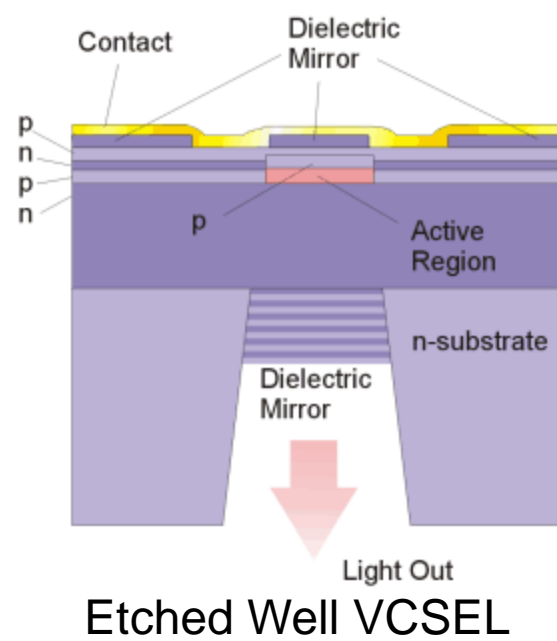
## Inżynieria przerwy energetycznej



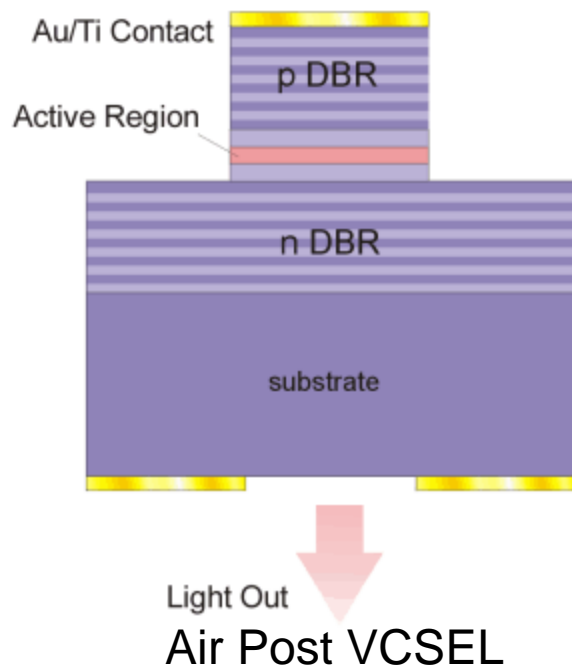
TEM J.Jasiński



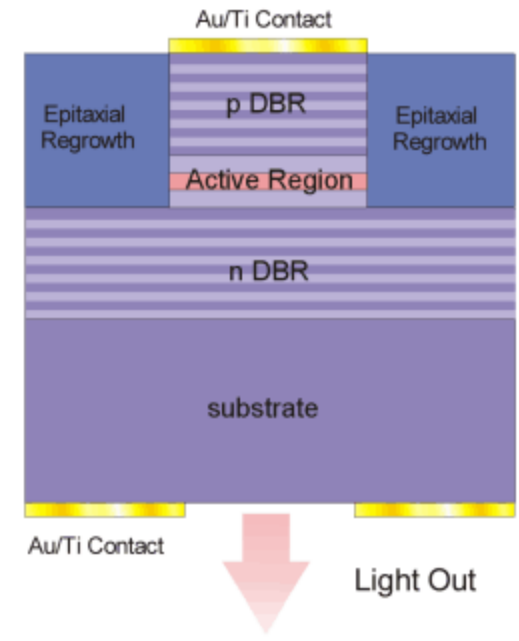
Metalic Reflector VCSEL



Etched Well VCSEL

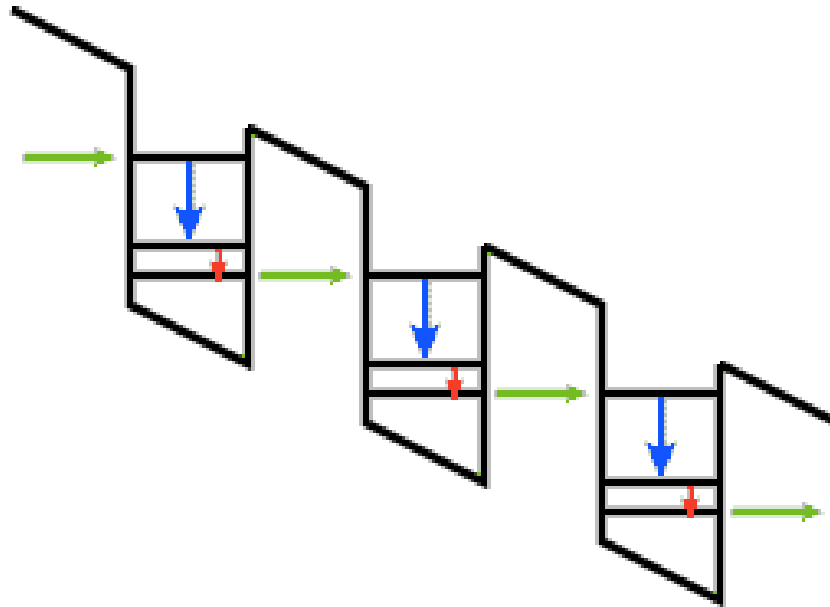


Air Post VCSEL

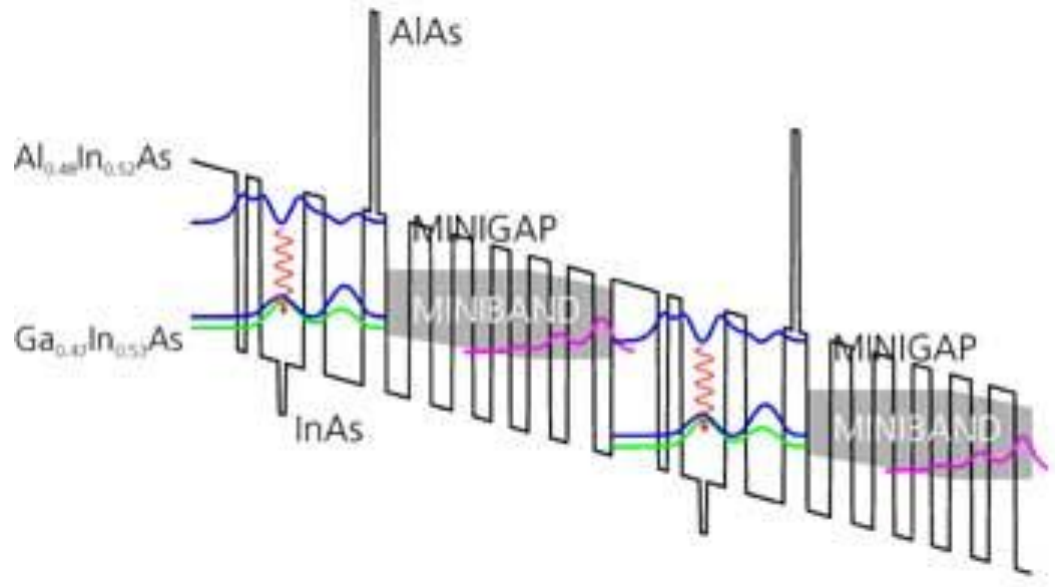


Burried Regrowth VCSEL

# QCL - Quantum Cascade Laser



# QCL - Quantum Cascade Laser



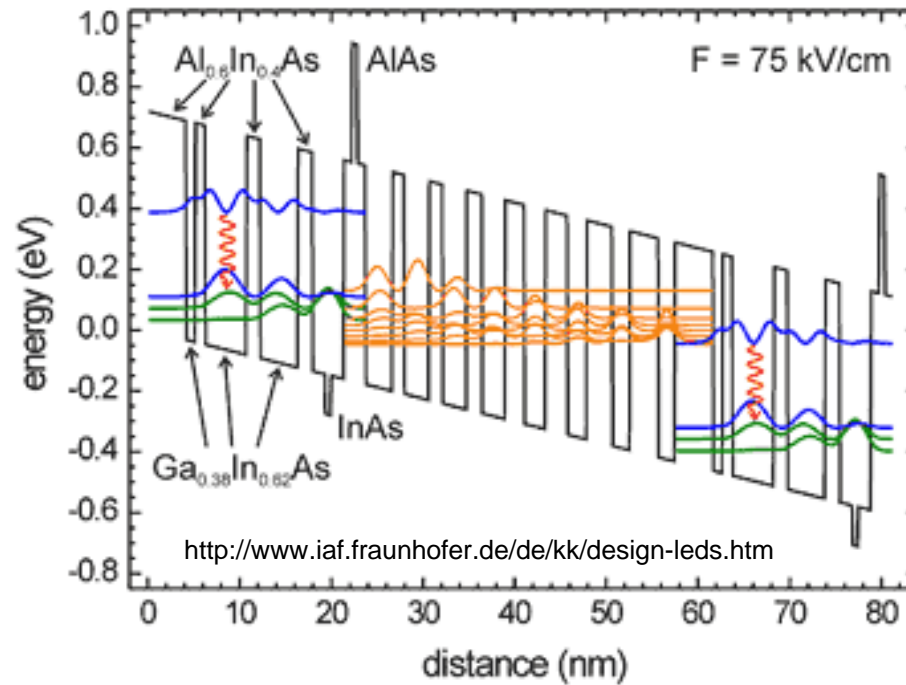
The QUANTA® OEM module (LASER COMPONENTS)



[http://www.sacher-laser.com/QCL\\_LaserHead.php](http://www.sacher-laser.com/QCL_LaserHead.php)



# QCL - Quantum Cascade Laser

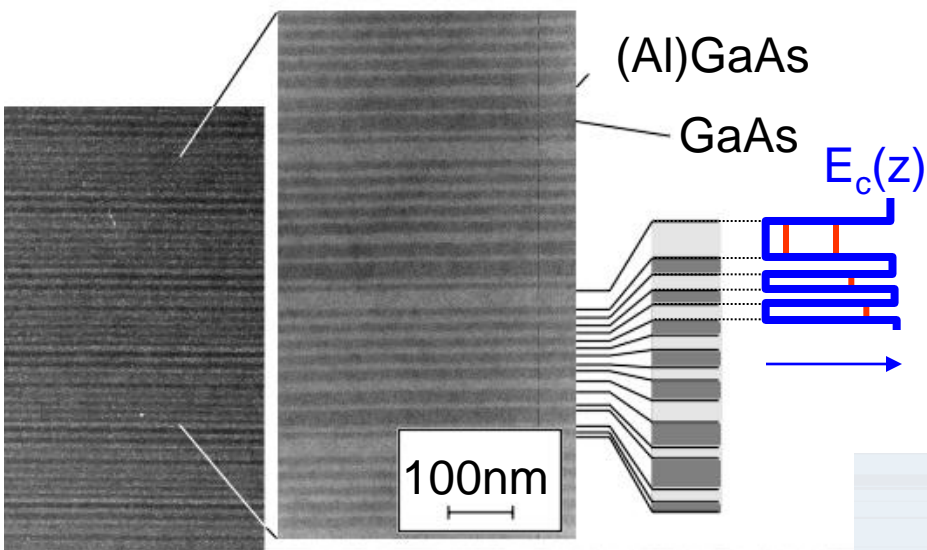


The QUANTA® OEM module (LASER COMPONENTS)



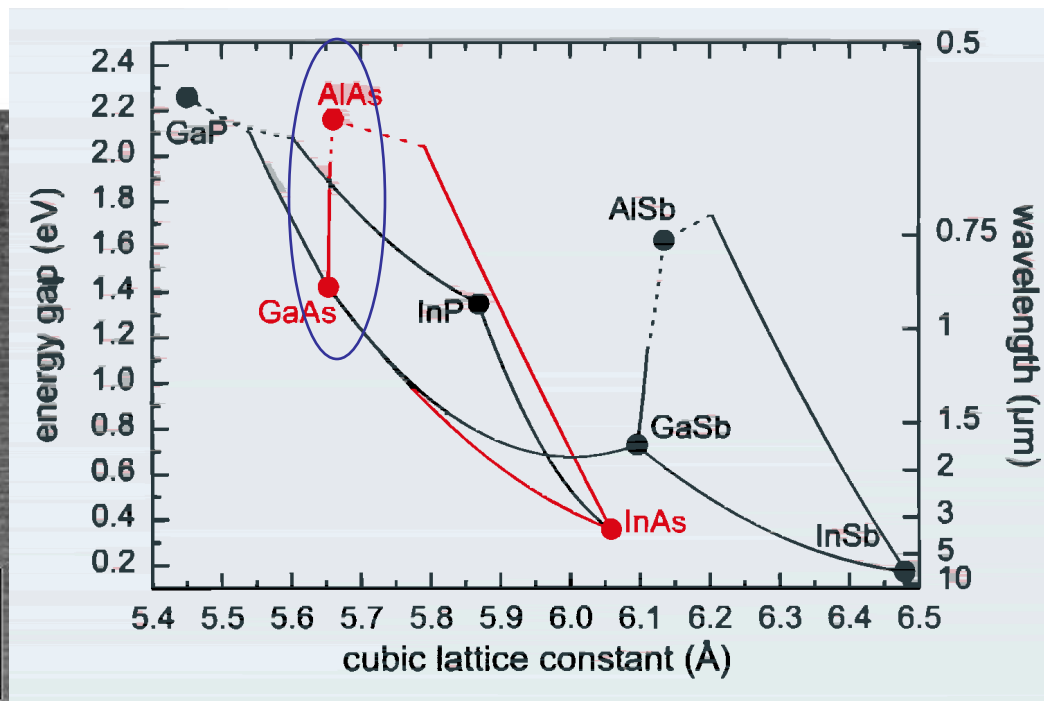
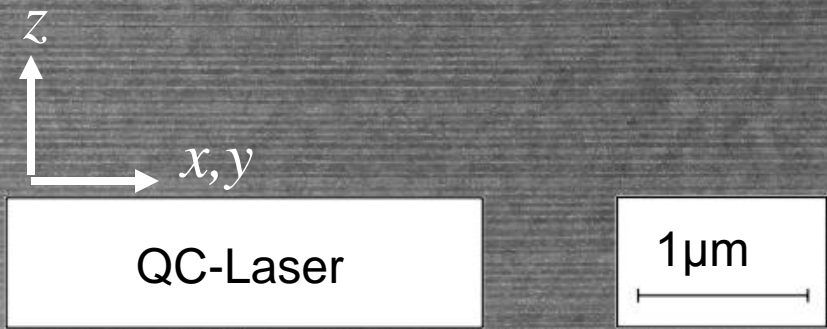
[http://www.sacher-laser.com/QCL\\_LaserHead.php](http://www.sacher-laser.com/QCL_LaserHead.php)

# Band structure engineering



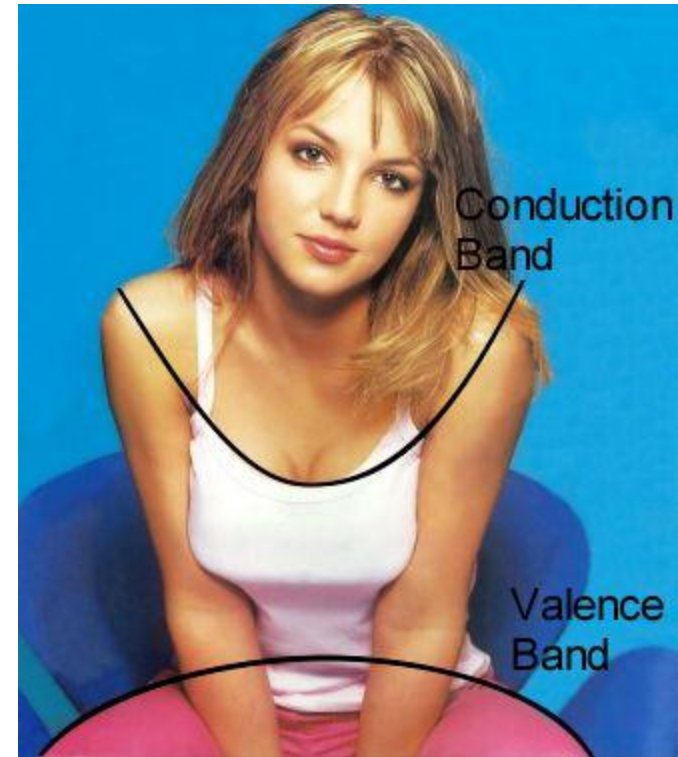
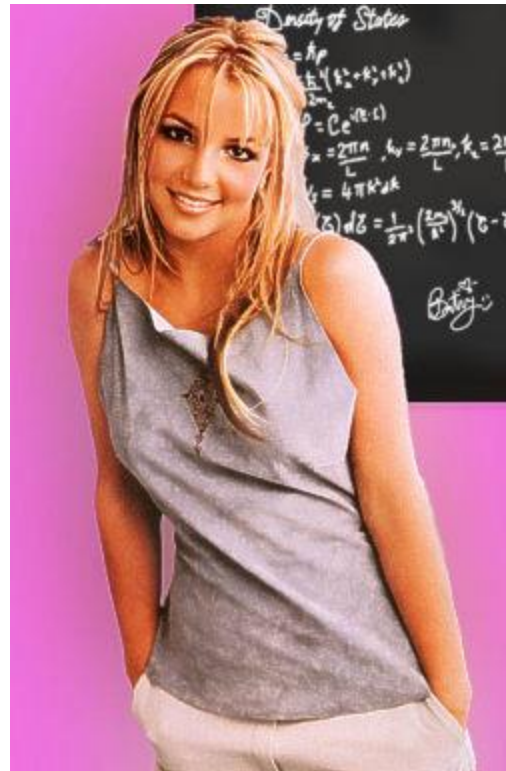
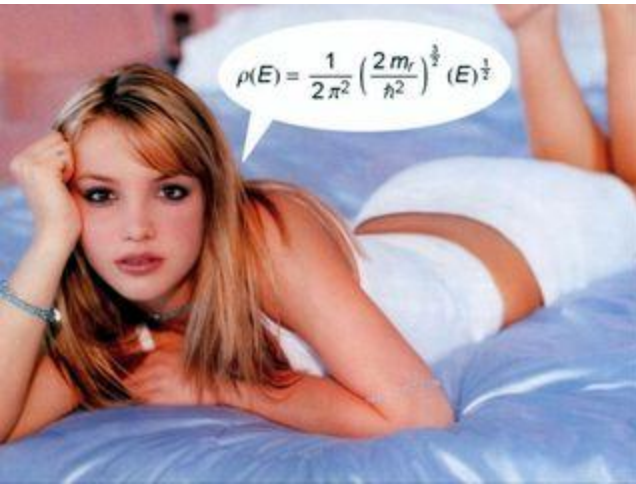
Przestrzenne zmiany przerwy energetycznej  
→ Inżynieria przerwy energetycznej

→ Możliwe ponieważ GaAs i AlAs mają tę samą strukturę krystaliczną i stałą sieci



# Studnie Kwantowe

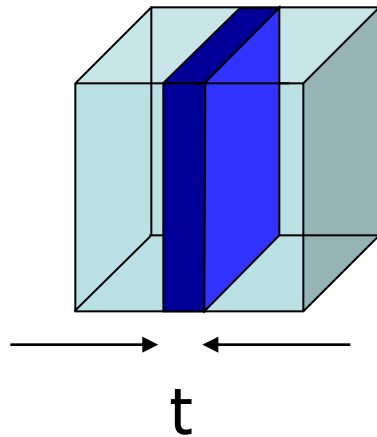
Więcej: <http://britneyspears.ac/lasers.htm>



# Struktury niskowymiarowe

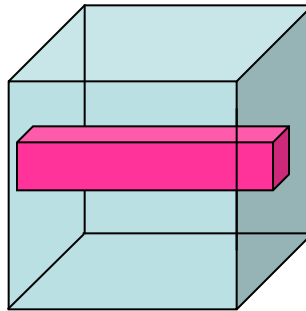
## Low-dimensional Semiconductor Systems

Studnie  
kwantowe



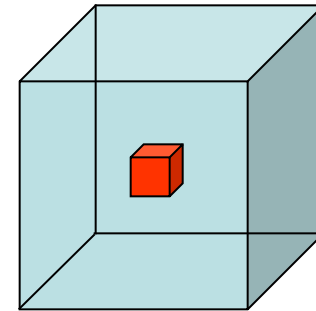
2D

Druty  
kwantowe



1D

Kropki  
kwantowe



“0D”

Dyskretna struktura elektronowa

# Druty

Figure 9 Quantum wire fabrication based on nanoscale etching and re-growth

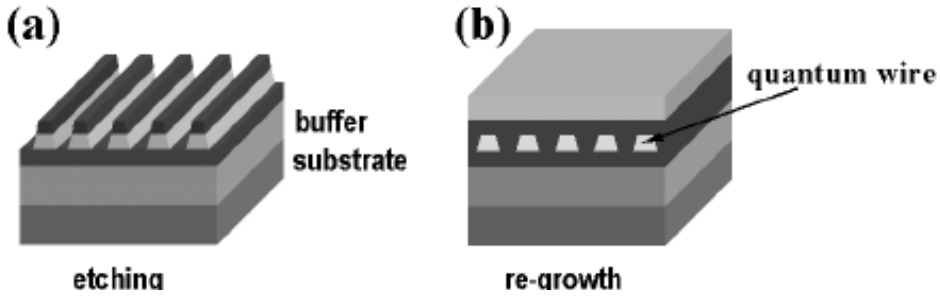


Figure 12 Selective growth of quantum wires on a pre-patterned V-groove substrate

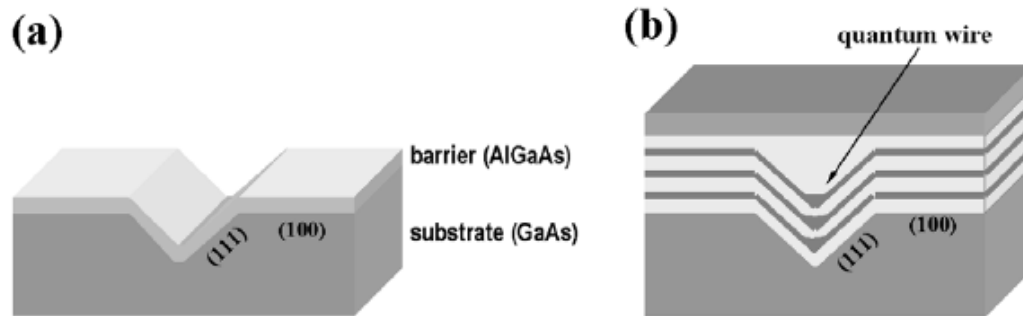
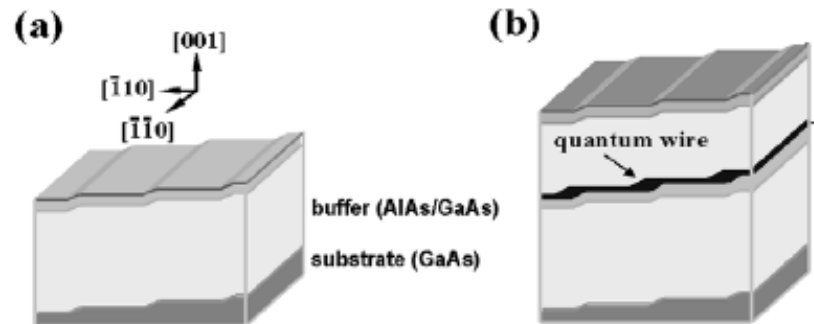
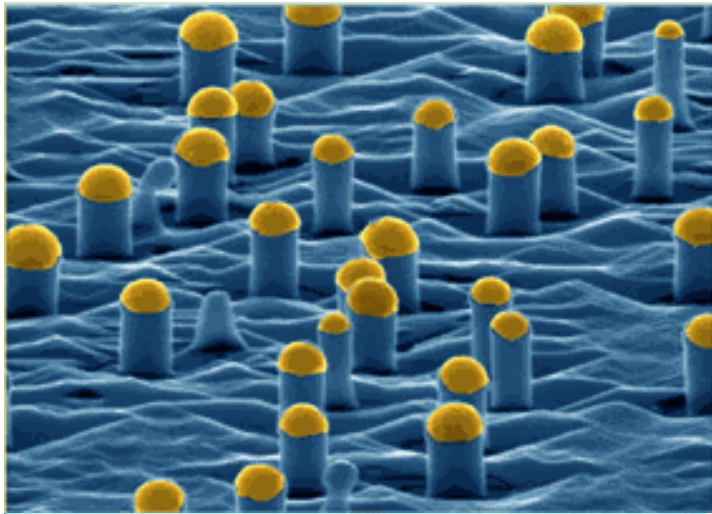


Figure 11 Growth of quantum wires on a vicinal surface with multiaatomic steps



# Druty



2 Au cap on the top of whisker and the interface structure

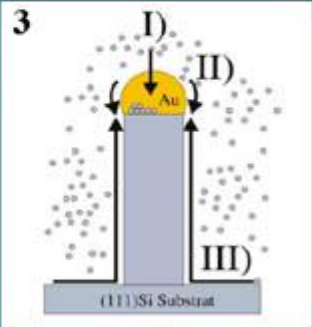
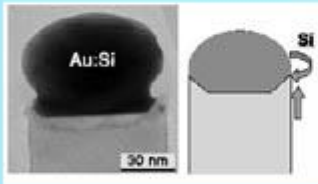
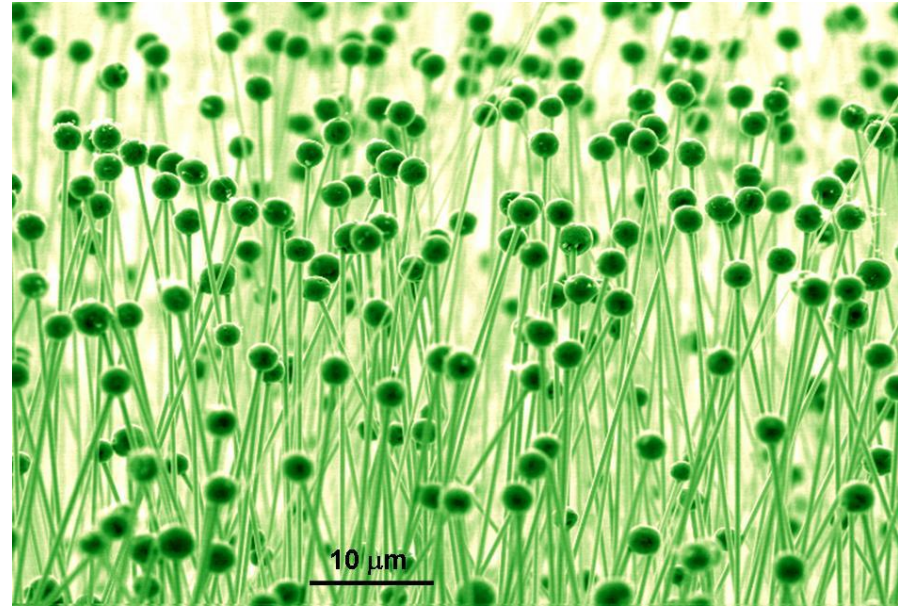
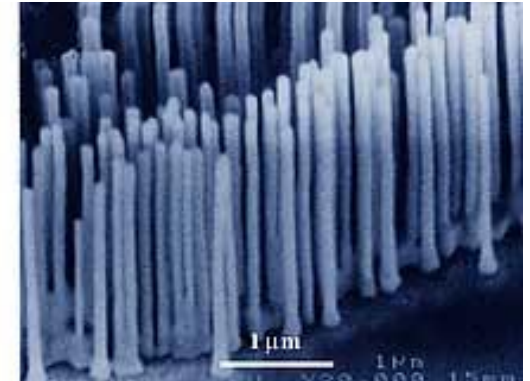
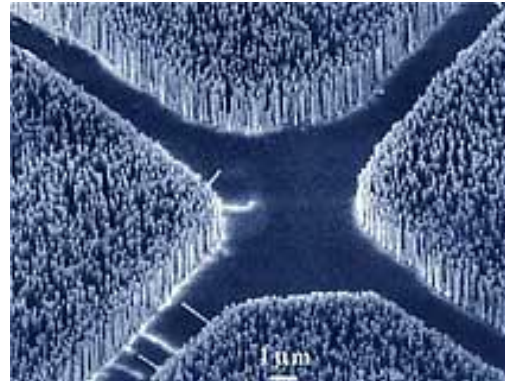


Fig. 3) Growth contains three components: Besides diffusion through the droplet (I) and diffusion on the droplet surface (II), there is a strong surface diffusion component (III) along the whisker. Si material is coming from the surrounding of the whisker.



[www.ece.odu.edu/g\\_seminar.htm](http://www.ece.odu.edu/g_seminar.htm)



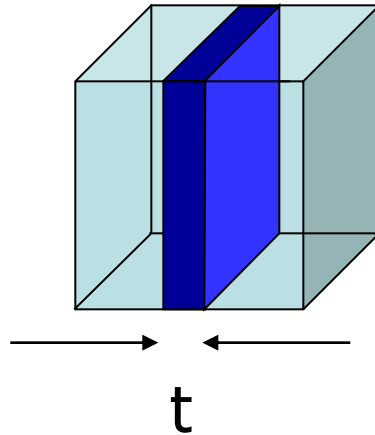
<http://www.mpi-halle.mpg.de/~mbe/>

Photo by Peidong Yang/UC Berkeley, courtesy of Science

# Struktury niskowymiarowe

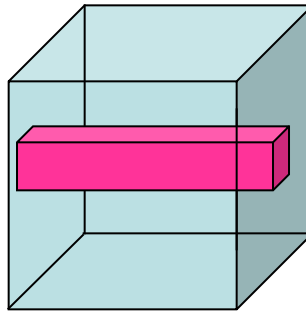
## Low-dimensional Semiconductor Systems

Studnie  
kwantowe



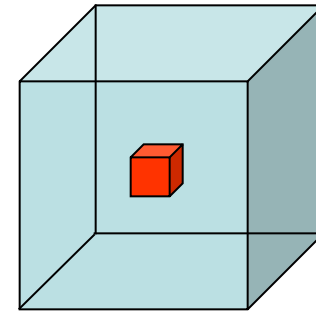
2D

Druty  
kwantowe



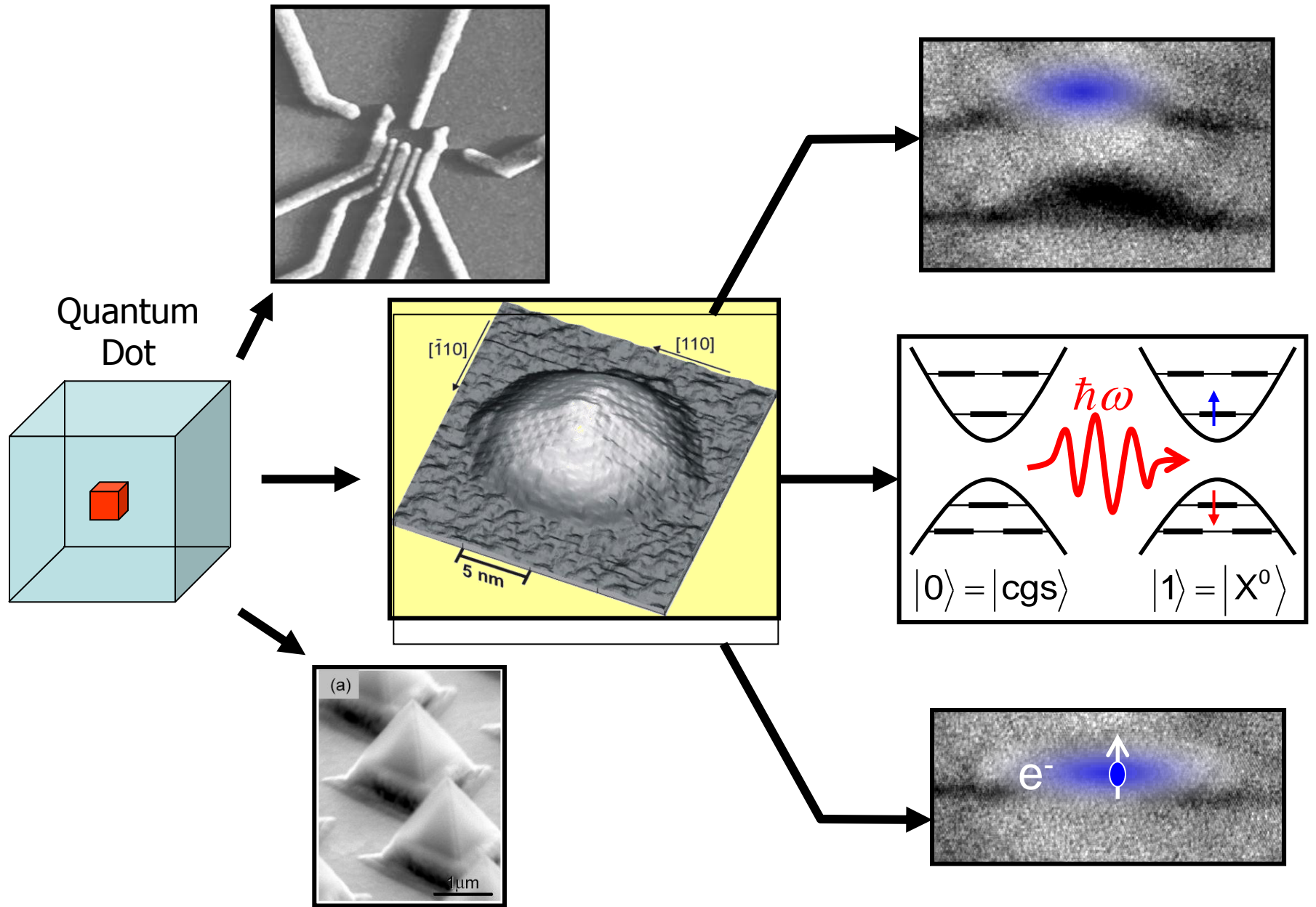
1D

Kropki  
kwantowe



“0D”

Dyskretna struktura elektronowa



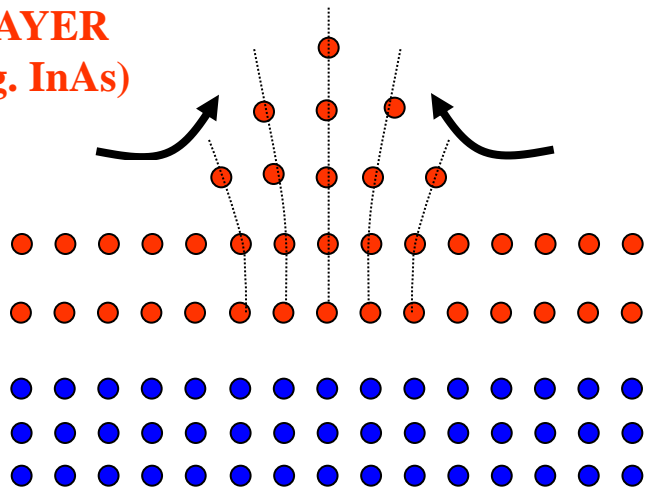
**Hubert J. Krenner**

Walter Schottky Institut and Physik Department E24, TU München



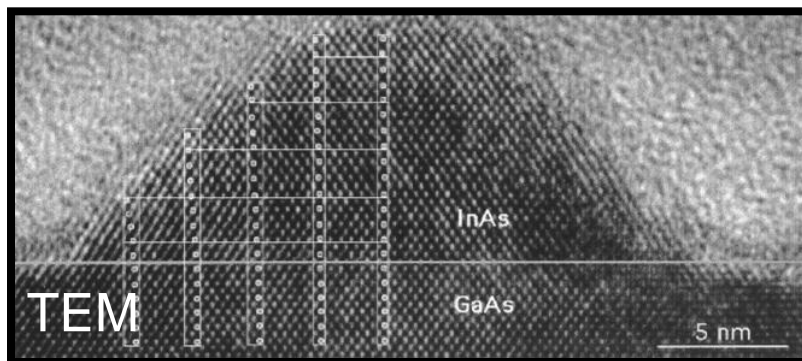
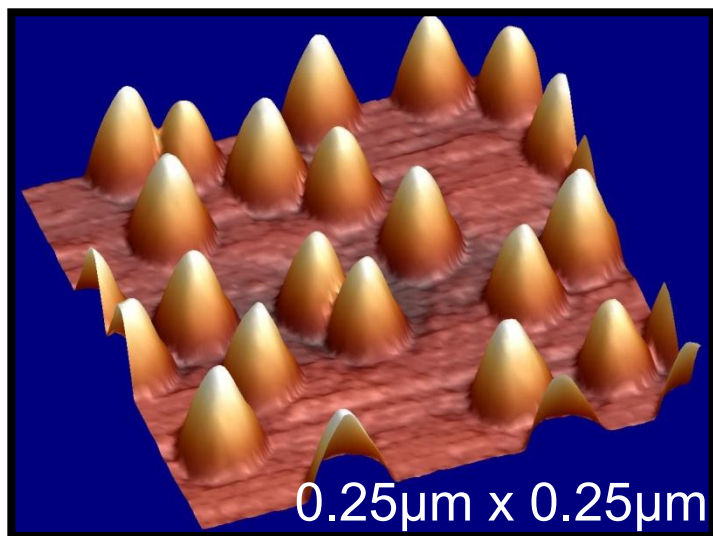
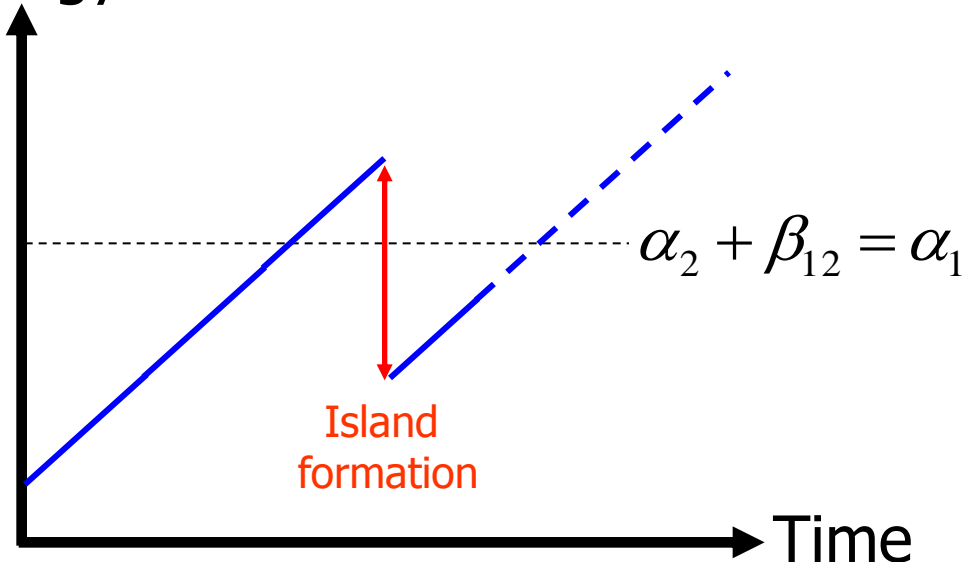
# Wzrost kropek kwantowych

EPITAXIAL  
LAYER  
(e.g. InAs)



SUBSTRATE  
(GaAs)

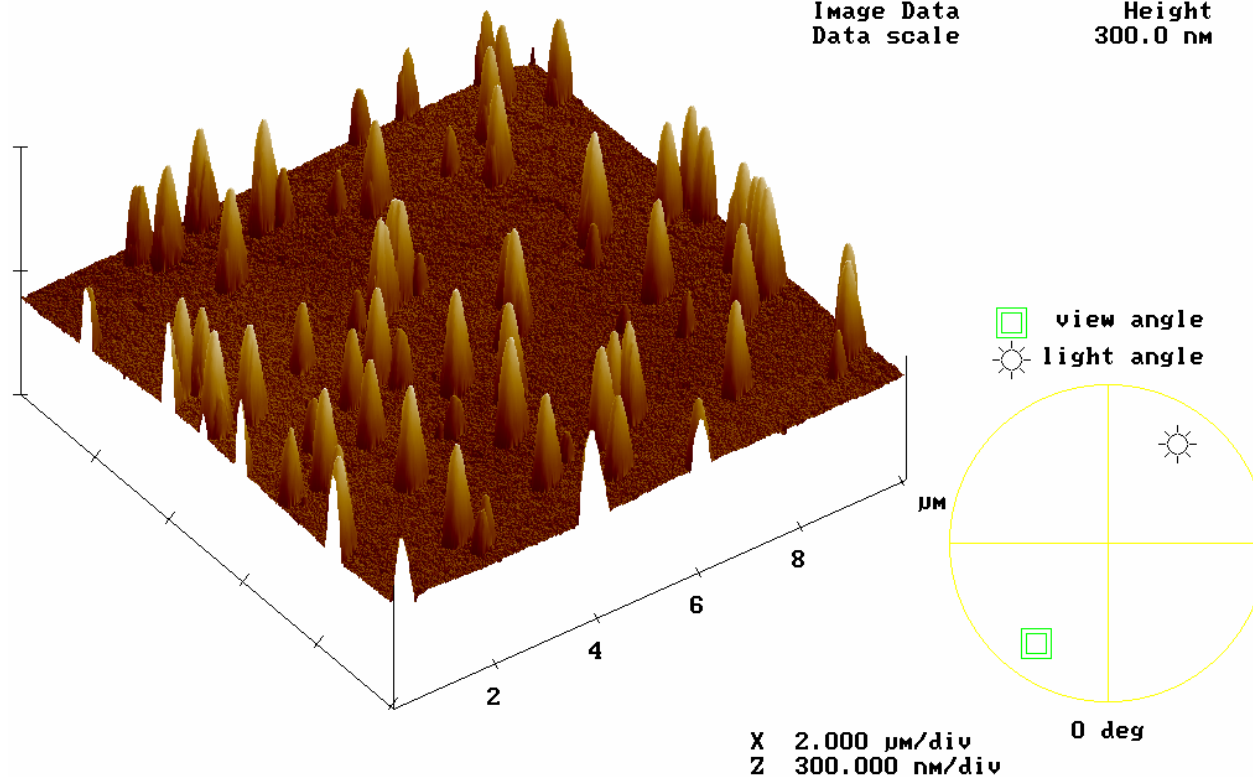
Energy



- Defect-free semiconductor “clusters” on a 2D quantum well wetting layer

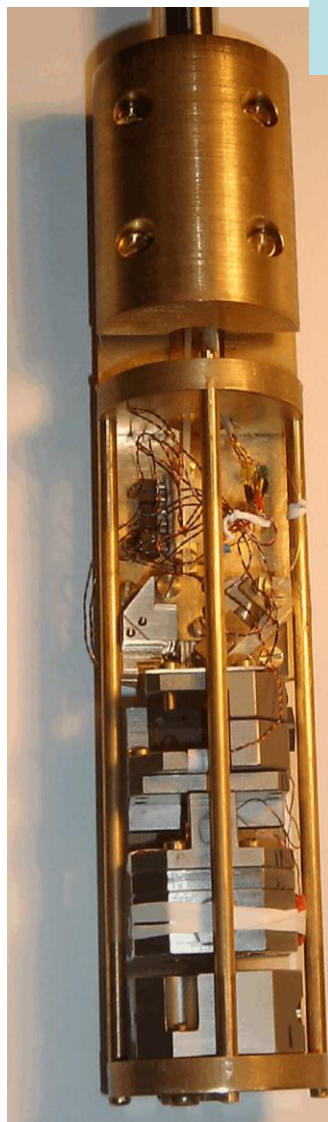
# GaN/AlGaN QD's

Digital Instruments NanoScope  
Scan size 10.00  $\mu\text{m}$   
Scan rate 0.3989 Hz  
Number of samples 512  
Image Data Height  
Data scale 300.0 nm



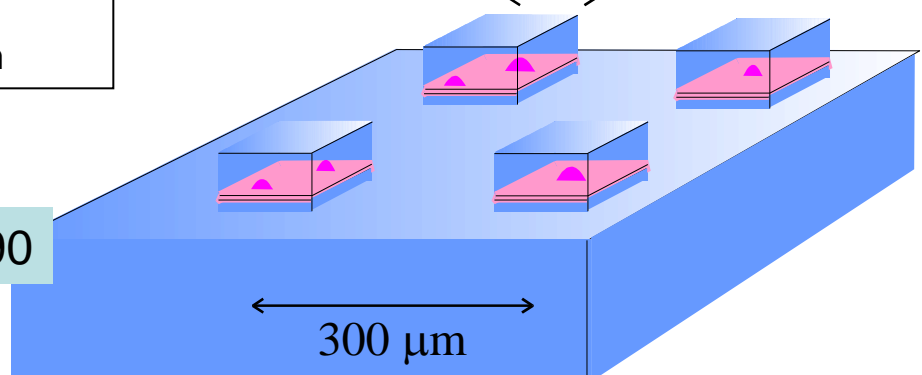
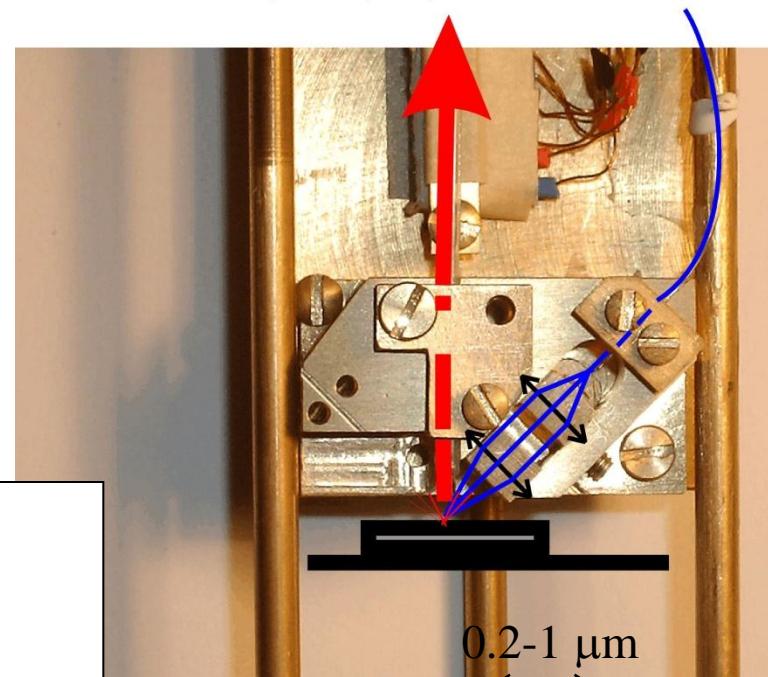
c585.000

# Doświadczenie



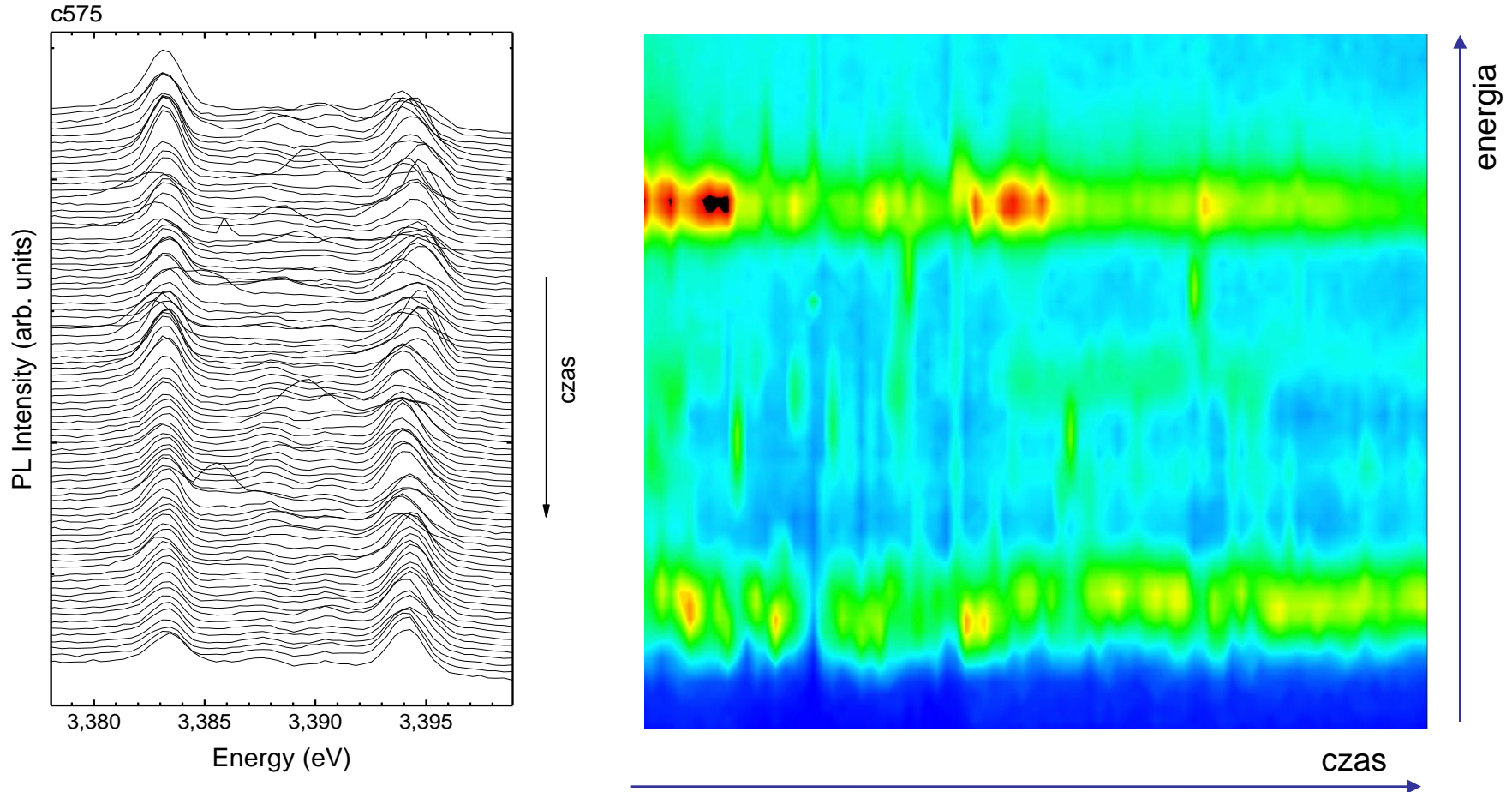
$T=300K$   
 Minimum step  $\sim 50$  nm  
 Maximum step  $\sim 1$   $\mu\text{m}$   
 $T=4.2K$   
 Minimum step  $\sim 5$  nm  
 Maximum step  $\sim 100$  nm

Single mode fiber -  
 mode field diameter  
 Collection (600  $\mu\text{m}$ ) 5.5  $\mu\text{m}$



A.Babinski, et al. Physica E 26 (2005) 190

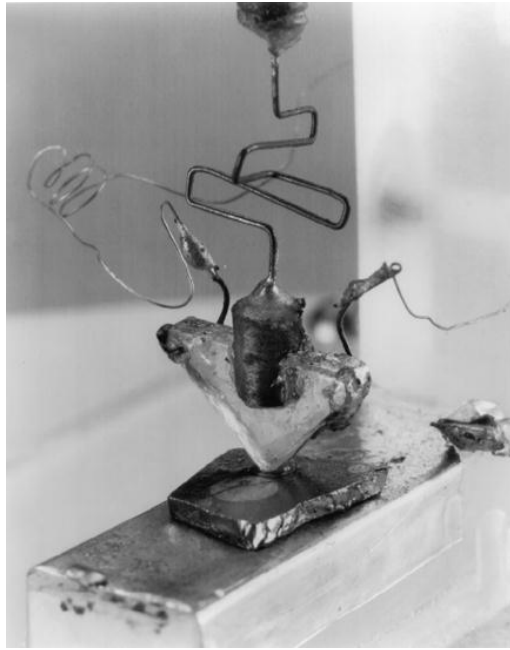
# GaN/AlGaN QD's



$\mu PL$ - Katarzyna Surowiecka et al.

# Trendy – prawo Moore'a: scalaki

# Trochę historii



Bardeen



Brattain

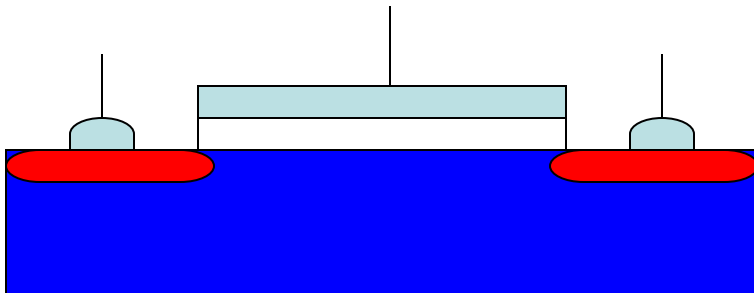
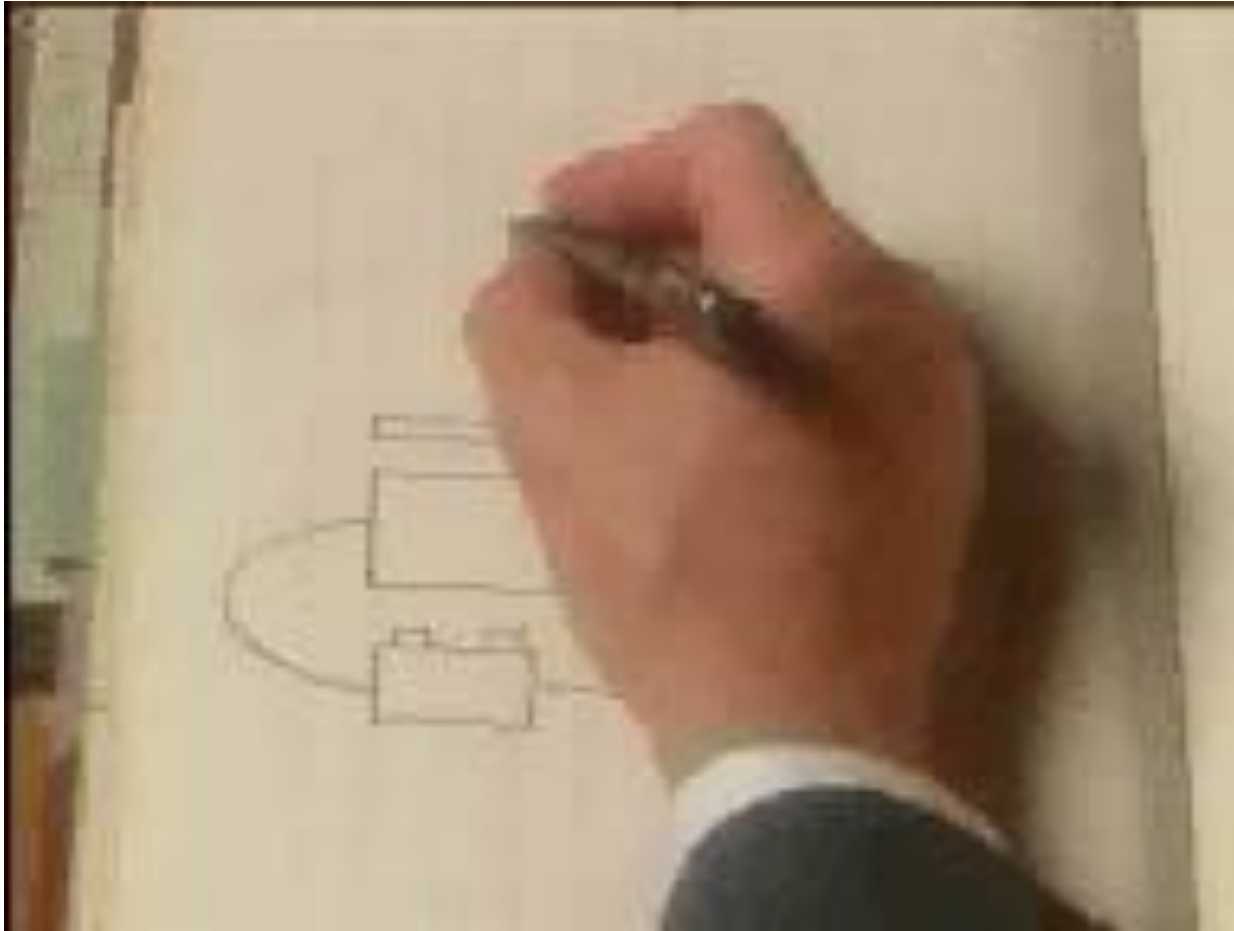


Shockley

1948 – William Shockley, John Bardeen oraz Walter Brattain z Bell Labs wymyślają tranzystor (Nobel 1956)



# Jak działa tranzystor?

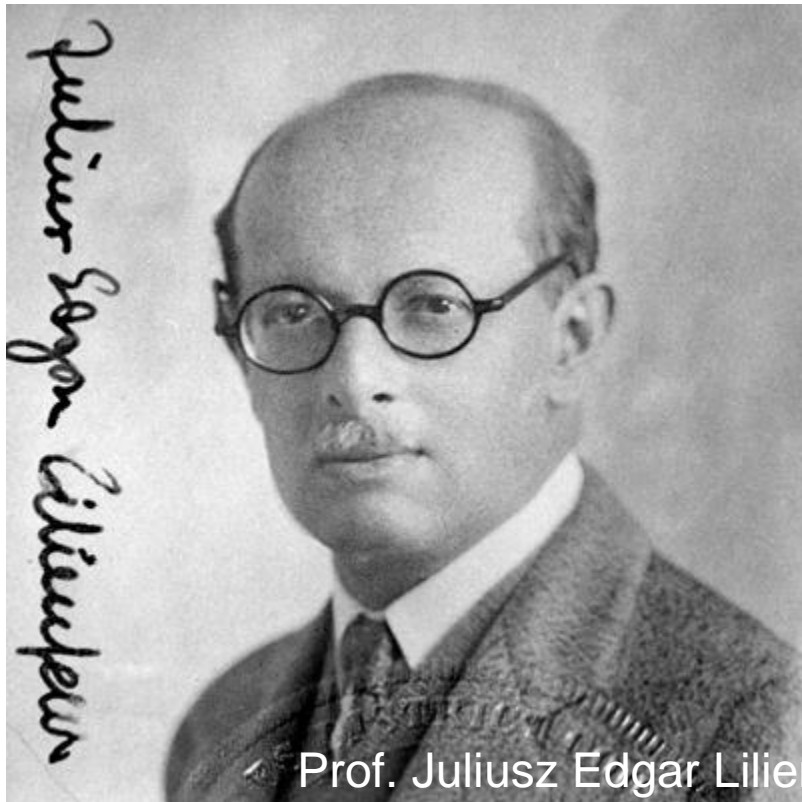


Prof. Juliusz Edgar Lilienfeld  
1925 tranzystor polowy  $\text{Cu}_2\text{S}$  (Lipsk)

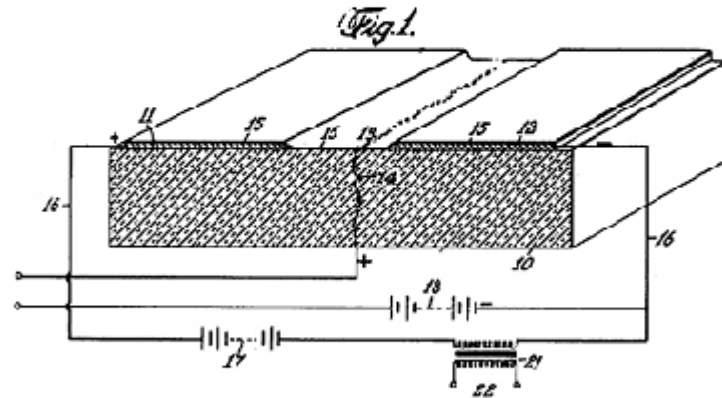
<http://www.pbs.org/transistor/science/events/pointctrans.html>

# Jak działa tranzystor?

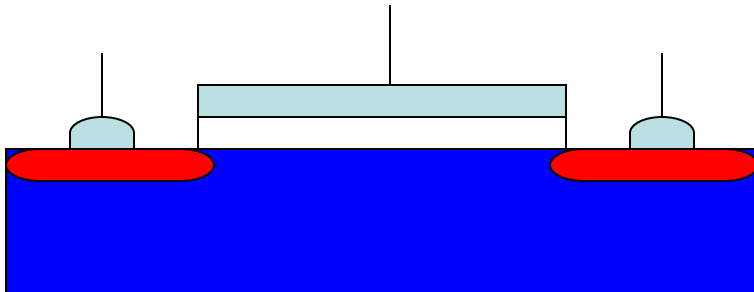
18.04.1881, (Lemberg)- 8.08.1963, (Charlotte Amalie, U.S.A.)



Jan. 28, 1930. J. E. LILIENFELD 1,745,175  
METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS  
Filed Oct. 8, 1926



U.S. Patent 1,745,175 (MESFET)  
U.S. Patent 1,900,018 (MOSFET)

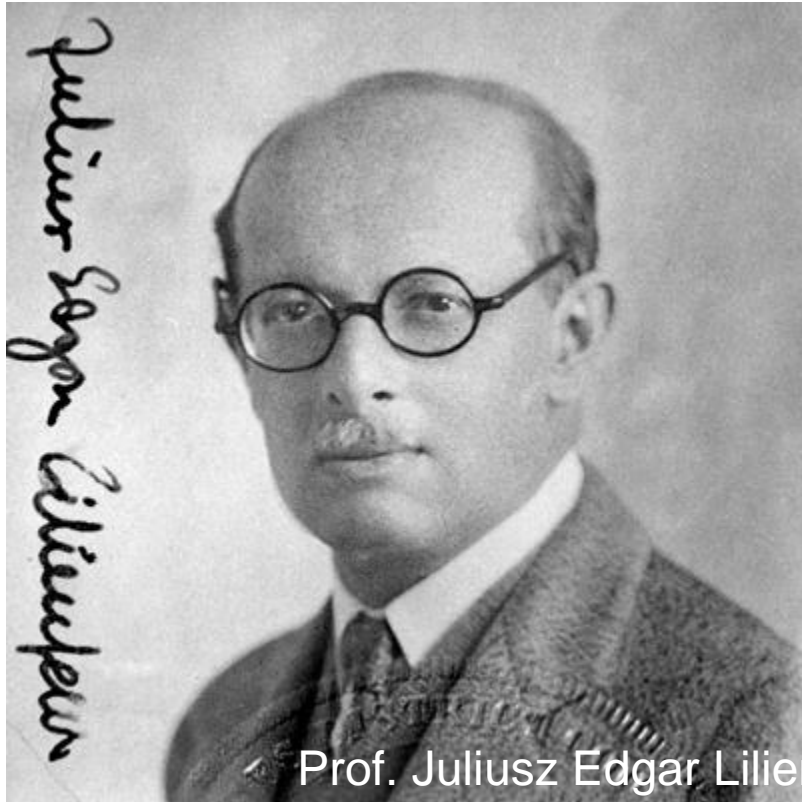


Prof. Julius Edgar Lilienfeld  
1925 tranzystor polowy  $\text{Cu}_2\text{S}$  (Lipsk)

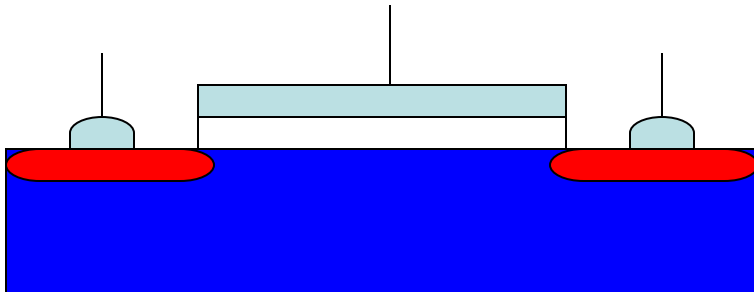


# Jak działa tranzystor?

18.04.1881, (Lemberg)- 8.08.1963, (Charlotte Amalie, U.S.A.)



Prof. Julius Edgar Lilienfeld



March 7, 1933.

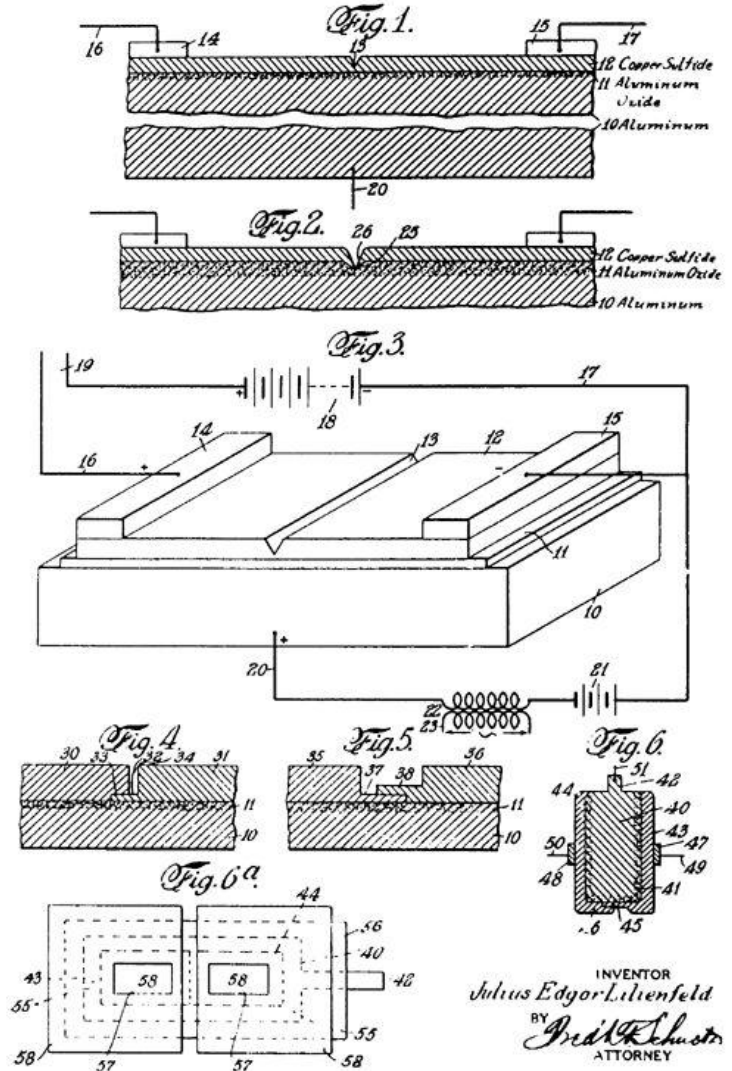
J. E. LILIENFELD

1,900,018

DEVICE FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENT

Filed March 28, 1928

3 Sheets-Sheet 1



INVENTOR  
Julius Edgar Lilienfeld  
BY *Frederick Schuster*  
ATTORNEY

# Trochę historii

**1955 Shockley Semiconductor** – pierwsza firma w Palo Alto (krzemowej dolinie)

## Rok 1956

IBM tworzy pierwszy dysk twardy - RAMAC 350. Jego pojemność to 5MB, natomiast cena - milion dolarów.

W laboratoriach MIT ukończony zostaje pierwszy komputer tranzystorowy.

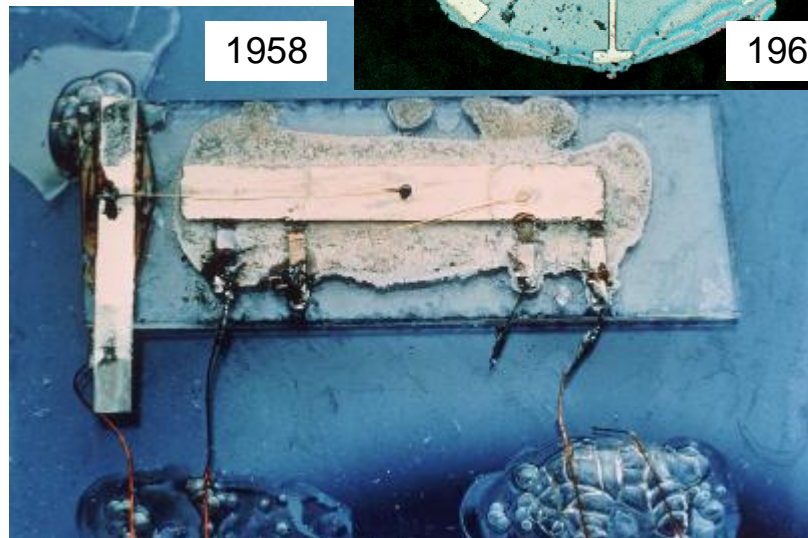
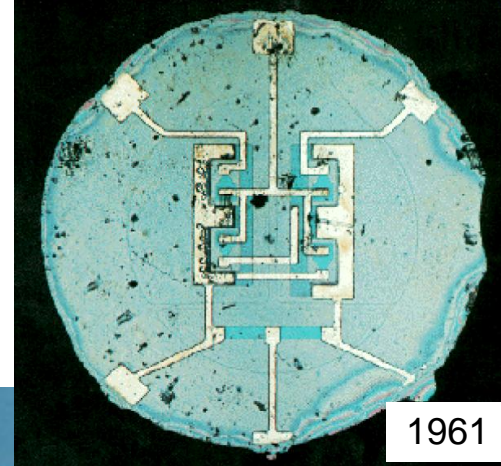
A. Newell, D. Shaw i F. Simon wynajdują IPL (Information Processing Language - język przetwarzania informacji).

**1957 Fairchild Semiconductor** – na skutek nieporozumień z Shockleyem odchodzą z firmy: Julius Blank, Victor Grinich, Gordon E. Moore, Robert W. Noyce, Jean Hoerni, Gene Kleiner, Jay Last, Sheldon Roberts („zdradziecka 8-ka”).

Ken Olsen i Harlan Anderson zakładają firmę DEC (Digital Equipment Corporation).

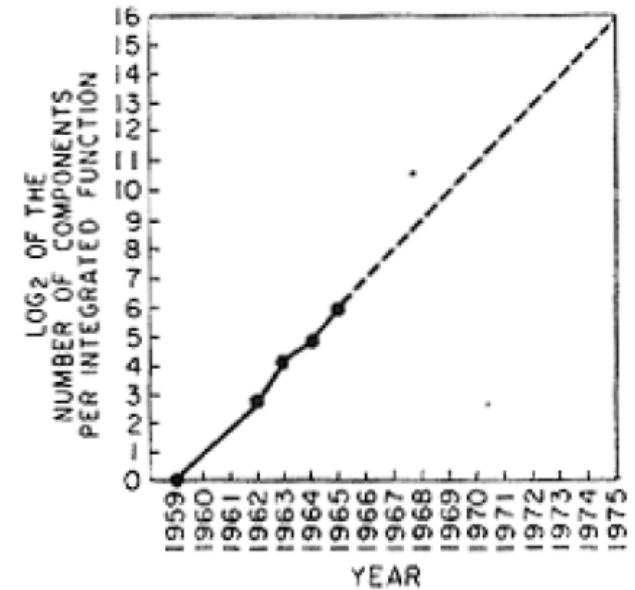
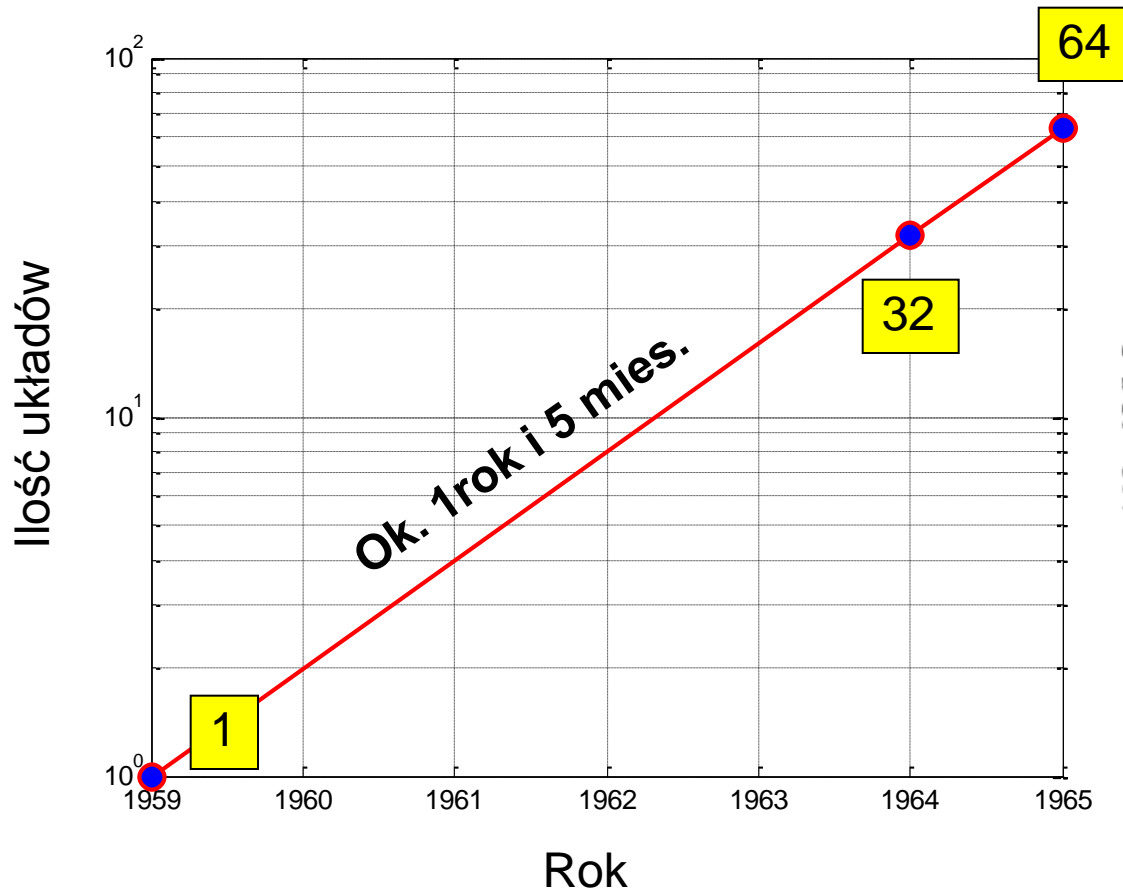
Oficjalnie opublikowany zostaje język FORTRAN-1, stworzony przez Johna Backusa i jego współpracowników z IBM. FORTRAN używa zapisu podobnego do tego z algebry. Dlatego też język ten stanie się popularny, szczególnie wśród naukowców i techników.

**1958** Pierwszy układ scalony (IC – Integrated Circuit) wykonany przez Jack Kilby na germanie w **Texas Instruments** (2000 Nagroda Nobla z fizyki). Niezależnie Robert Noyce (**Fairchild**) zbudował IC na krzemie.



# Prawo Moore'a

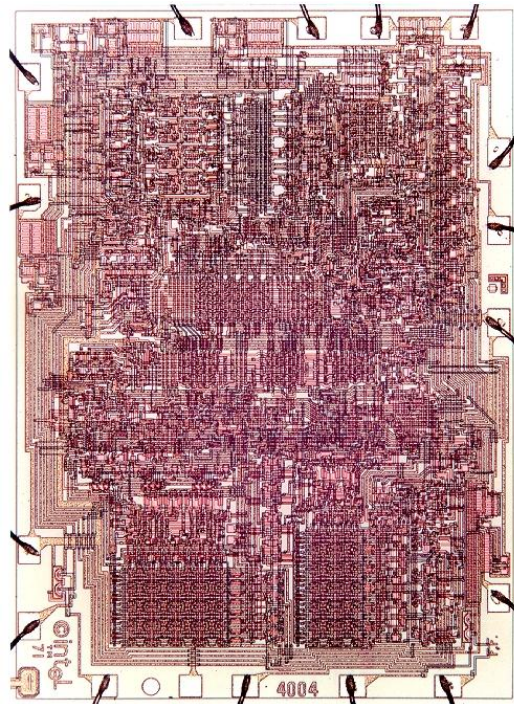
"The complexity for minimum component costs has increased at a rate of roughly a factor of two per year. Certainly over the short term this rate can be expected to continue, if not to increase. Over the longer term, the rate of increase is a bit more uncertain, although there is no reason to believe it will remain nearly constant for at least 10 years." (Moore, *Electronics* 1965)



# Trochę historii

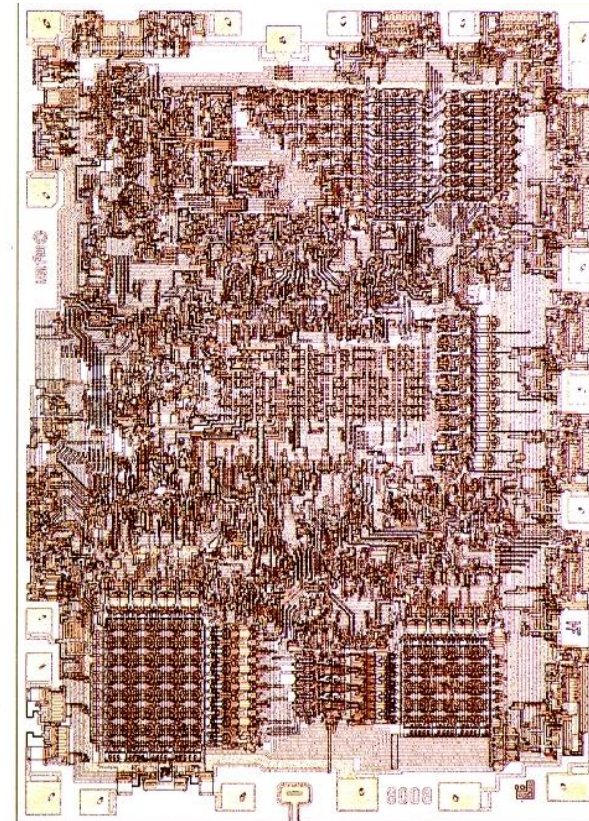
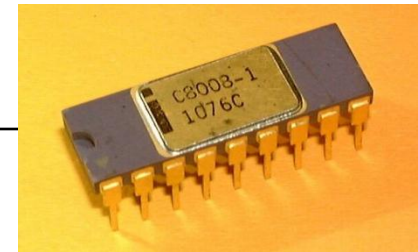
18 lipca **1968** Gordon E. Moore i Robert W. Noyce założyli w kalifornijskim Mountain View w hrabstwie Santa Clara (zaledwie kilka mil od Palo Alto), firmę N M Electronics, wkrótce przemianowaną na Intel (Intel = Integrated Electronics).

1969 r. Intel Corporation dostaje zamówienie na układ do japońskiego kalkulatora...



## i4004

Data wprowadzenia: 1971  
Ilość tranzystorów: 23 000  
Technologia: 1 μm, PMOS  
Wielkość płytki krzemu: 19 mm<sup>2</sup>  
Szybkość pracy Taktowanie rdzenia proc.: 0.1 MHz (0.06 MIPS)  
Szerokość magistrali danych (wewn./zewn.): 1 bit  
Szerokość magistrali adresowej: 12 bitów



## i8008

Data wprowadzenia: kwiecień 1972  
Ilość tranzystorów: 3 500  
Technologia: 10 μm, PMOS  
Wielkość płytki krzemu: 19 mm<sup>2</sup>  
Szybkość pracy Taktowanie rdzenia proc.: 200 kHz (0.06 MIPS), magistrali sys.: 200 kHz  
Szerokość magistrali danych (wewn./zewn.): **8 bitów**  
Szerokość magistrali adresowej: 14 bitów



# Trochę historii



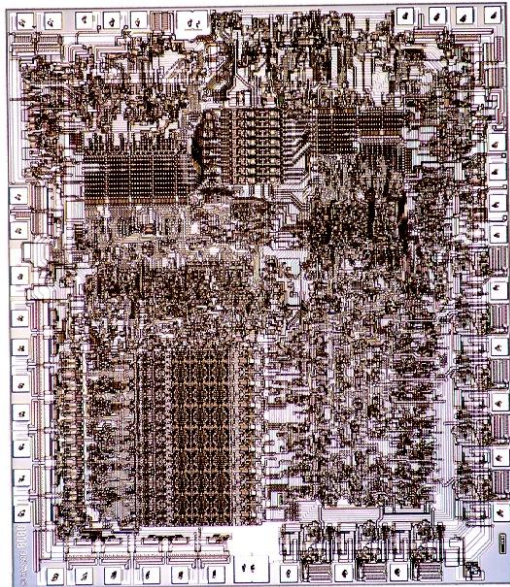
1975 Altair (i jego klony)

procesor Intel 8080

Bill Gates i Paul Allen piszą wersję BASICa na Altair



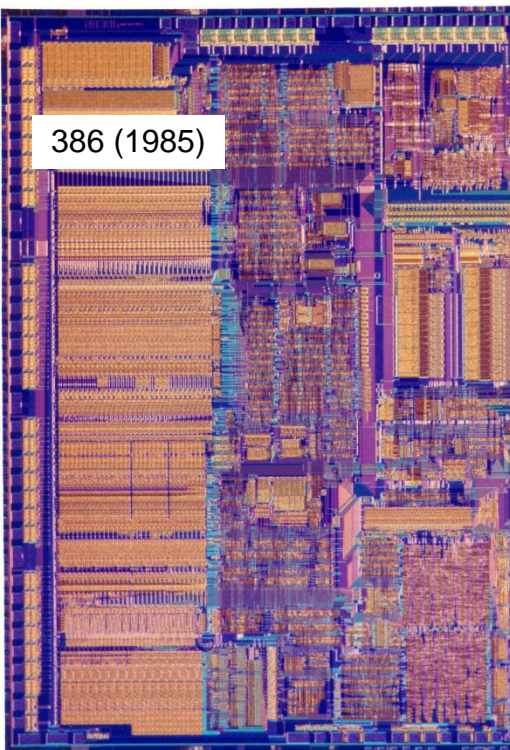
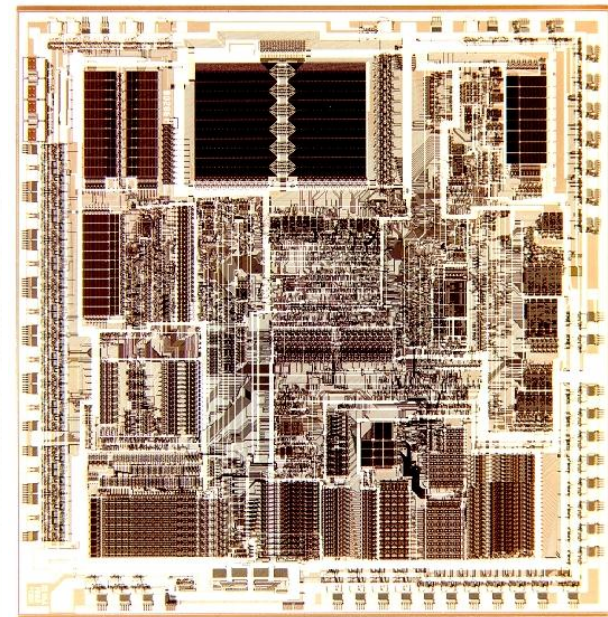
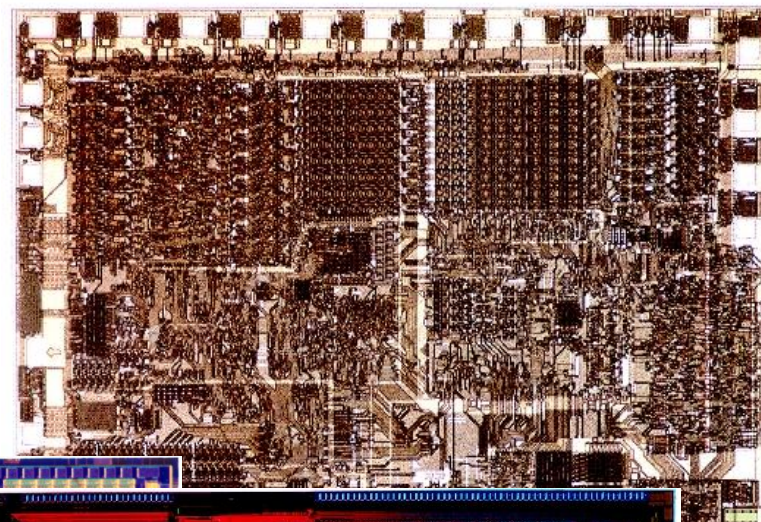
A gdzie jest ekran i klawiatura?



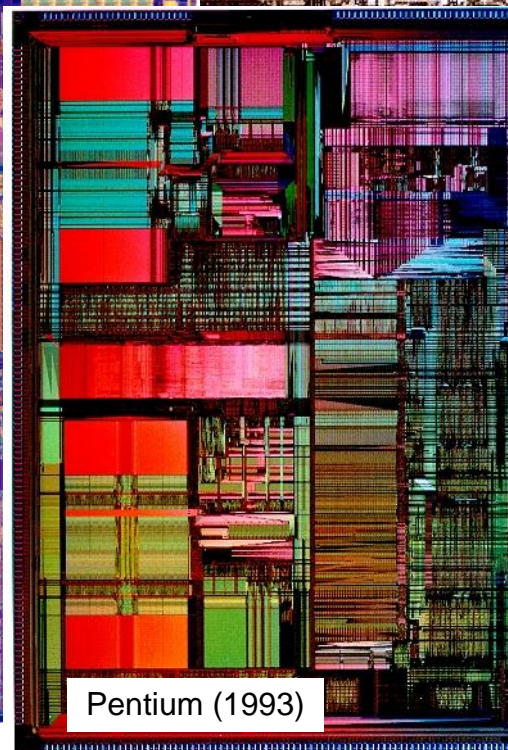
i8080 (1974)

286 (1982)

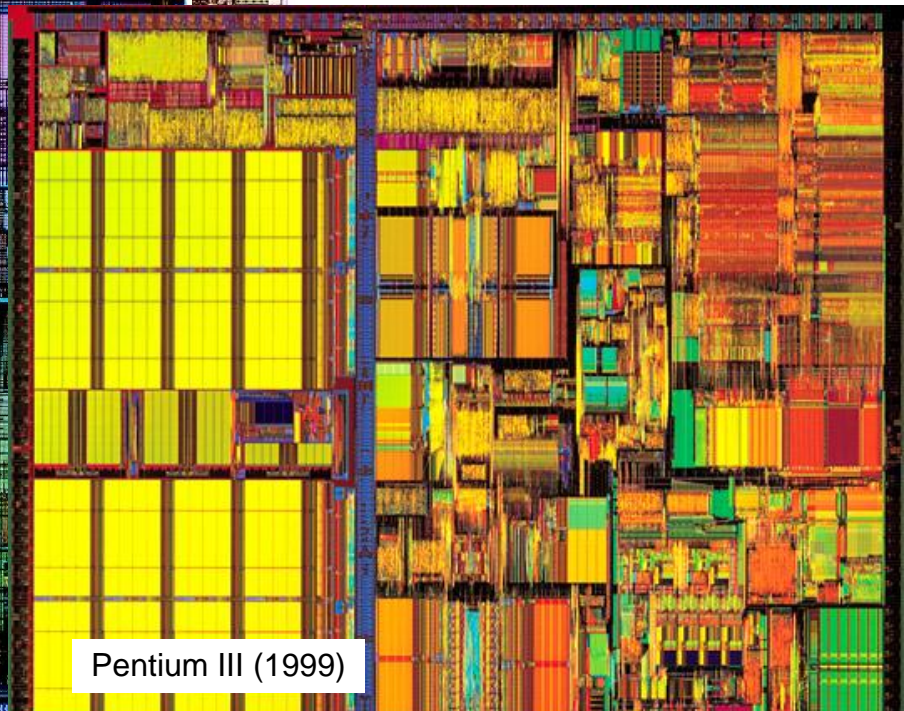
i8088 (1978) IBM PC



386 (1985)

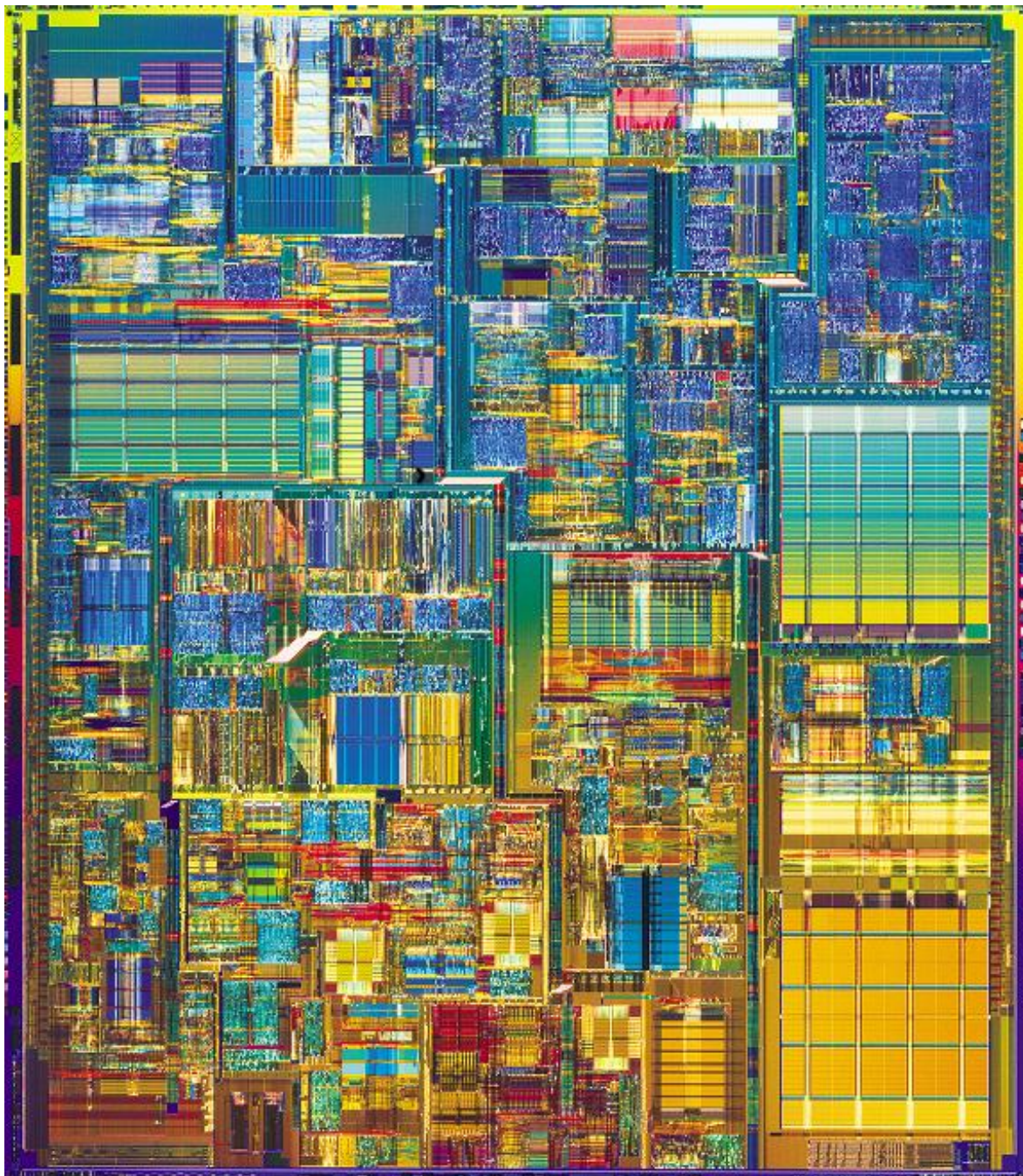


Pentium (1993)



Pentium III (1999)

Źródło: Intel



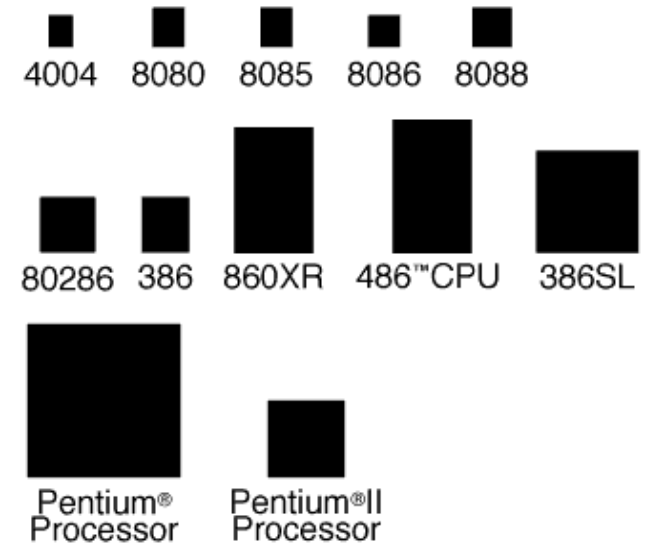
## Pentium 4 (2000)

42 000 000 tranzystorów  
technologia 0.18 mikrona.

Zegar 1.5 GHz

6 warstw

### Rozmiar procesorów Intel (w skali)



# TRENDY: Pierwsze Prawo Moore'a

The screenshot shows a Mozilla Firefox browser window with the following details:

- Title Bar:** Intel - granica 1 mld tranzystorów przekroczone - Mozilla Firefox
- Address Bar:** http://gospodarka.gazeta.pl/gospodarka/1,60070,2973049.html
- Navigation:** Back, Forward, Reload, Home, Stop, Search buttons.
- Toolbar:** Rozpocznij przygodę..., Aktualności, onet Słownik Ang., onet Słownik Fra., DNA Langue française le..., GW: Wiadomości, INTERIA.PL - Fakty, + Ogłoszenia Aaby.pl, Gazeta Wyborcza.
- Page Header:** gazeta.pl | Blogi Forum Poczta Randki | + Ogłoszenia Aaby.pl | Gazeta Wyborcza
- Page Content:**
  - Navigation:** Gospodarka, Firma, Gielda, Waluty, Pieniądze, Centrum Finansowe
  - Breadcrumbs:** Gazeta.pl > Gospodarka > IDG
  - Date:** Wtorek, 18 października 2005
  - Search:**  SZUKAJ
  - Article Title:** Intel - granica 1 mld tranzystorów przekroczone
  - Source:** NetWorld 18-10-2005, ostatnia aktualizacja
  - Text:**

**Intel zaczął dostarczać wybranym klientom pierwsze dwurdzeniowe układy Itanium 2 noszące nazwę kodową Montecito, które zawierają ponad miliard tranzystorów. Oznacza to, że jesteśmy świadkami przekroczenia kolejnego progu w dziedzinie technologii produkcji układów scalonych.**

Intel zapowiadał już w 2002 roku, że pracuje nad układem CPU zawierającym ponad miliard tranzystorów. Warto przypomnieć, że układ Itanium 2 noszący nazwę kodową Madison zawiera 500 mln tranzystorów.

Kolejną ważną cechą układu Montecito jest to, że każdy rdzeń dysponuje swoim własnym buforem na dane. Dlatego układ ma duże rozmiary (ok. 580 milimetrów kwadratowych). Układy Itanium drugiej generacji, produkowane w 2002 roku, miały powierzchnię 400 do 450 milimetrów kwadratowych.

Intel zwiększał przez ostatnie 20 lat sukcesywnie liczbę tranzystorów zagnieżdżanych na układach scalonych. Układ 386, którego produkcję uruchomiono w 1985 roku, miał 275 tys. Tranzystorów. Liczba jednego miliona tranzystorów została przekroczona w 1989 roku, z chwilą podjęcia produkcji układu 486.

Kolejne rekordy padły w 1993 roku (układ Pentium; trzy mln tranzystorów) i następnie w 2002 roku (Pentium 4,42 mln tranzystorów). Pierwszy układ Itanium 2 (2002 rok) zawierał 220 mln tranzystorów.
  - Author:** Janusz Chustecki



# Nanotechnologia

## Core i7-9xx Extreme Edition (2009)

800 000 000 tranzystorów, 2, 4, 8 rdzeni

technologia 45 nm – 32 nm

Zegar max 3,33 GHz

9 warstw

Moc ok. 65 W



## AMD Athlon II X2 B24 (2009)

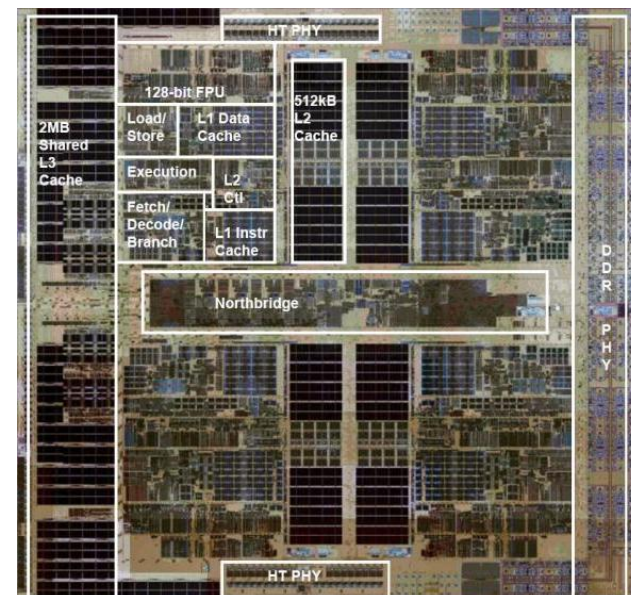
450 000 000 tranzystorów; 2,3,4 rdzenie

technologia 45 nm.

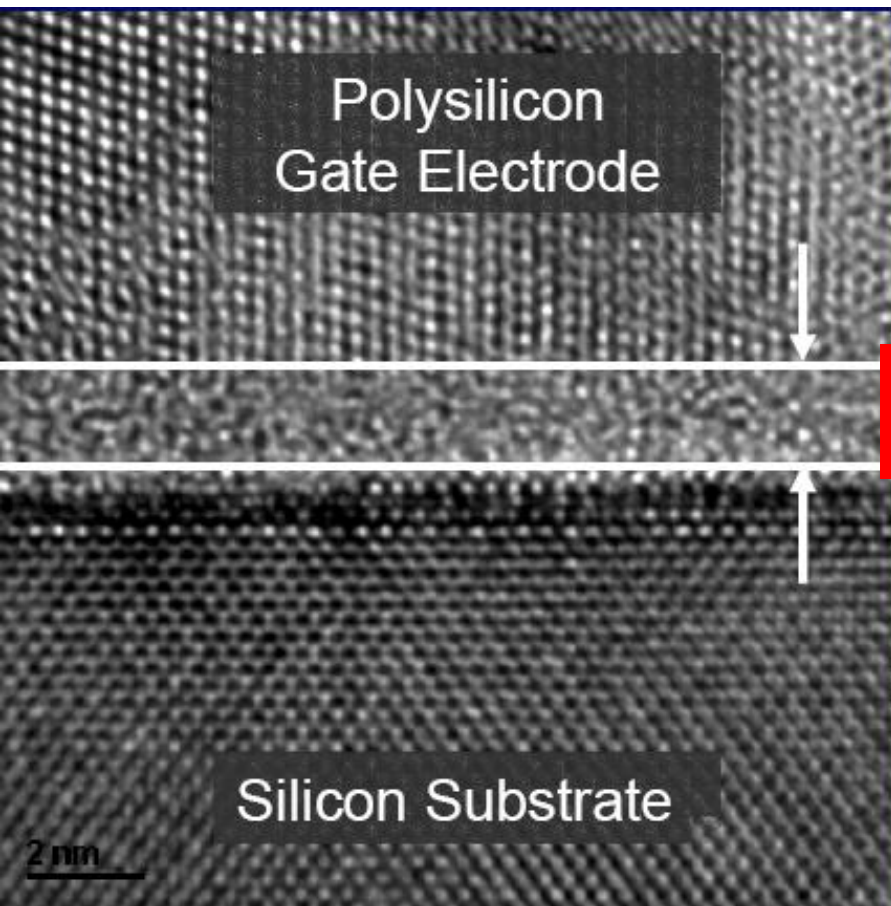
Zegar max 2,8 – 3,1 GHz

11 warstw

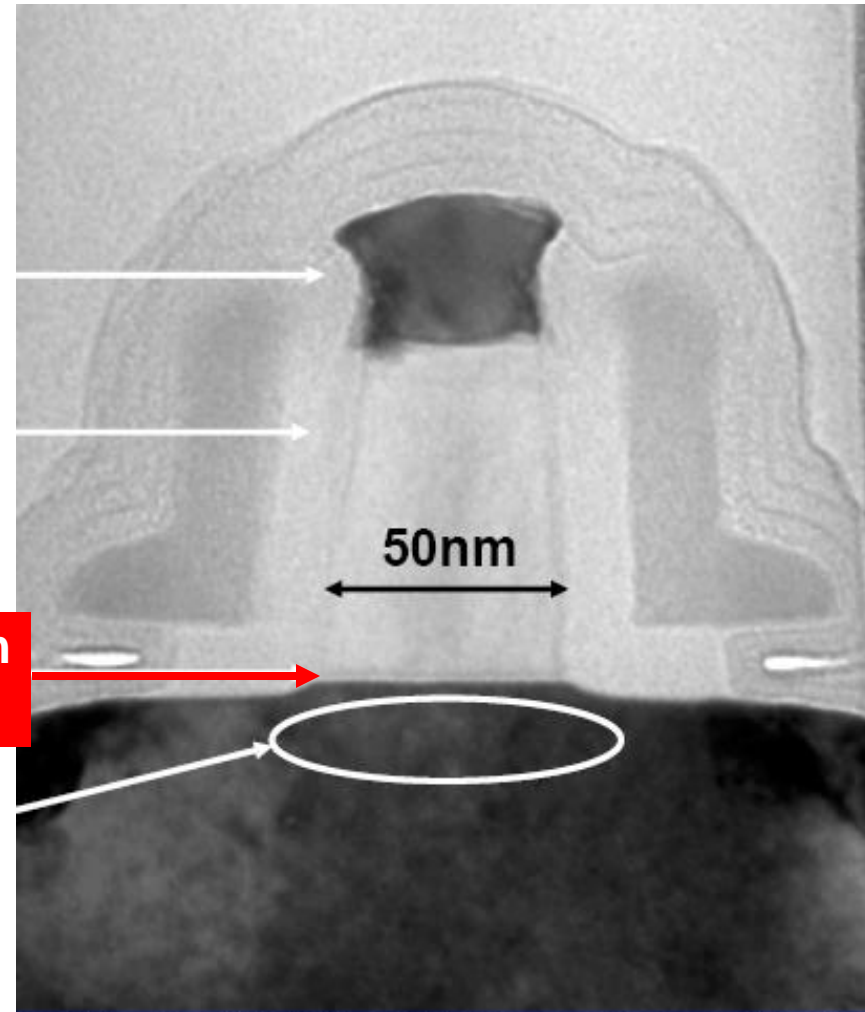
Moc 65 W -140 W



# Nanotechnology



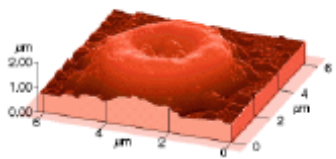
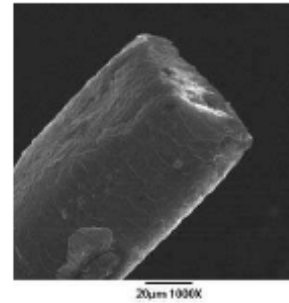
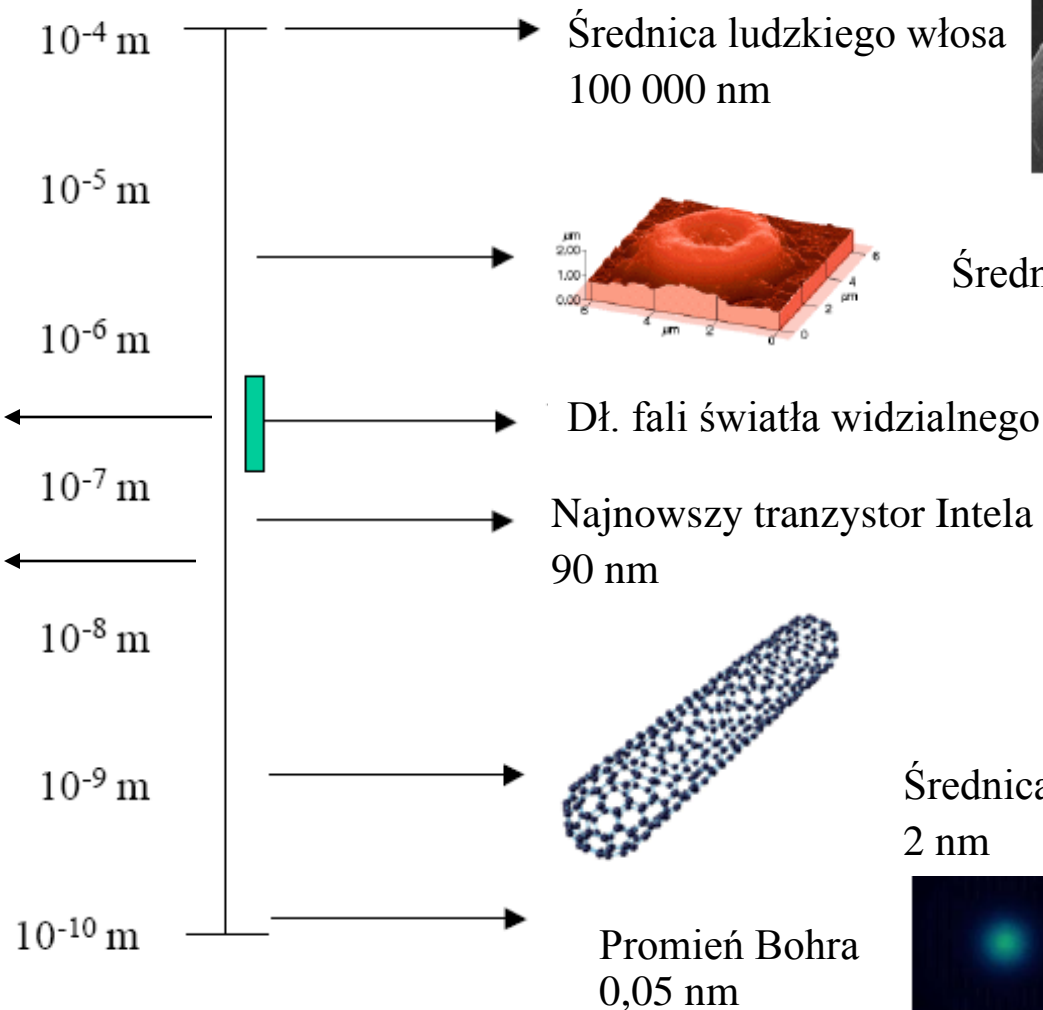
1.2 nm  
 $\text{SiO}_2$



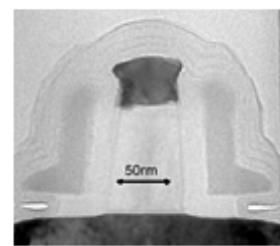
50 nm generation transistor (Intel 2003)

# Nanotechnologia

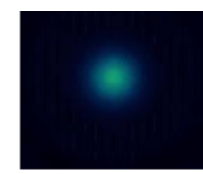
## Rozmiary



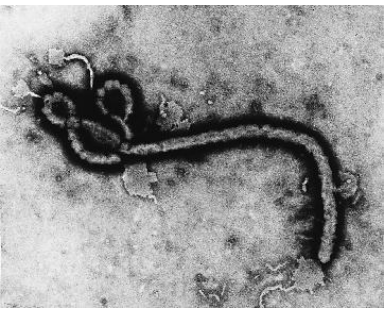
Średnica krwinki czerwonej



Średnica DNA, nanorurek  
2 nm



Wirus Ebola 600 nm



Rhinowirus 30 nm

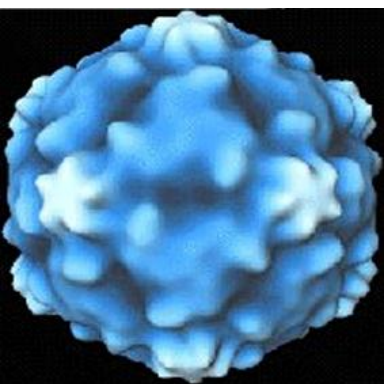
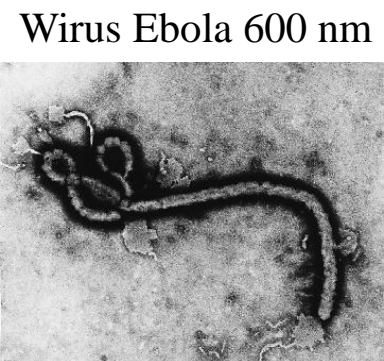
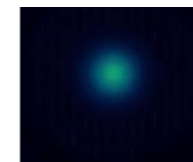
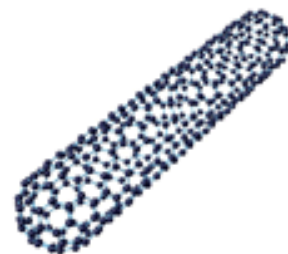
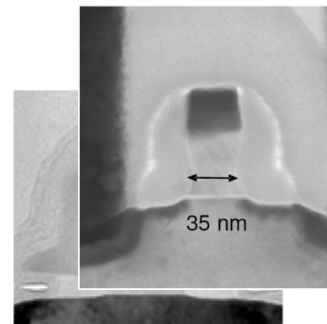
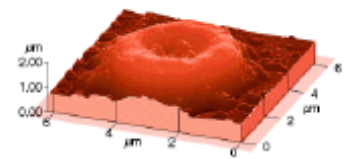
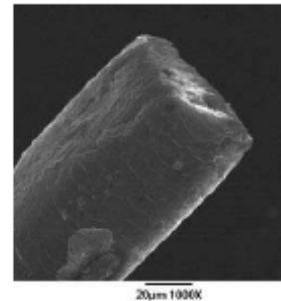
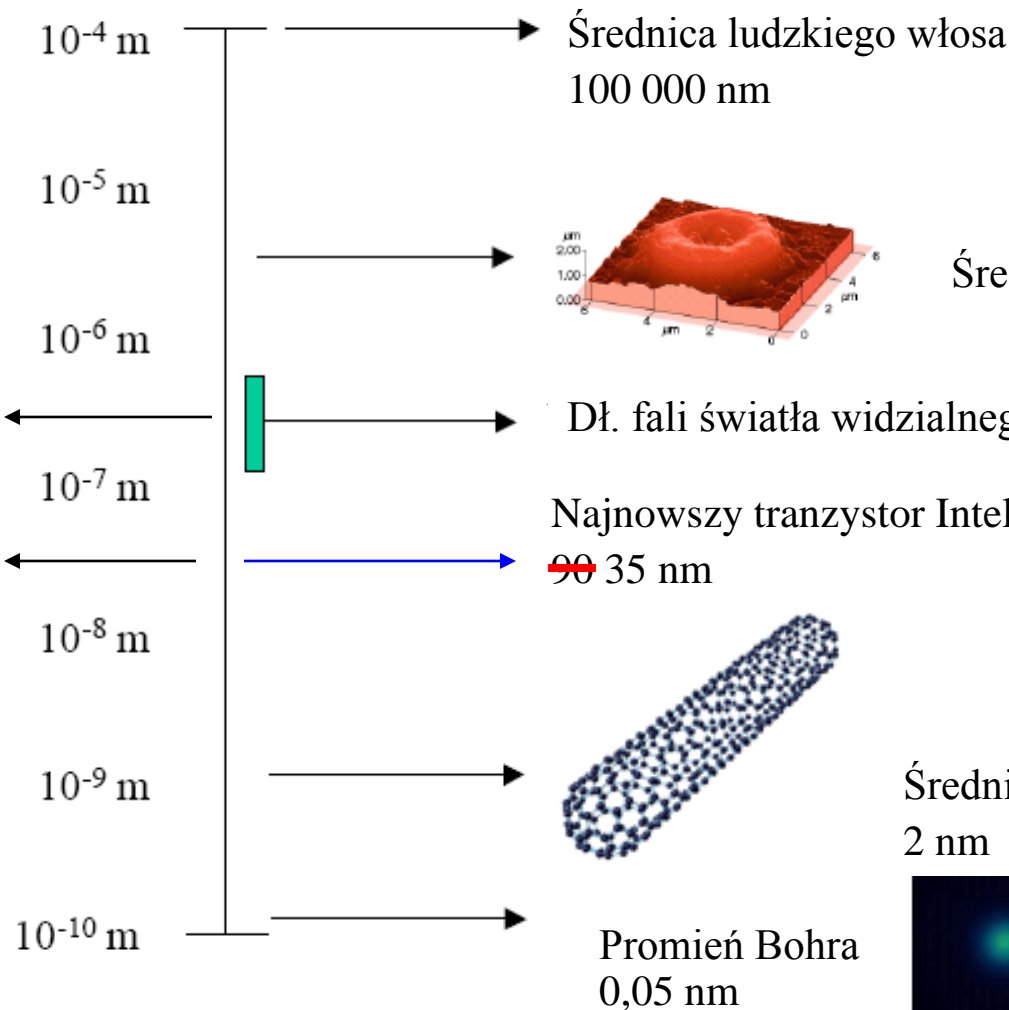


Hair image from Patterns in Nature site at LSU; blood cell from osmosis webpage at Maricopa.edu

Ebola <http://www.brettrussell.com/personal/ebola.html>

# Nanotechnologia

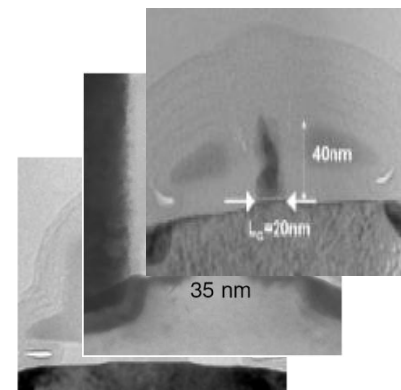
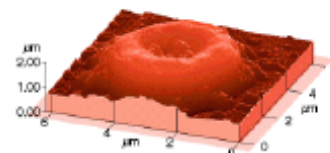
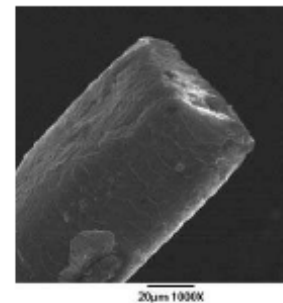
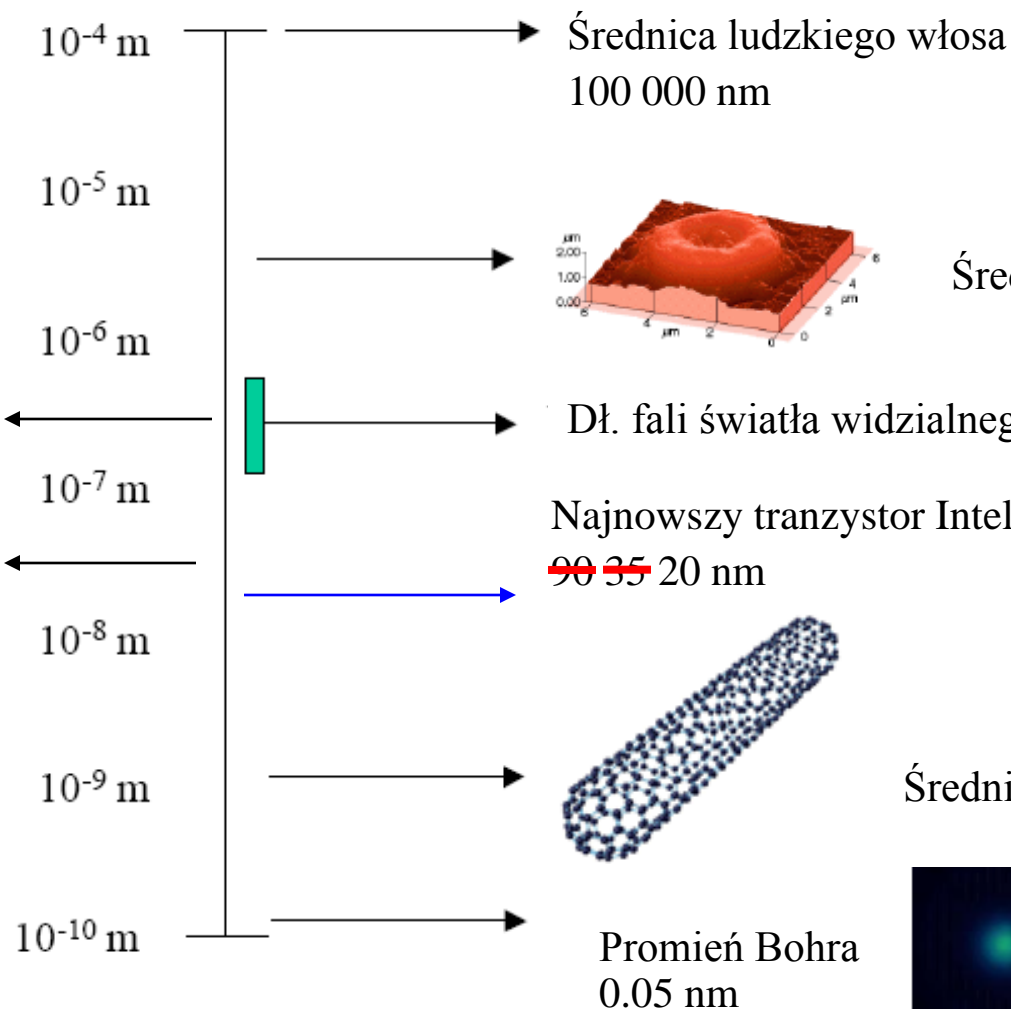
## Rozmiary



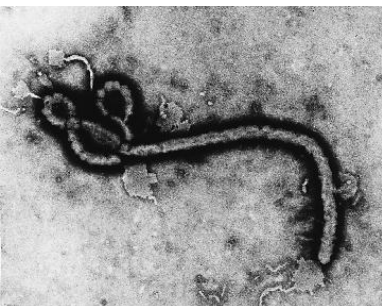
Hair image from Patterns in Nature site at LSU; blood cell from osmosis webpage at Maricopa.edu  
 Ebola <http://www.brettrussell.com/personal/ebola.html>

# Nanotechnologia

## Rozmiary



Wirus Ebola 600 nm



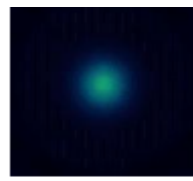
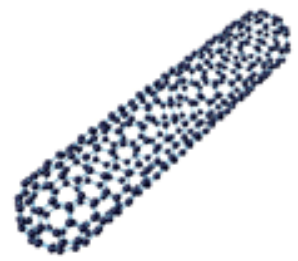
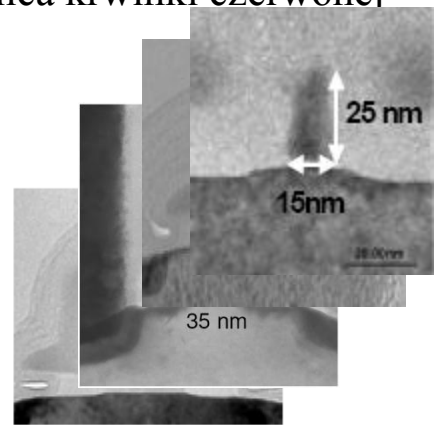
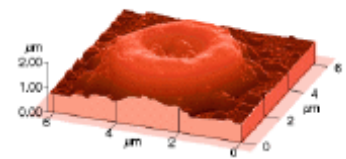
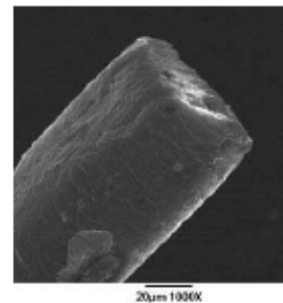
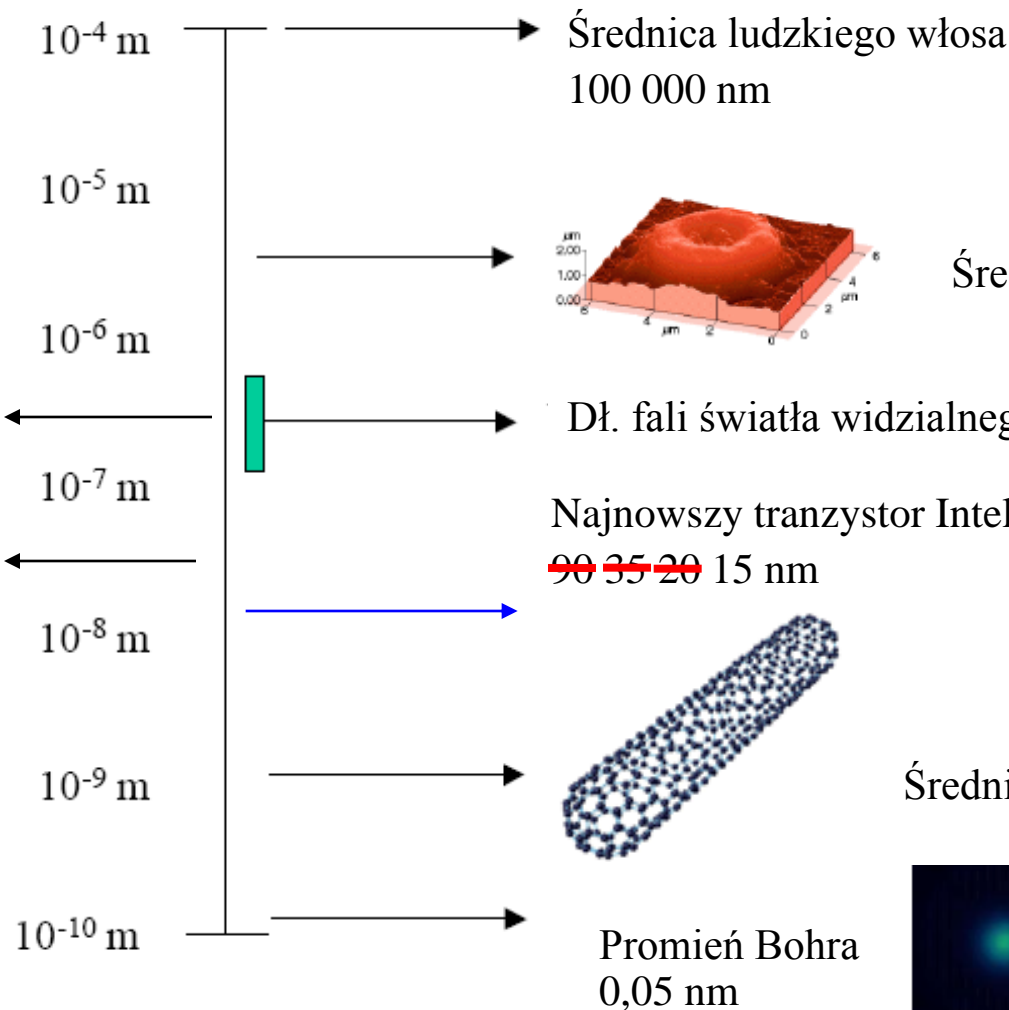
Rhinowirus 30 nm

Hair image from Patterns in Nature site at LSU; blood cell from osmosis webpage at Maricopa.edu

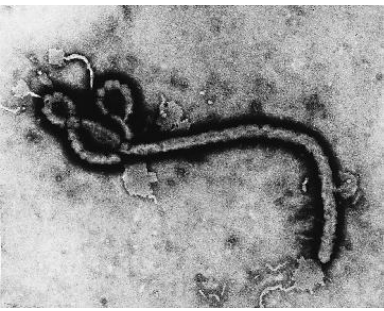
Ebola <http://www.brettrussell.com/personal/ebola.html>

# Nanotechnologia

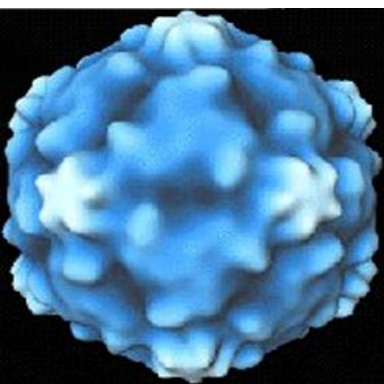
## Rozmiary



Wirus Ebola 600 nm



Rhinowirus 30 nm



Hair image from Patterns in Nature site at LSU; blood cell from osmosis webpage at Maricopa.edu

Ebola <http://www.brettrussell.com/personal/ebola.html>

# TRENDY: Pierwsze Prawo Moore'a

Ilość komponentów (tranzystory, połączenia, izolacje itd.) w IC podwaja się co około 18 miesięcy.

Rozmiar liniowy komponentów również zmniejsza się wykładniczo w czasie.

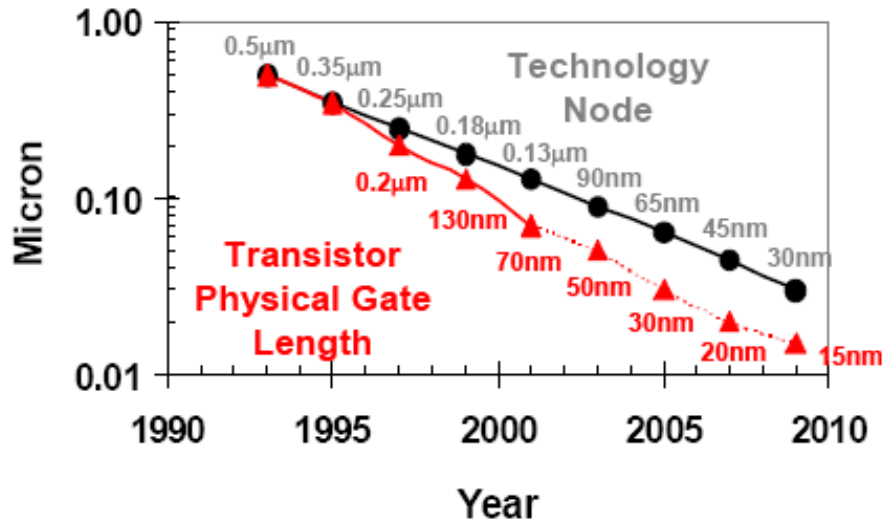
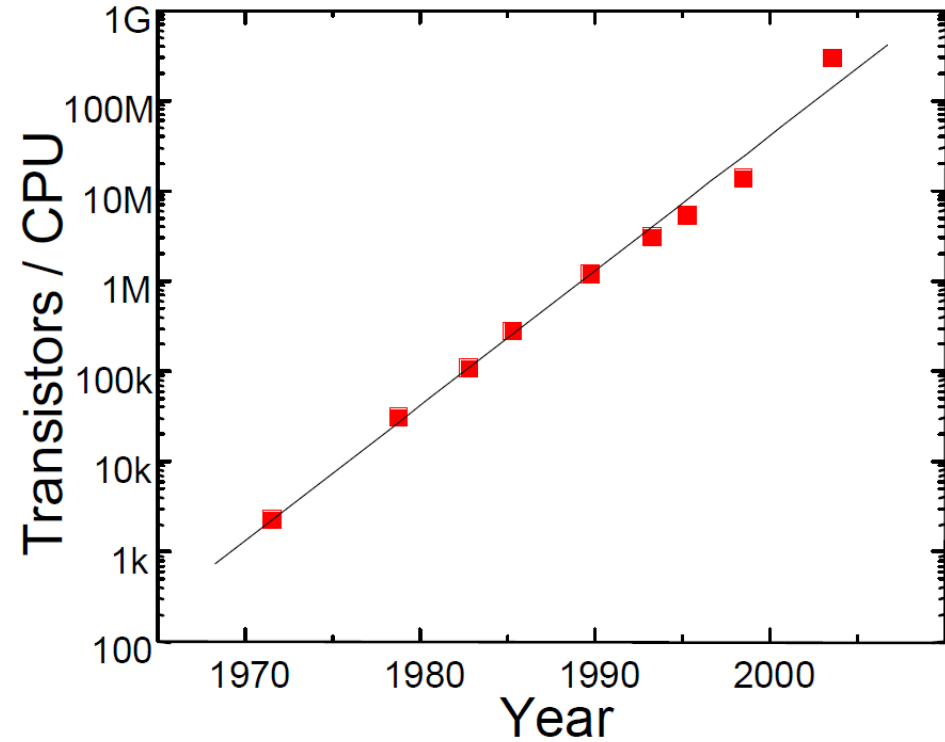


Figure 1: Logic technology node and physical  $L_G$  vs. year of introduction.

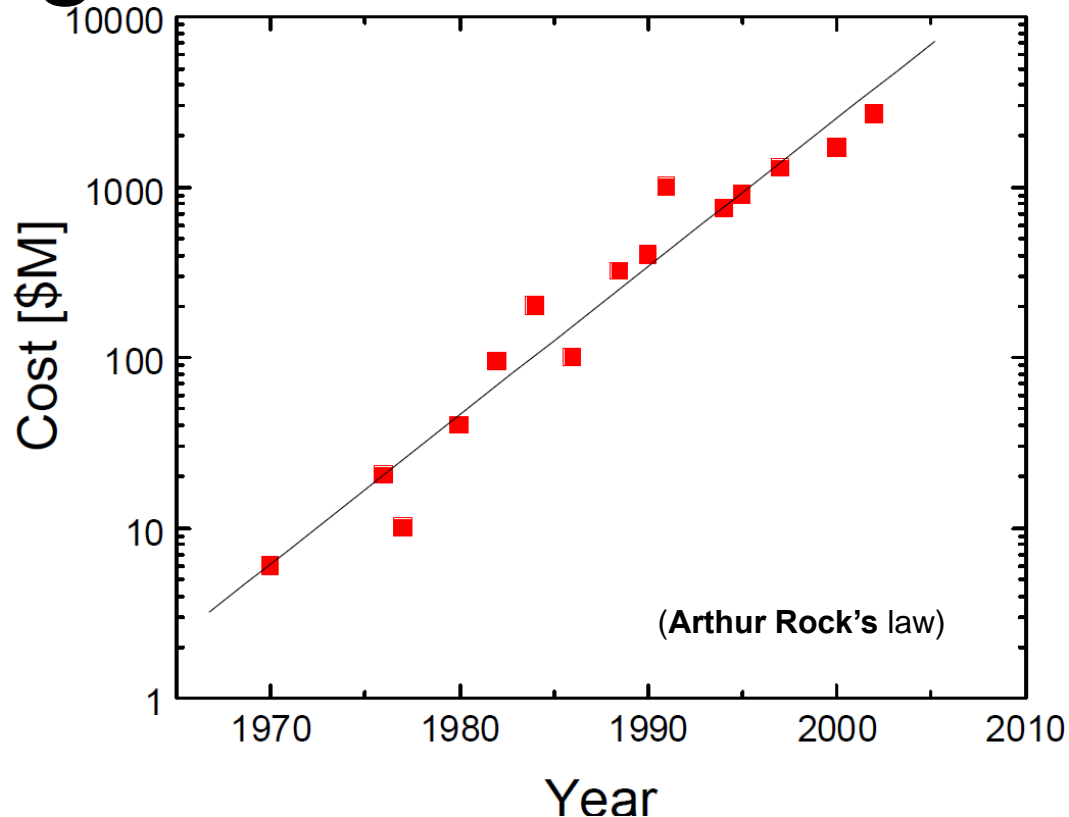
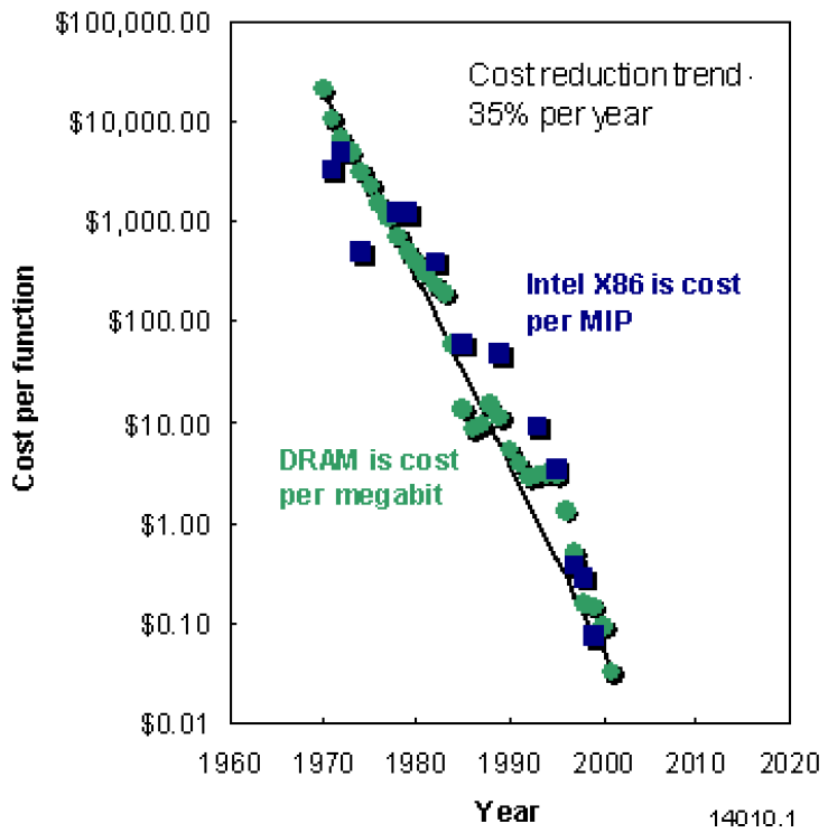


Te trendy nie mogą być kontynuowane w nieskończoność.

- Co zastąpi technologię Si?
- Z czego będzie wynikała ta zmiana technologii?

**EKONOMIA**

# PROBLEM: Drugie Prawo Moore'a



Koszt pojedynczego komponentu maleje wykładniczo o ok. 35% na rok.

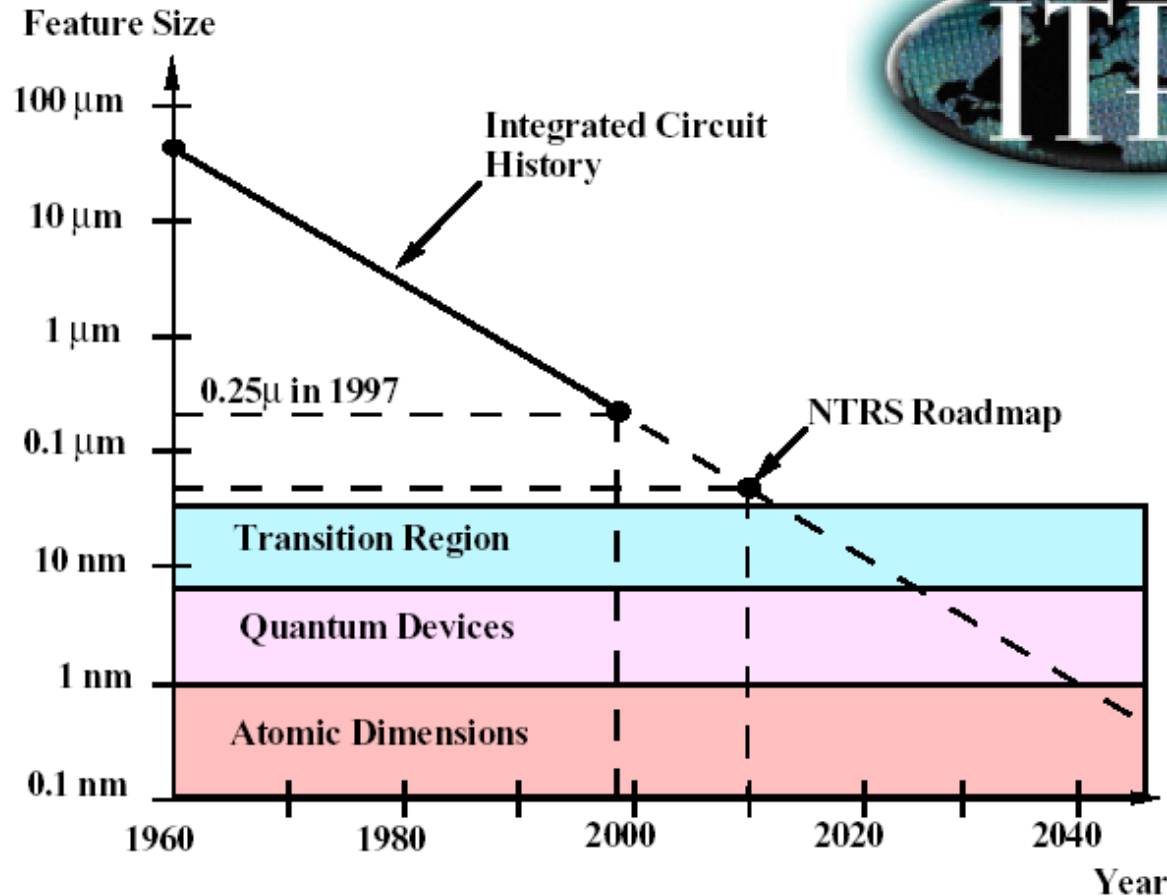
**ALE:** Koszt fabryki produkującej chipy rośnie także wykładniczo!

W 2025 roku fabryka procesorów kosztowałaby 1 bilion USD ( $10^{12}$  USD)

Ten trend w oczywisty sposób również nie może być kontynuowany!



# PROBLEM (?): Zjawiska kwantowe

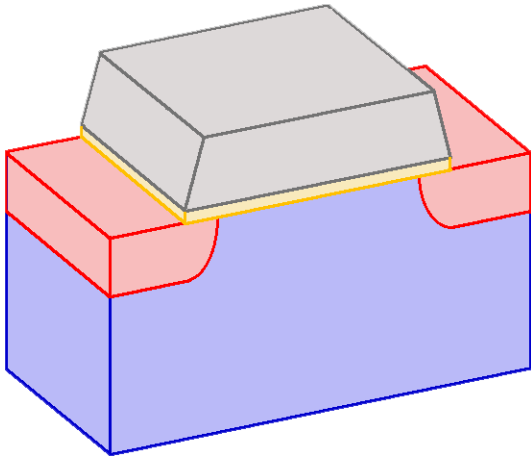


- History and future projections for minimum feature size in silicon chips.
- Device limits appear today to be  $\approx 25 \text{ nm}$  ( $250 \text{ \AA}$ ) channel lengths in MOS transistors.

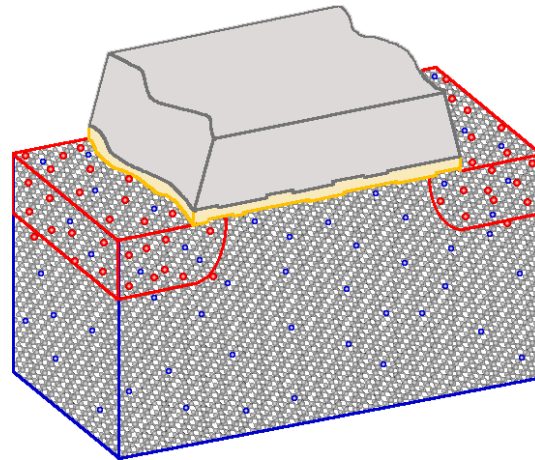
NO EXPONENTIAL IS  
FOREVER...

BUT WE CAN DELAY  
„FOREVER“

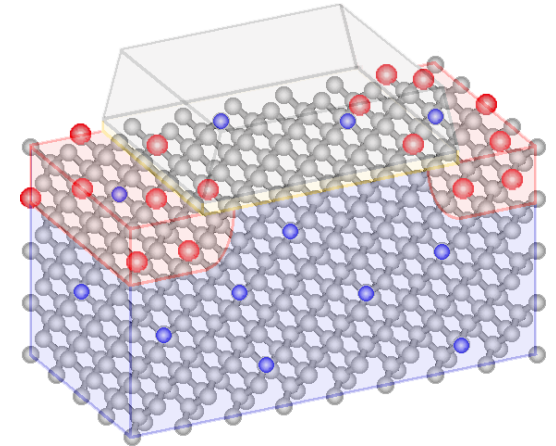
# Granice miniaturyzacji?



Myślimy, że tranzystor jest zbudowany tak.

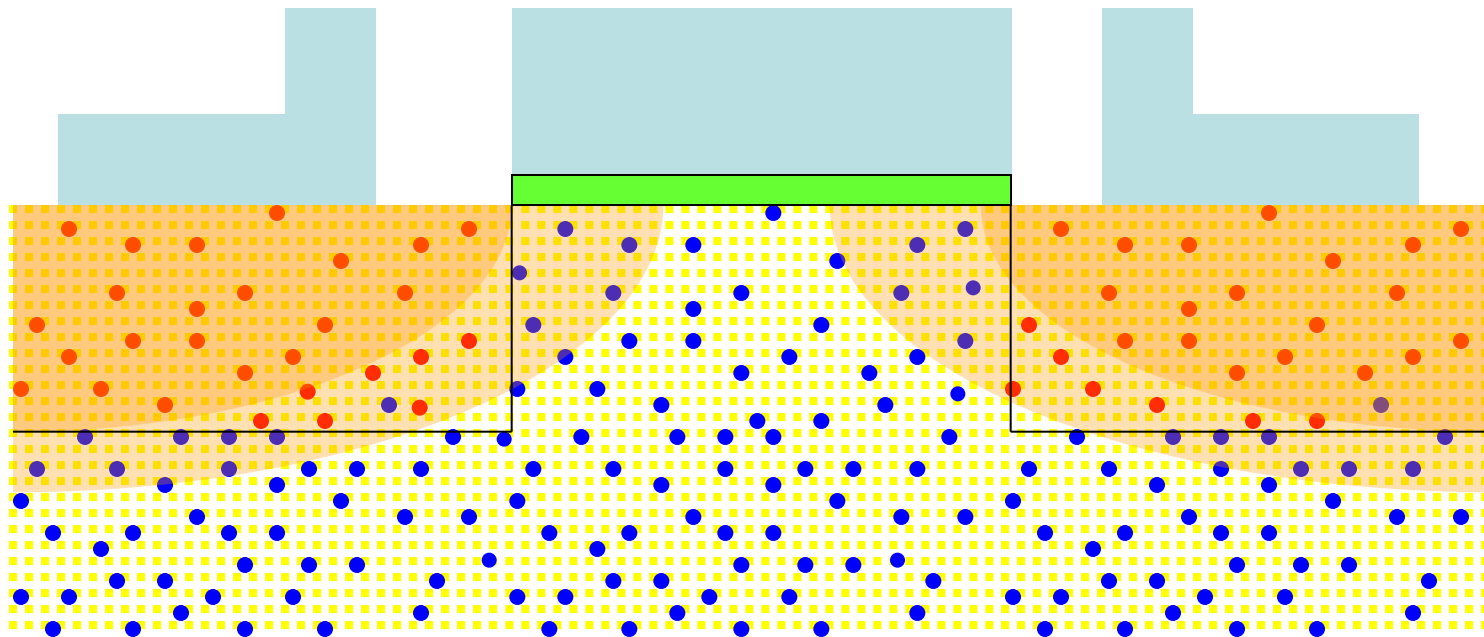


25 nm MOSFET  
Produkcja od 2008

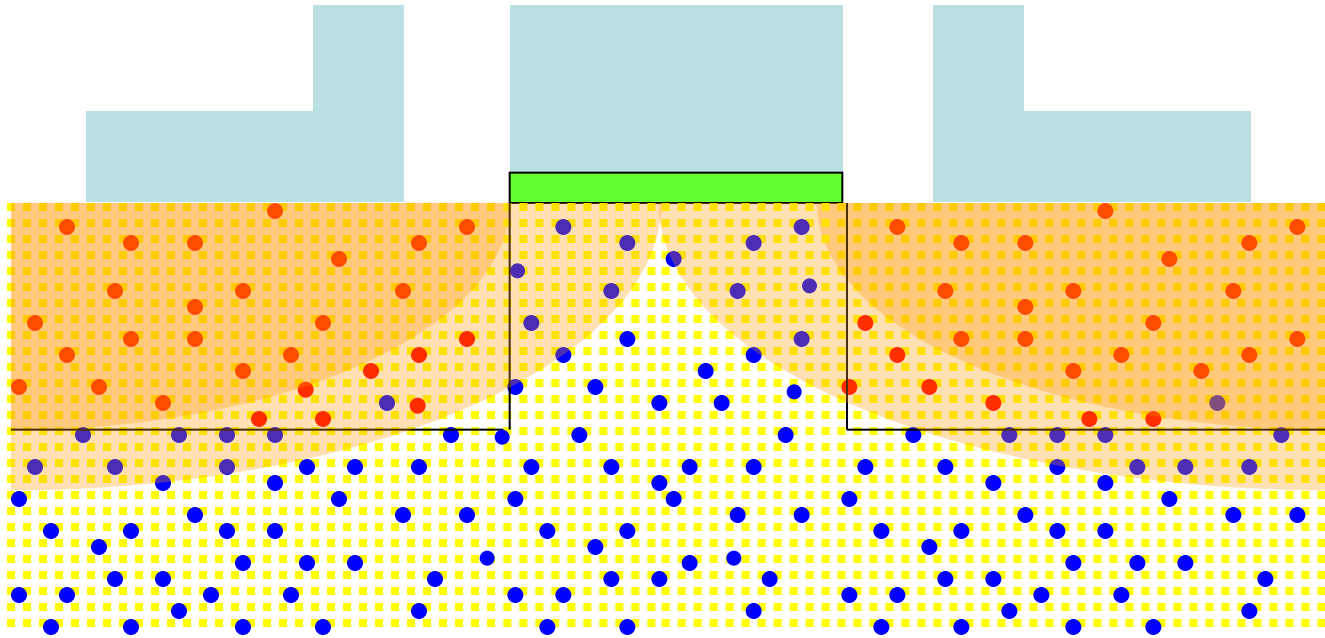


4,2 nm MOSFET  
Produkcja ???

# PROBLEM: Tunelowanie

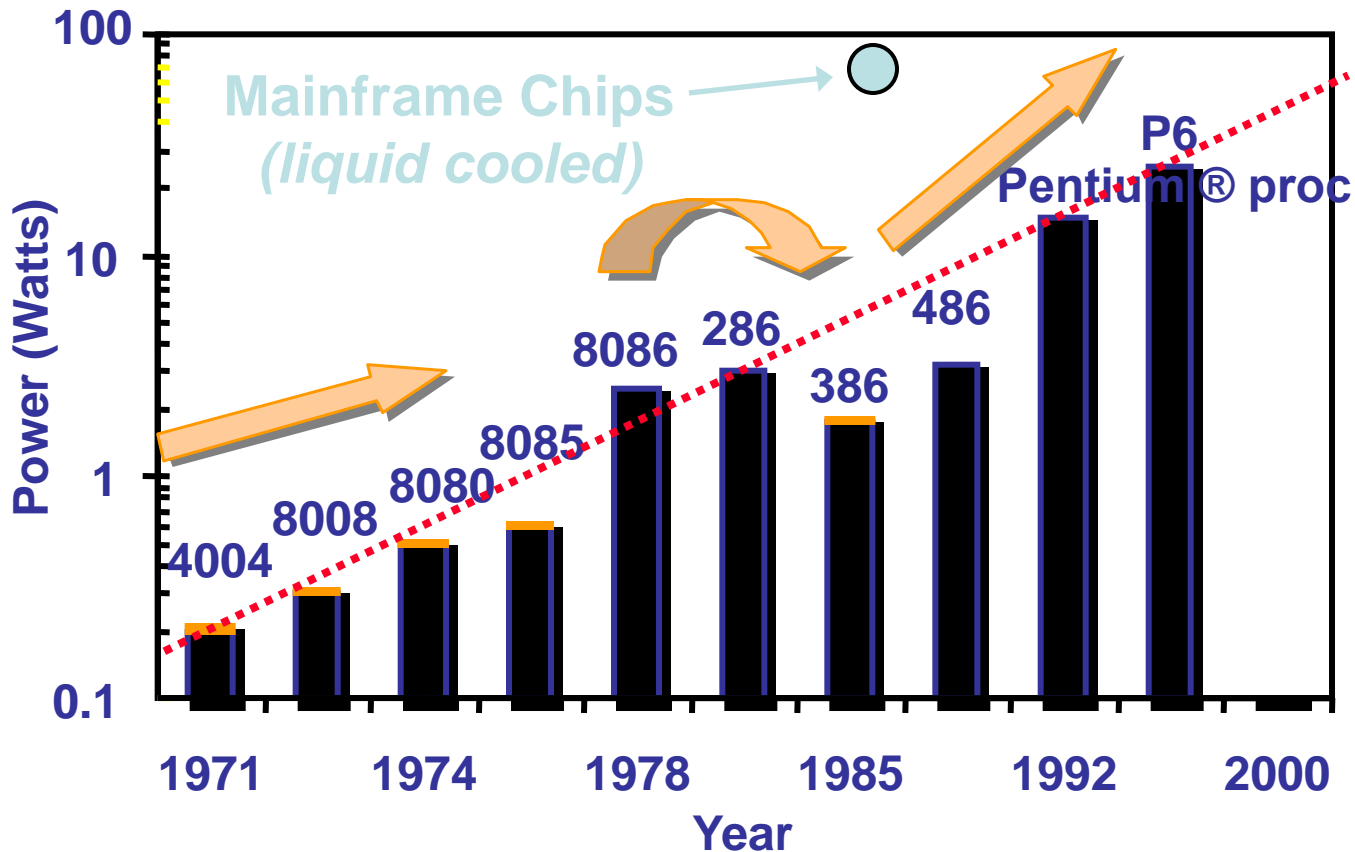


# PROBLEM: Tunelowanie



# PROBLEM: Chłodzenie

Z roku na rok układy wymagają większej mocy do wykonywania operacji logicznych.



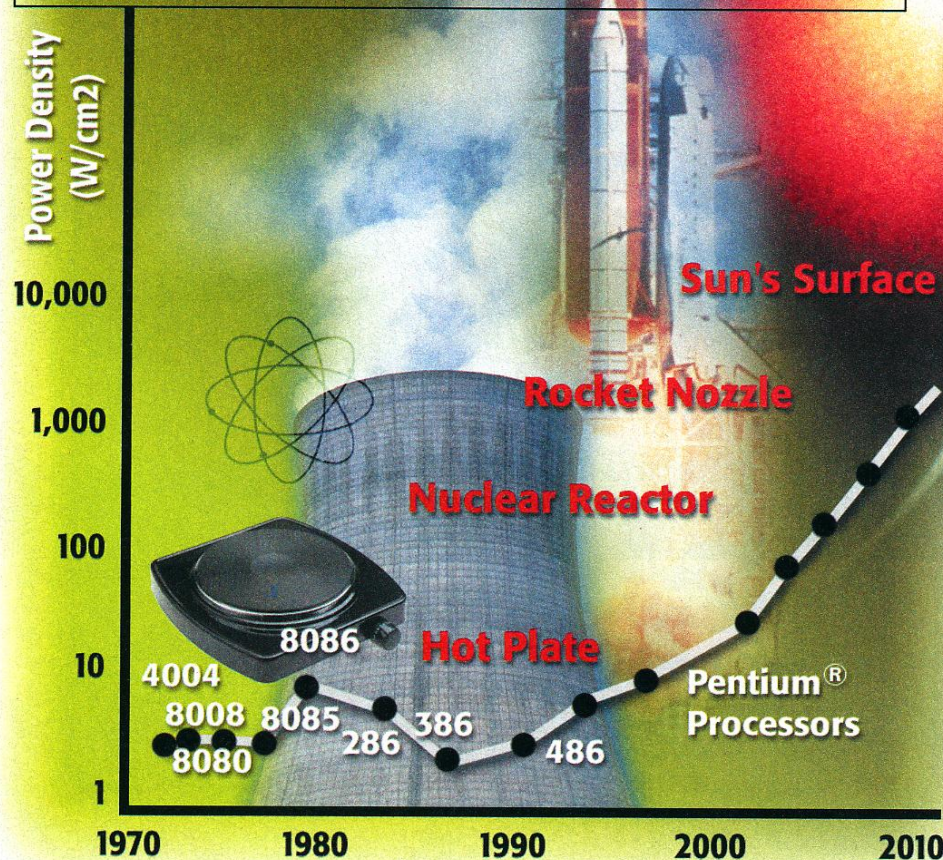
# PROBLEM: Chłodzenie

Gęstość mocy rośnie dramatycznie.

$10^7$  tranzystorów pracujących z częstotliwością 1.5 GHz zużywa 130 W. Zakładając, że na tej samej powierzchni za jakiś czas będzie pracować  $10^8$  tranzystorów z częstotliwością 10 GHz otrzymamy gęstość mocy na poziomie  $10 \text{ kW/cm}^2$  (porównywalną gęstość mocy ma silnik raketowy!)

[Film](#)

## Power Density Extrapolation



CPU - Computer Power User Magazine

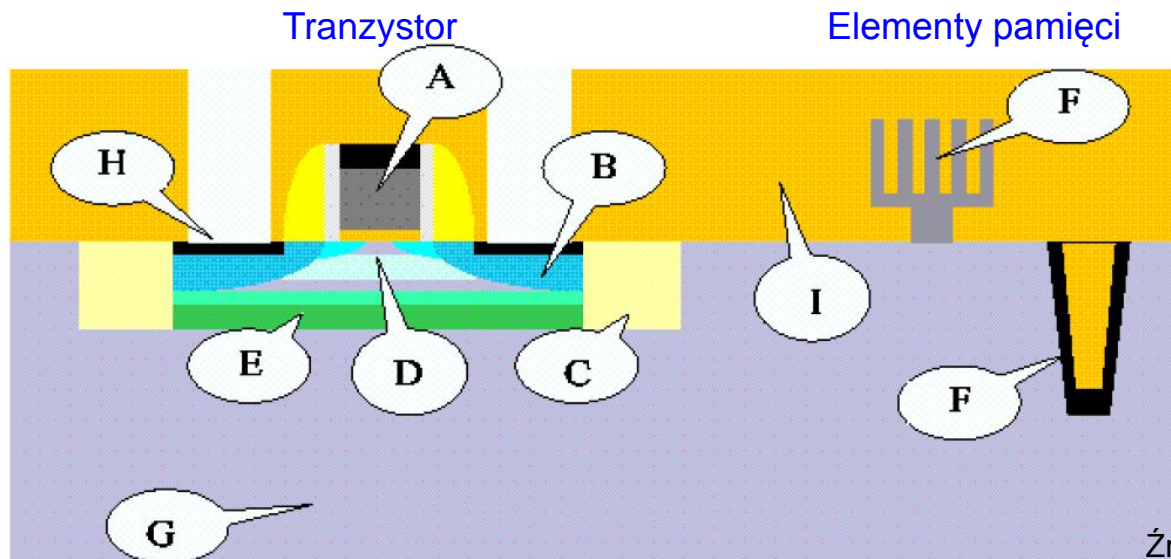
SOURCE: INTEL

# International Technology Roadmap for Semicond.



SEMATECH: międzynarodowe konsorcjum producentów półprzewodników – określa cele, opłaca badania nad rozwiązaniem problemów dotyczących „wszystkich”, w jego skład wchodzi: AMD, Agere Systems, Hewlett-Packard, Hynix, Infineon Technologies, IBM, Intel, Motorola, Philips, STMicroelectronics, Texas Instruments

Stara się zdefiniować “wyzwania technologiczne”, określić dalsze cele i przewidzieć ich specyfikację, koszt, wydajność, czas wdrożenia itp.





# PROBLEM: Podłoża

Krzem 2003,

- wafer 30 mm:
- Wymagane jest nie więcej niż 120 cząstek <100 nm na wafer
- Dokładność polerowania 130 nm

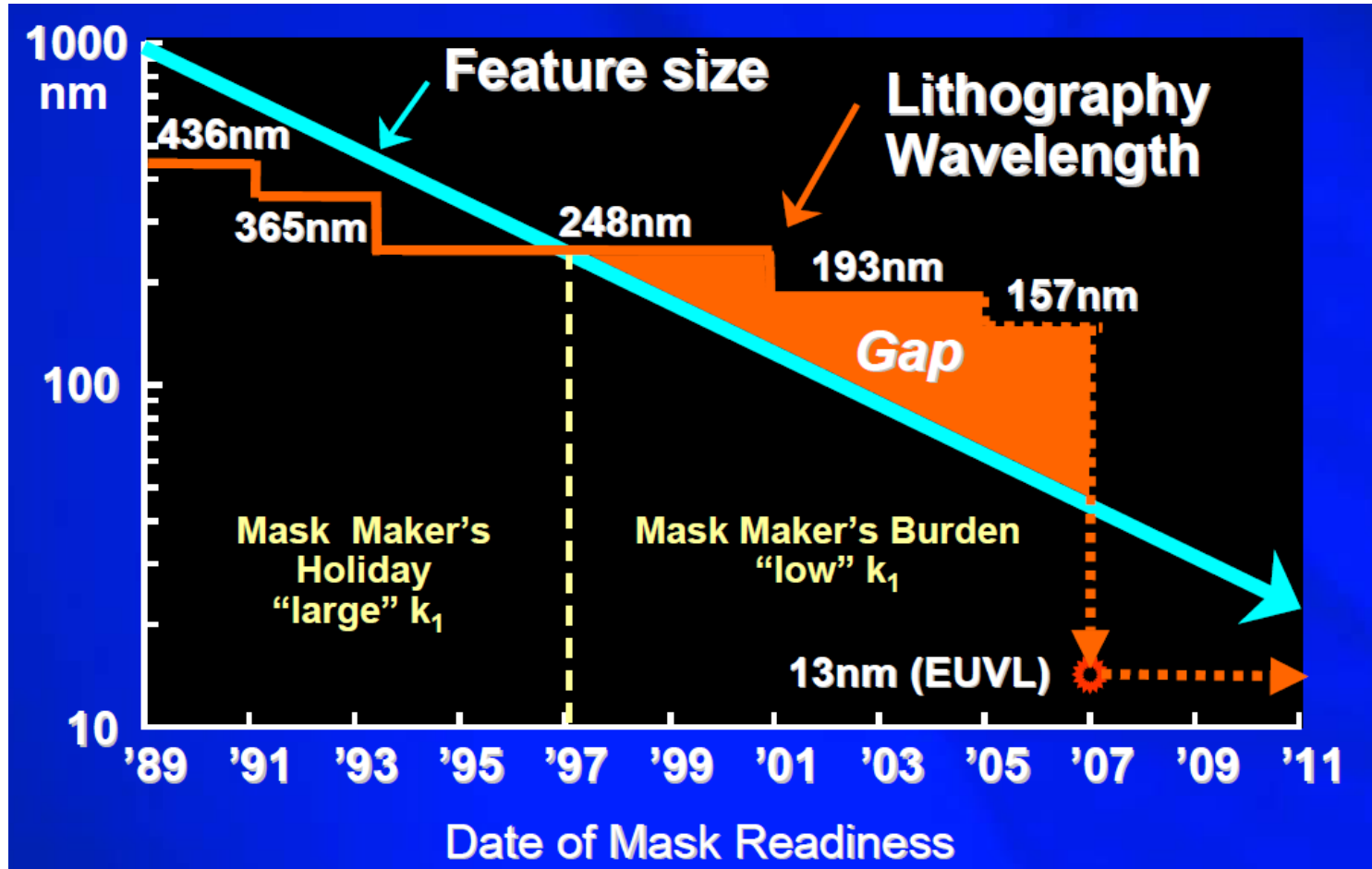
Krzem 2007,

- wafer 30 mm:
- Wymagane jest nie więcej niż 77 cząstek <100 nm na wafer (jak to zmierzyć?)
- Dokładność polerowania 65 nm

Krzem 2016,

- wafer 450 mm:
- Wymagane jest nie więcej niż 77 cząstek <100 nm na wafer (jak to zmierzyć?)
- Dokładność polerowania 22 nm (jak to zmierzyć?)

# PROBLEM: Litografia



# PROBLEM: Litografia

Litografia 2003,

- Długość fali światła 248 nm
- Kanał FET 90 nm:
- Wymagane jest nie więcej niż 2000/m<sup>2</sup> <100 nm
- Fluktuacje granic rezystu 7 nm

Litografia 2007,

- Długość fali światła 193 nm (?) 153 nm (?) X-ray (?)
- Kanał FET 35 nm:
- Wymagane jest nie więcej niż 1500/m<sup>2</sup> <100 nm
- Fluktuacje granic rezystu 3 nm

Prawdopodobnie koniec epoki polimerowych rezystów (cząstki polimerów są zbyt duże!)

Litografia 2016,

- Długość fali światła X-ray (?)
- Kanał FET 9 nm:
- Wymagane jest nie więcej niż 500/m<sup>2</sup> <100 nm
- Fluktuacje granic rezystu 1 nm

# Trendy – prawo Moore'a: scalaki

# Nanotechnologia



1991



2007

2008





# 2006



Seagate 60GB 1.8-inch Hard Drive



Hitachi 1.0-inch 6GB Micro Drive



Toshiba 60GB 1.8-inch Hard Drive



2009





HTC Desire Z



1TB

# 2011





# Technologie Wymiatające

**SlotMusic - MicroSD zamiast CD?**  
[PCWK Online]  
PC WORLD KOMPUTER

Wytwórnice muzyczne EMI, Sony BMG rozpowszechniania muzyki na nowym telefonami komórkowymi oraz innych zabezpieczeń DRM będzie sprzedawa

Tru  
mu  
tra  
na  
nie  
spi  
No

**Zamiast na CD muzyka na znaczkach**  
2008-09-22, ostatnia aktualizacja 2008-09-22 20:51

**SanDisk i wytwórnice muzyczne mają nowy pomysł na sprzedaż muzyki - na karcie pamięci mniejszej od pocztowego znaczka**

**ZOBACZ TAKŻE**

- [SlotMusic - MicroSD zamiast CD?](#) (22-09-08, 09:14)
- [Samsung Q1: Odtwarzacz mp3 dla studenta](#) (18-09-08, 14:21)
- [iPod Audio Book Maker - zamięć MP3 na format książek audio](#) (17-09-08, 16:31)
- [Bezpieczne hasła z obrazków i](#)

- To pomysł na miarę XXI wieku - mówią o projekcie "slotMusic" przedstawiciele SanDiska, największego na świecie producenta kart pamięci flash. Spółka dogadała się z najważniejszymi graczami muzycznymi: Universal Music, EMI, Sony BMG i Warnerem. Chce sprzedawać płyty artystów na produkowanych przez siebie kartach pamięci flash. Mają mieć pojemność 1 GB, co wystarczy na upakowanie ok. stu plików MP3 w stosunkowo wysokiej jakości 320 kbps.

Karty będą sprzedawane razem z przejściówką USB, która umożliwi przegranie muzyki na komputer.

**Z OSTATNIEJ CHWILI**

- 10:23 | **Egipt: Turyści nadal p**
- 09:53 | **CBA zatrzymała wice**
- 09:36 | **Policja poszukuje no**
- 09:08 | **"Nasz Dziennik": Posł**
- 09:05 | **"Rzeczpospolita": No**
- 09:03 | **"Dziennik Polski": Dzi**
- 09:01 | **Jak studiować i nie z**

Newsletter 6500

Najważniejsze informacje dnia

Podaj email

# Technologie Wymiatające

In  
cul  
ult  
pre  
film  
wir  
tha  
ex  
be

Pierwszy komputer wszczepiany w oko - Oczy - Zdrowie w Dziennik.pl - Dziennik.pl - wiadomości, informacje, rozrywka - Mozilla Firefox

http://zdrowie.dziennik.pl/oczy/artykuly/324702,pierwszy-komputer-w

INFOR.PL | gazetaprawna.pl | forsal.pl | totalmoney.pl | dziennikinternautow.pl | infooko.pl

Niedziela, 6 marca 2011 Imieniny: Jordana, Róży, Kolety Pogoda: Warszawa Dziś

## dziennik.pl OCZY

Nasze serwisy: Wiadomości Gospodarka Opinie Auto Kobieta Rozrywka Film Muzyka Nauka Nieruchomości Podróże Zdrowie Pog

Zdrowie Aktualności Diety Grypa Cukrzyca Alergie Profilaktyka Senior **Oczy** Nowotwory Fo

Strona główna » Zdrowie » Oczy » Pierwszy komputer wszczepiany w oko

### Pierwszy komputer wszczepiany w oko

2011-03-04 | Ostatnia aktualizacja: 12:21 | Komentarze: 1

Tagi: badania, jaskra, naukowcy, oko



Naukowcy amerykańscy skonstruowali komputer o wielkości jednego milimetra sześciennego. Będzie on wszczepiany do oka chorym na ostrą postać jaskry. Ma monitorować ciśnienie śródgałkowe - poinformował magazyn naukowy Technology Review.

Rekomenduj artykuł | Dodaj do: 

 Poleć  Bądź pierwszym znajomym, który to poleca.

Minikomputer wszczepiony do oka będzie kontrolował ciśnienie śródgałkowe / Shutterstock

#### Dziennik.pl poleca



Ważna wie, kiedy Smoleńsk przestanie dzielić Polaków

Czołgi atakują. "Niszczą wszystkich napotkają"

#### Najnowsze Zdrowie



11:50 **Epidemia chorobliwej otyłości. Wśród młodych!**

11:36 Cukrzyca wiąże się z nowotworami złośc

12:14 Pierwszy komputer wszczepiany w oko

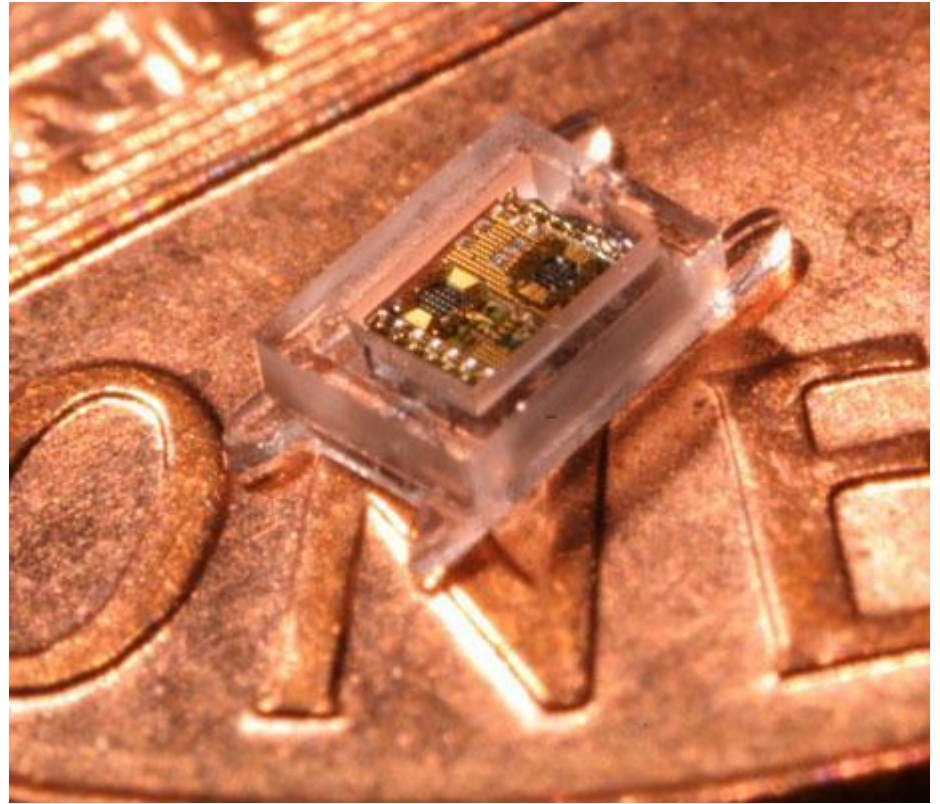
15:45 Ibuprofen ogranicza ryzyko choroby

Zakończono



# Technologie Wymiatające

In a package that's just over 1 cubic millimeter, the system fits an ultra low-power microprocessor, a pressure sensor, memory, a thin-film battery, a solar cell and a wireless radio with an antenna that can transmit data to an external reader device that would be held near the eye.



University of Michigan

# CCD



## The Nobel Prize in Physics 2009

1/2

**Willard S. Boyle and George E. Smith**

Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA

*"for the invention of an imaging semiconductor circuit – the CCD sensor"*

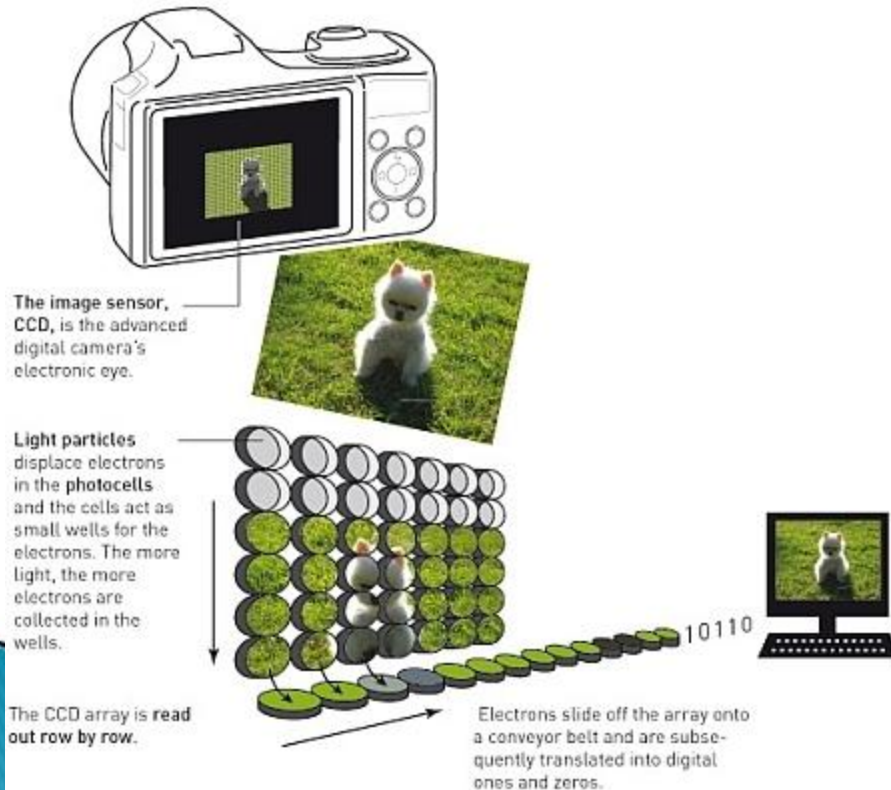


Photo: U. Montan

**Willard S. Boyle**

🕒 1/4 of the prize

Bell Laboratories  
Murray Hill, NJ, USA

b. 1924  
(in Amherst, NS, Canada)



Photo: U. Montan

**George E. Smith**

🕒 1/4 of the prize

Bell Laboratories  
Murray Hill, NJ, USA

b. 1930

# CCD



The Nobel Prize in Physics 2009

1/2

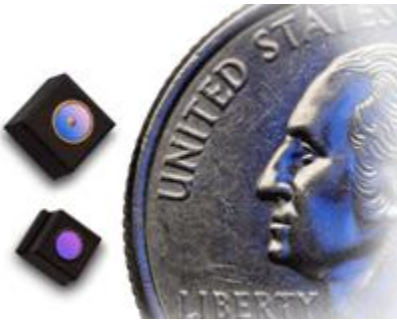
**Willard S. Boyle and George E. Smith**

Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA

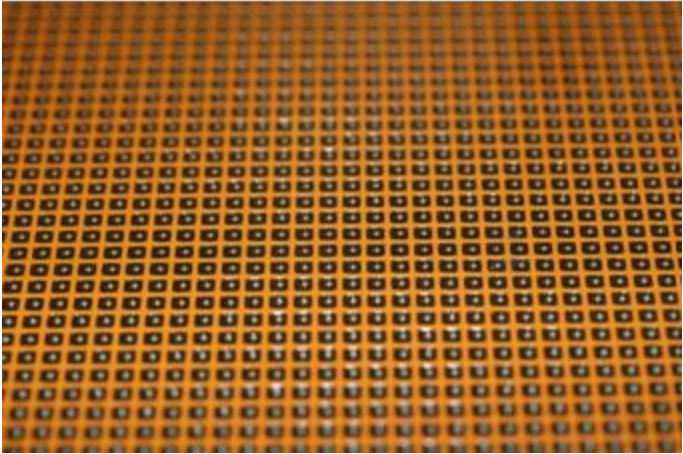
*"for the invention of an imaging semiconductor circuit – the CCD sensor"*



# OmniVision Readies for Wafer Level Camera Cube Production



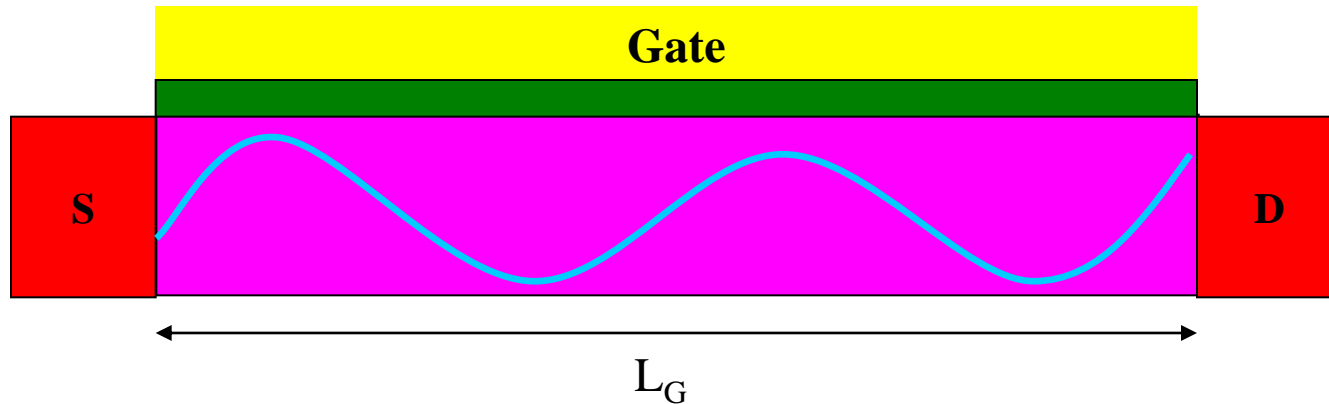
evolution of the mobile phone camera



# Trendy – prawo Moore'a: THz

# Badania na Hożej

Dr Jerzy Łusakowski,  
Dr Krzysztof Karpierz,  
Mgr Maciej Sakowicz,  
Prof. dr hab Marian Grynberg



$$f_0 = \frac{1}{4L_G} \sqrt{\frac{e \cdot (U_{GS} - U_{TH})}{m}}$$

$$L_G = 100 \text{ nm}$$

$$U_{GS} - U_{TH} = 1 \text{ V}$$

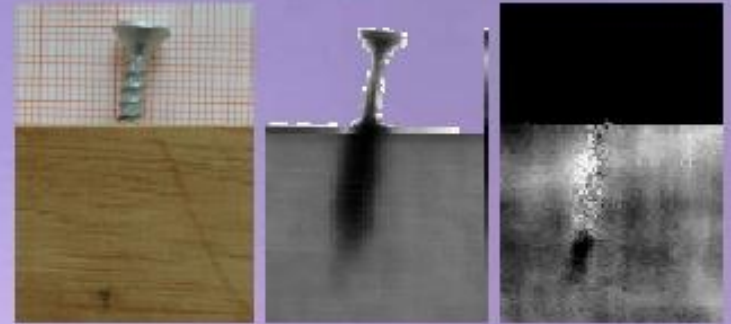
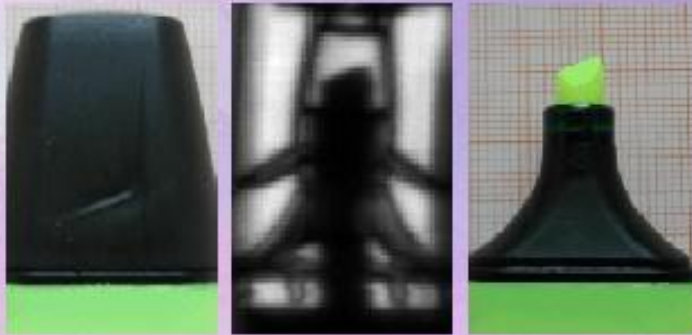
$$m_e = 0.067 m_0$$



$$f_0 = 4 \text{ THz}$$



# Principe de l'imagerie THz



## Exemple d'imagerie



*Courtesy: Paul Planken*

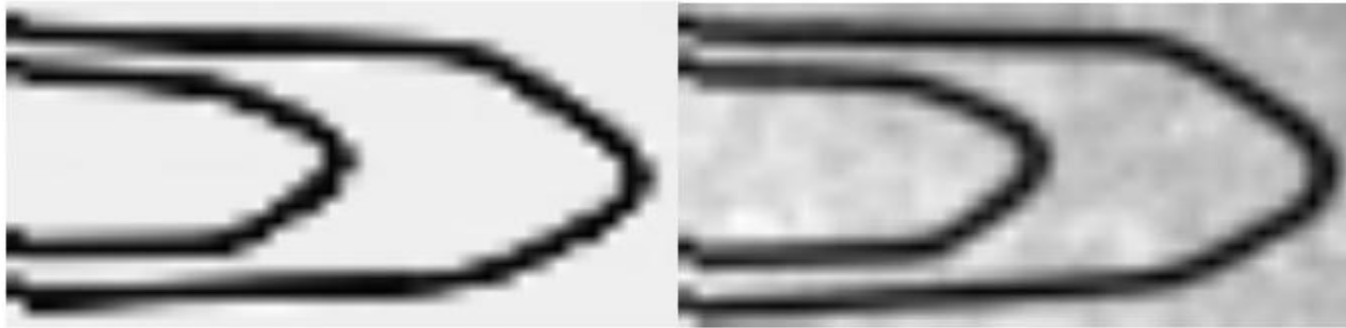


Fig. 11. Raster-scan imaging in transmission mode of a metallic paper clip. Left: without envelope, right: in envelope. 20 mm x 10 mm THz image was made with a numerical aperture of 0.5 and 0.3 mm pixel size (after Ref. 48).

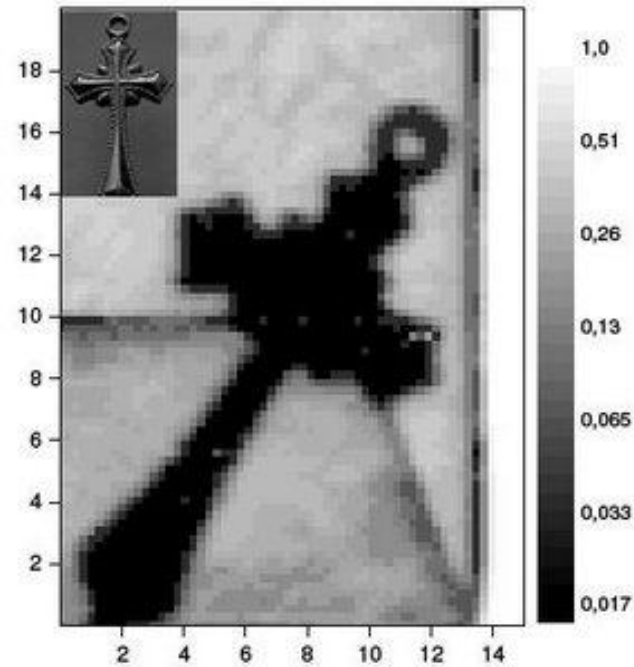
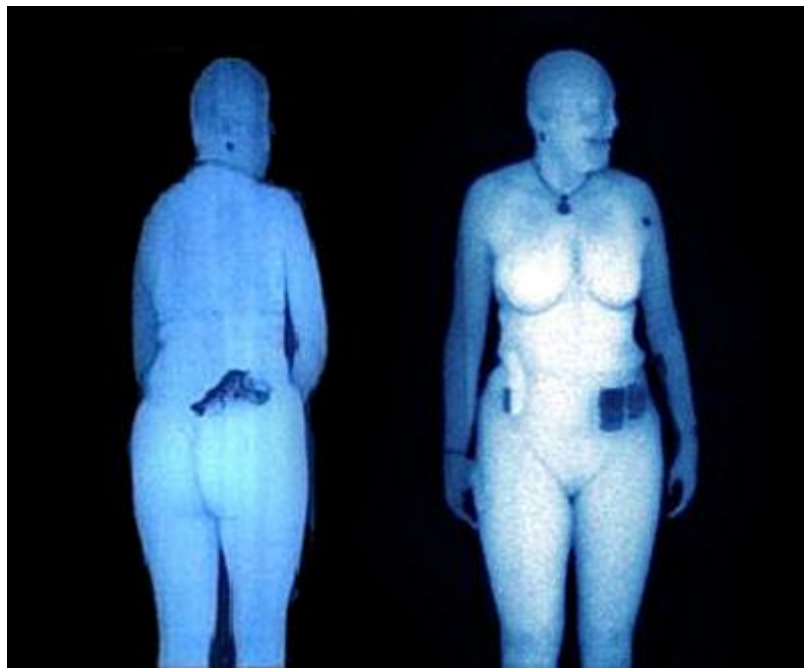
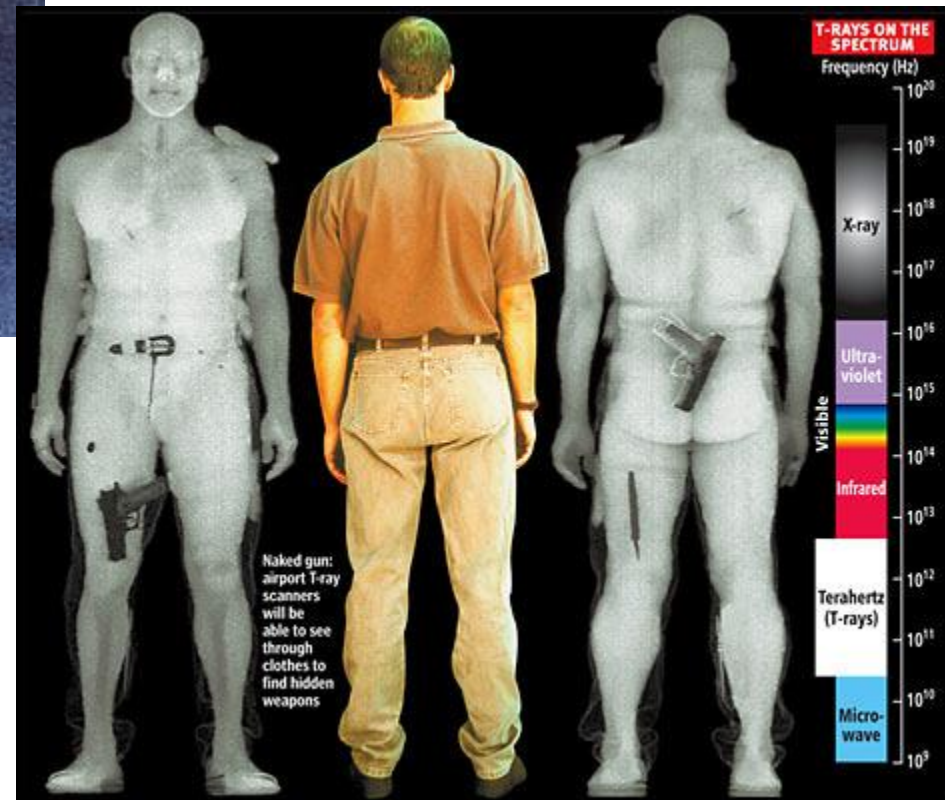


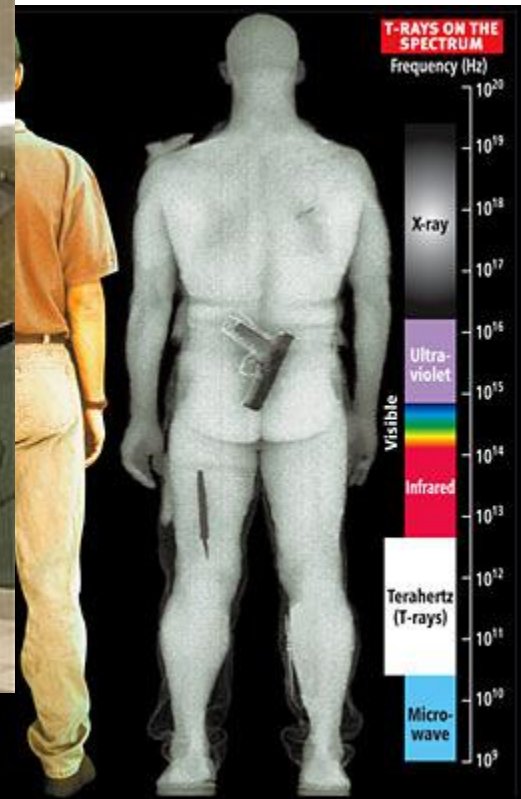
Fig. 10. b) The THz image of a metallic cross at 1.63 THz concealed in a paper envelope. Inset shows a photo of the cross for comparison. Scales are in millimeters, linear intensity scale is given in relative units.

J Infrared Milli Terahz Waves (2009) 30:1319–1337  
DOI 10.1007/s10762-009-9564-9

## Field Effect Transistors for Terahertz Detection: Physics and First Imaging Applications

Wojciech Knap • Mikhail Dyakonov • Dominique Coquillat • Frederic Teppe •  
Nina Dyakonova • Jerzy Łusakowski • Krzysztof Karpierz • Maciej Sakowicz •  
Gintaras Valusis • Dalius Seliuta • Irmantas Kasalynas • Abdelouahad El Fatimy •  
Y. M. Meziani • Taiichi Otsuji





Inżynieria  
nanostruktur



# Badania na Hożej



Fig. 5 Application of a sub-THz technology for hidden weapon detection (from [4])

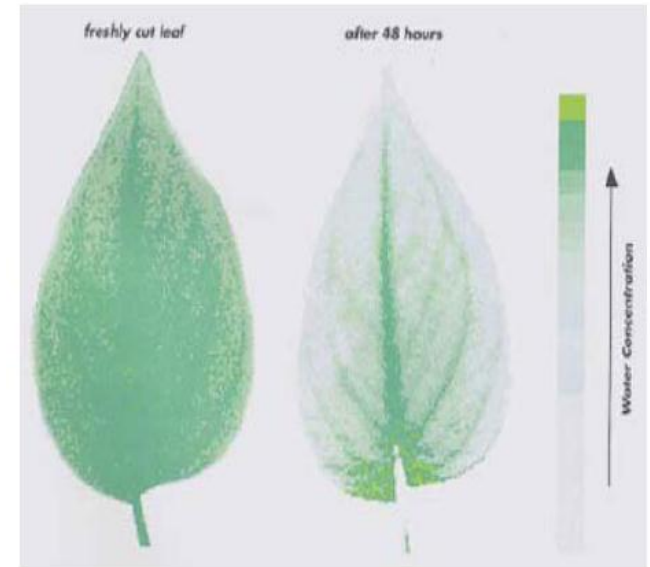


Fig. 4. THz images of a fresh leaf and the same leaf after 48 hours. Courtesy of TeraView, Ltd.

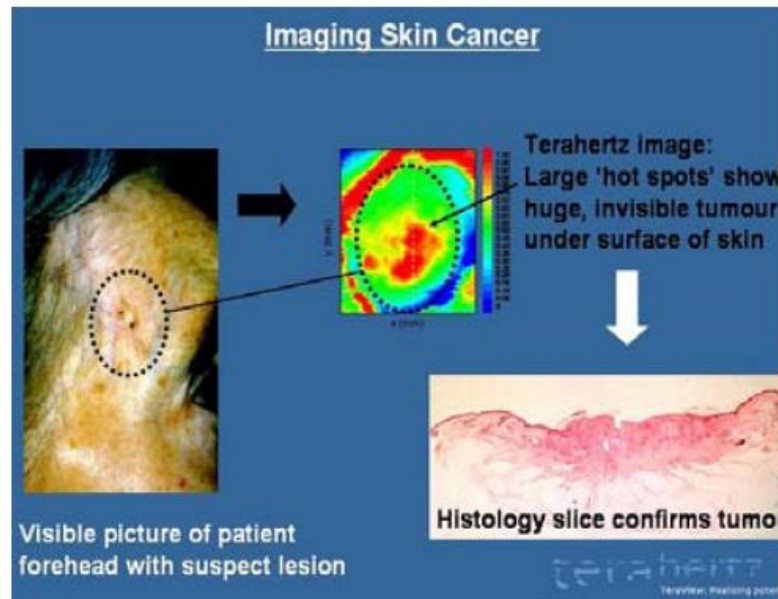
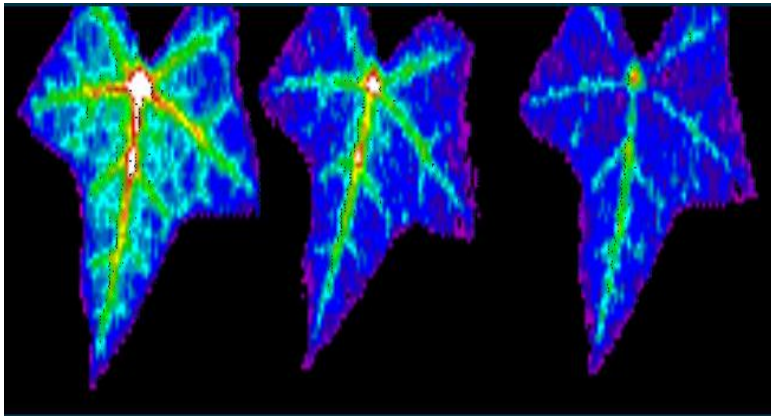


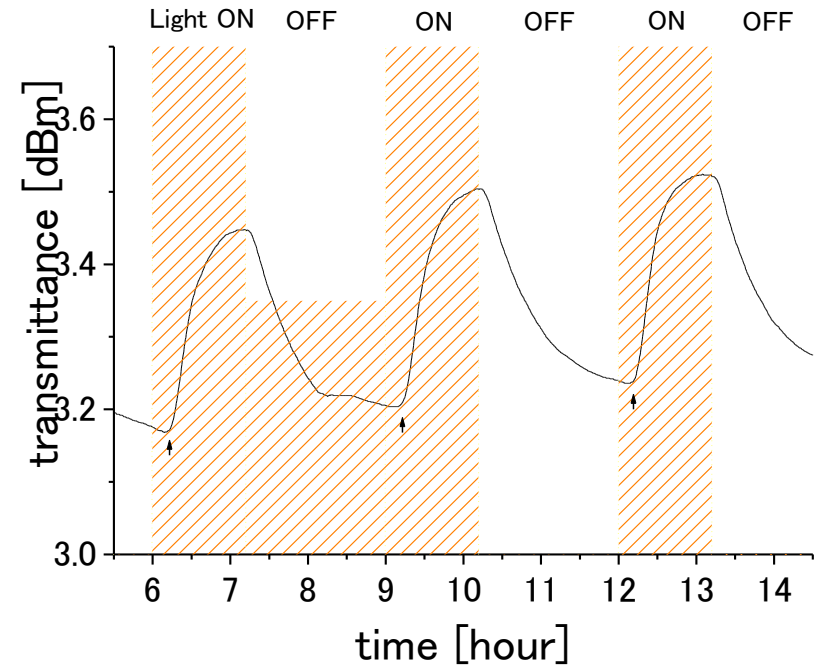
Fig. 3. Imaging skin cancer [3]. Courtesy of TeraView, Ltd.

Terahertz technology: devices and applications

# Agriculture and Food Industry

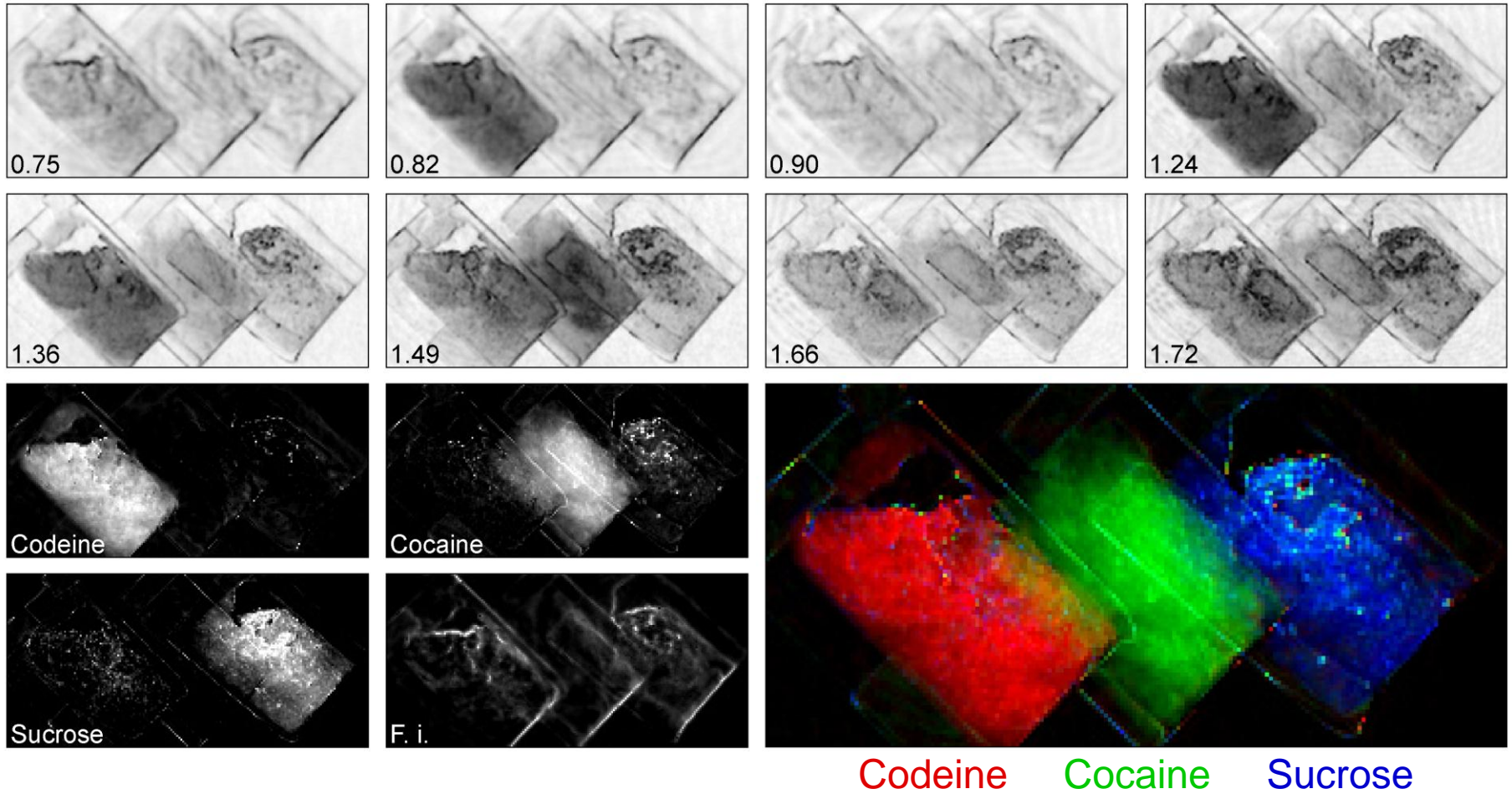


Water contents of plants

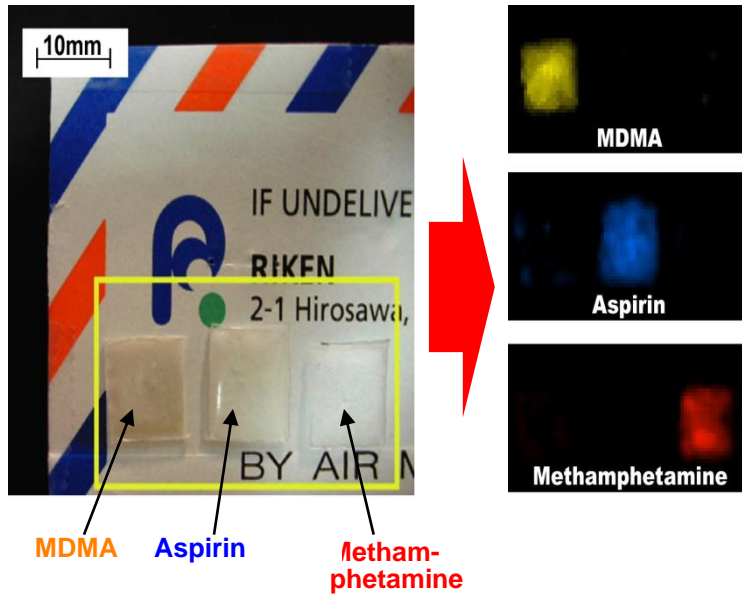


Monitoring of plants

# Chemical imaging



# Narita – Japan Airport



Drug inspection in mails



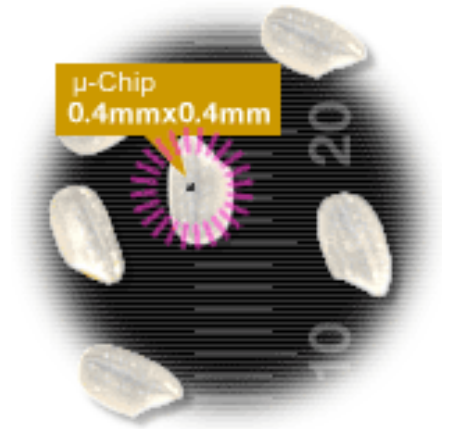
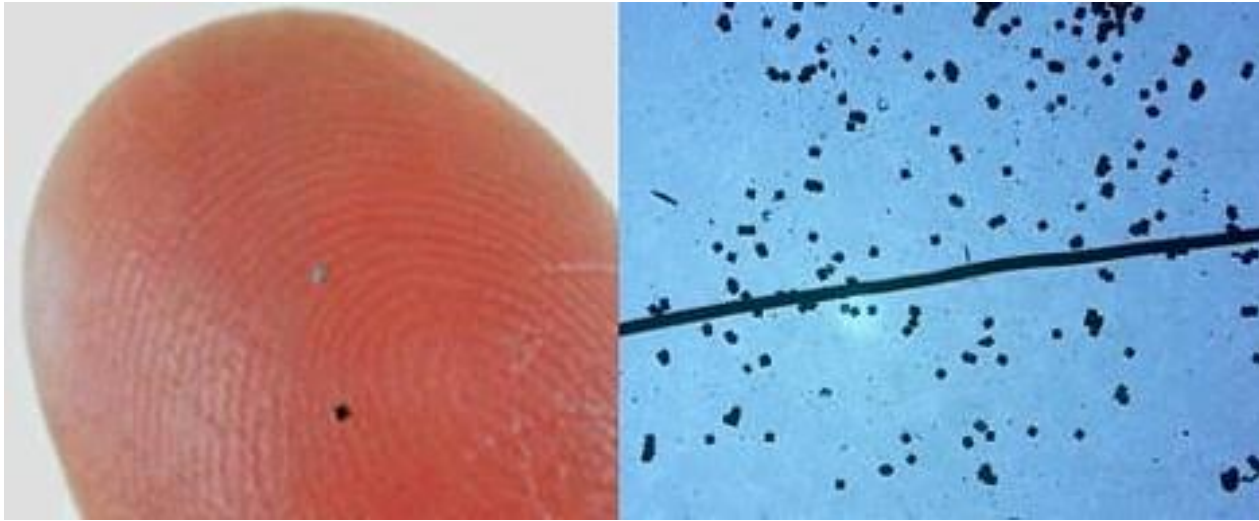


# Trendy – prawo Moore'a: RFID

# RFID



# RFID



*Hitachi's new RFID chips (pictured on right, next to a human hair) are 64 times smaller than their mu-chips (left)*



*Scena z filmu  
Mission impossible*

# RFID

## LibBest Library RFID Management System



# RFID

## DOCTOR FUN

16 Jan 2006



Copyright © 2006 David Farley, d-farley@ibiblio.org  
<http://ibiblio.org/Dave/dfun.html>

This cartoon is made available on the Internet for personal viewing only. Opinions expressed herein are solely those of the author.

# Niebieska elektronika

# Biel, Biel i jeszcze raz biel!



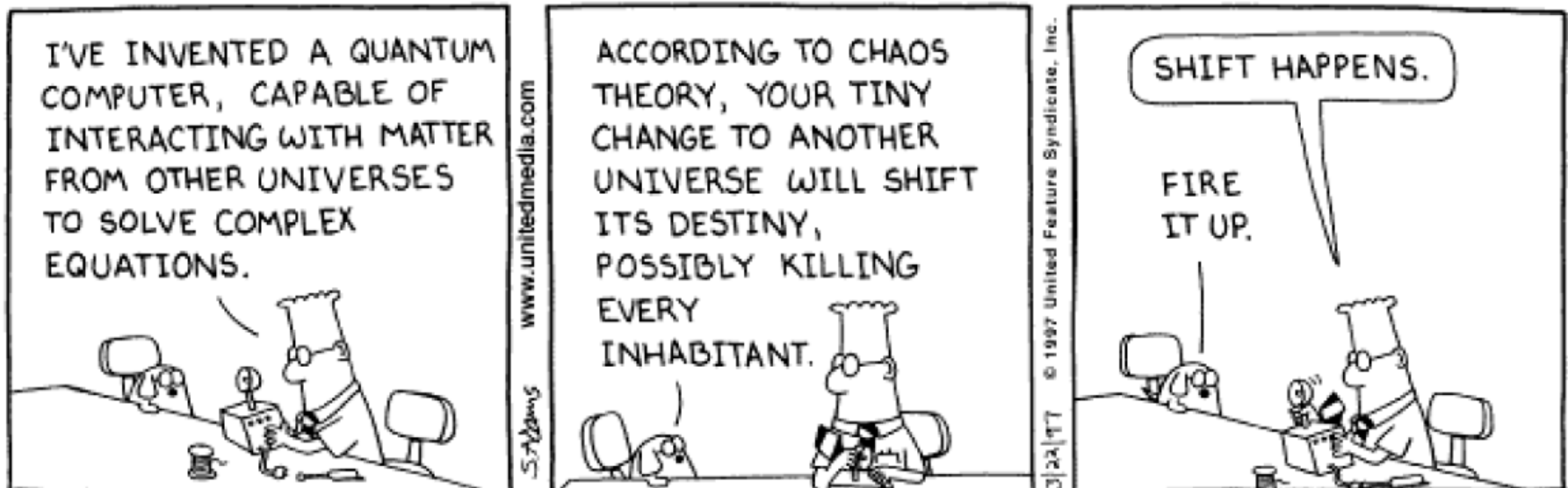
# Urządzenia kwantowe



# Quantum Computer I (QC)

1. Bity, P-bity, Q-bity
2. Bramki Qbitowe
3. Kwantowe procedury
4. Poważny problem
5. Jak zbudować taki komputer?

**D:WAVE**  
The Quantum Computing Company™



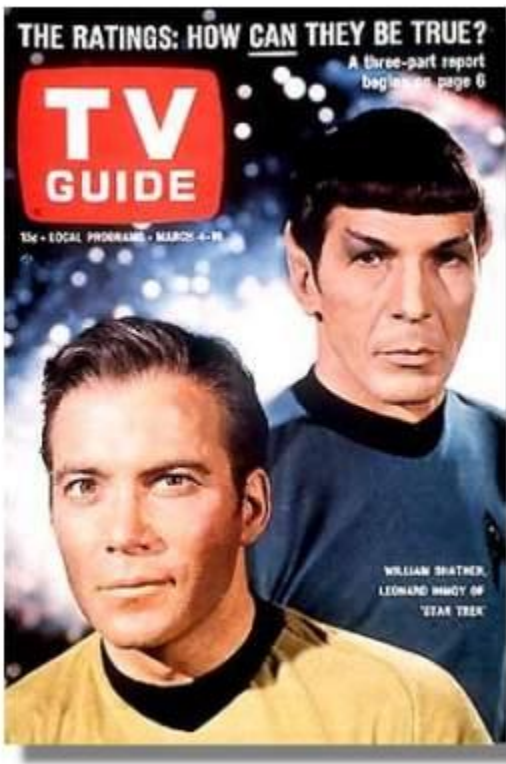
Za 2 tygodnie

# Quantum Computer I (QC)

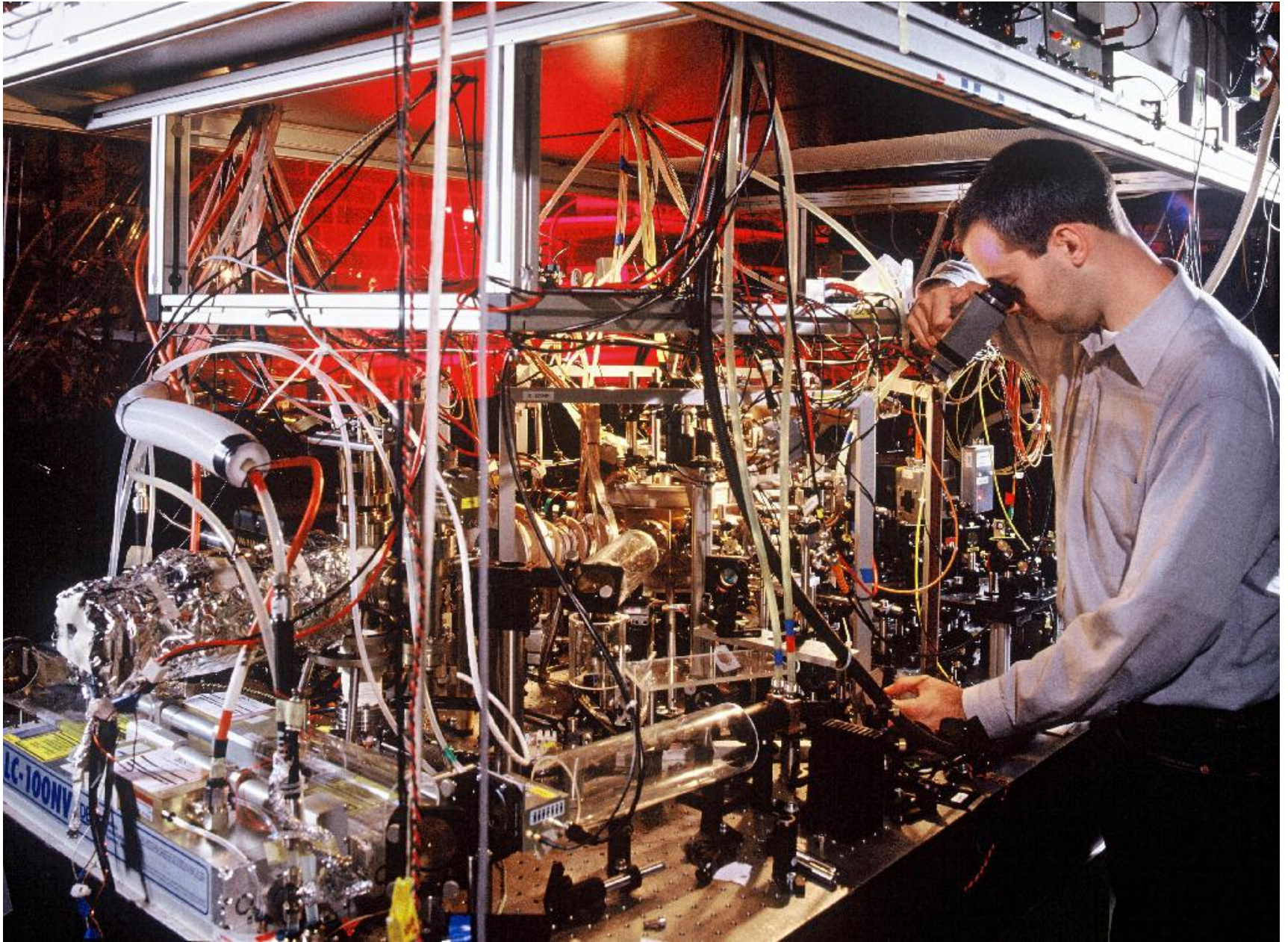
1. Bity, P-bity, Q-bity
2. Bramki Qbitowe
3. Kwantowe procedury
4. Poważny problem
5. Jak zbudować taki komputer?



# Kwantowa teleportacja

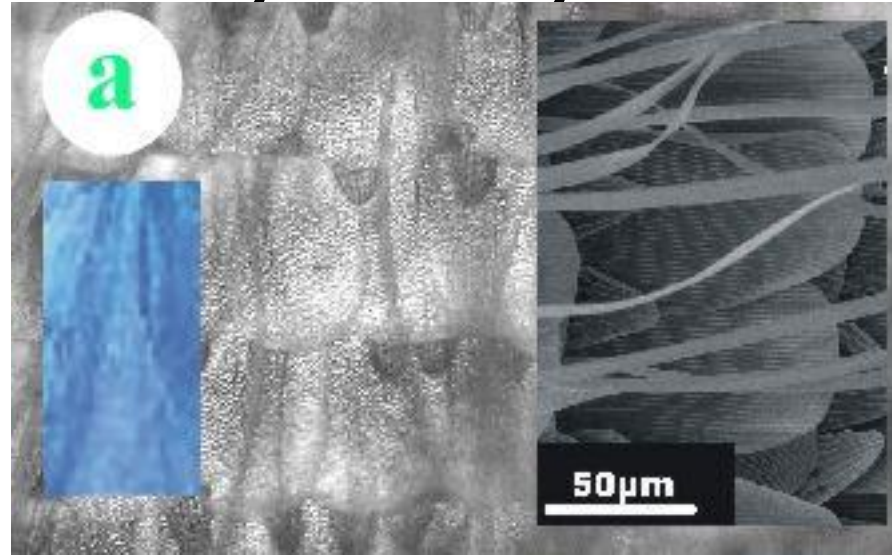


# Maszyna do teleportacji

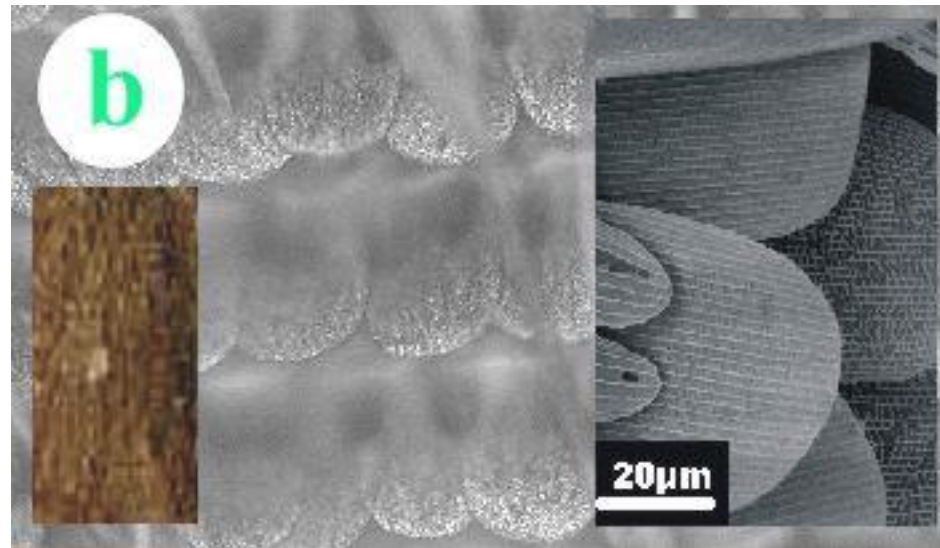


# Fotonika

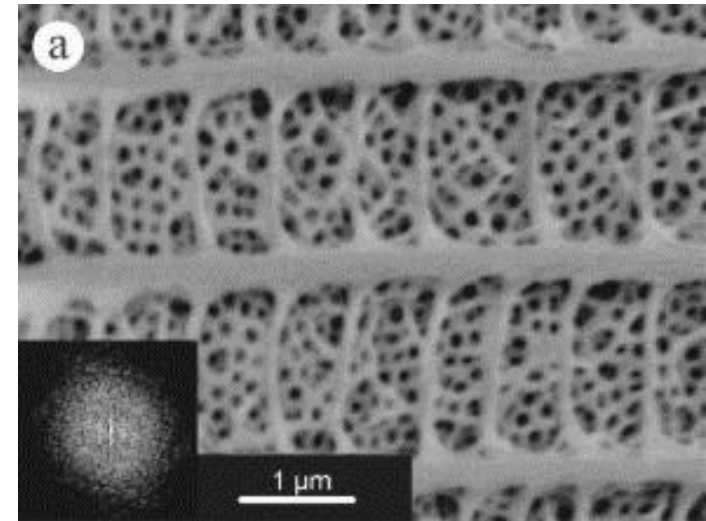
# Biologiczne kryształy fotoniczne



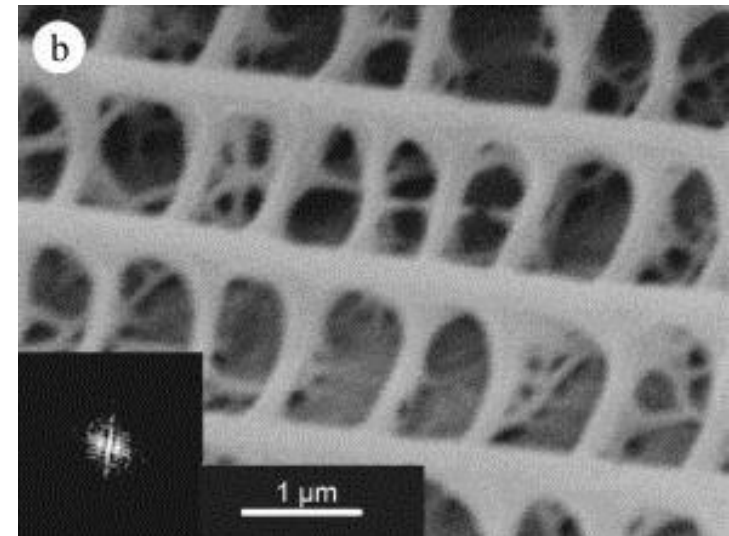
[http://www.mfa.kfki.hu/int/nano/online/2002\\_butterfly/](http://www.mfa.kfki.hu/int/nano/online/2002_butterfly/)



# Biologiczne kryształy fotoniczne



[http://www.mfa.kfki.hu/int/nano/online/2002\\_butterfly/](http://www.mfa.kfki.hu/int/nano/online/2002_butterfly/)



# Magnetic photonic crystals

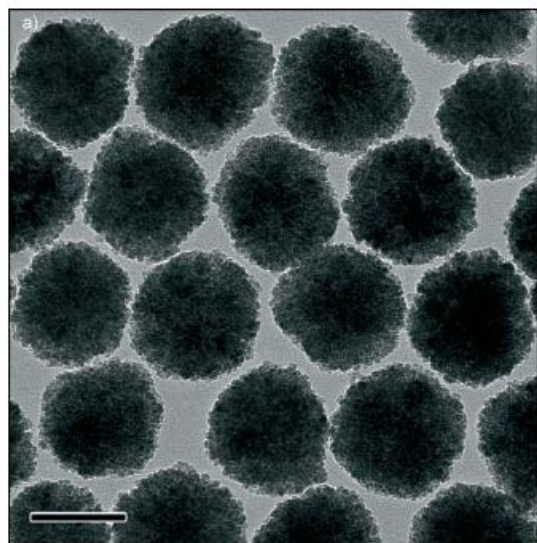
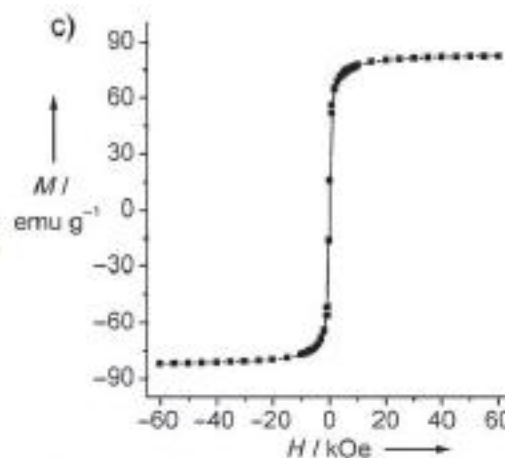
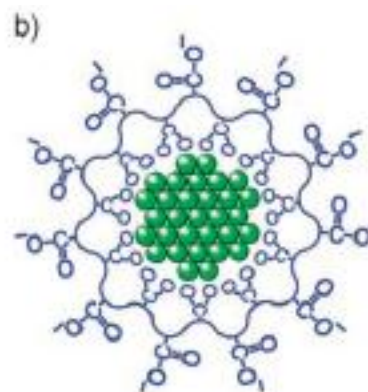
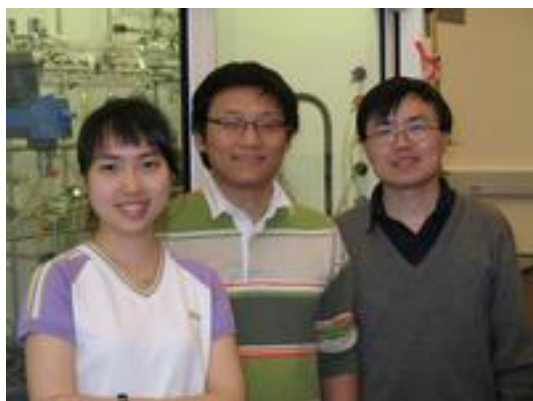
VIP Photonic Crystals

DOI: 10.1002/anie.200701992

## Highly Tunable Superparamagnetic Colloidal Photonic Crystals\*\*

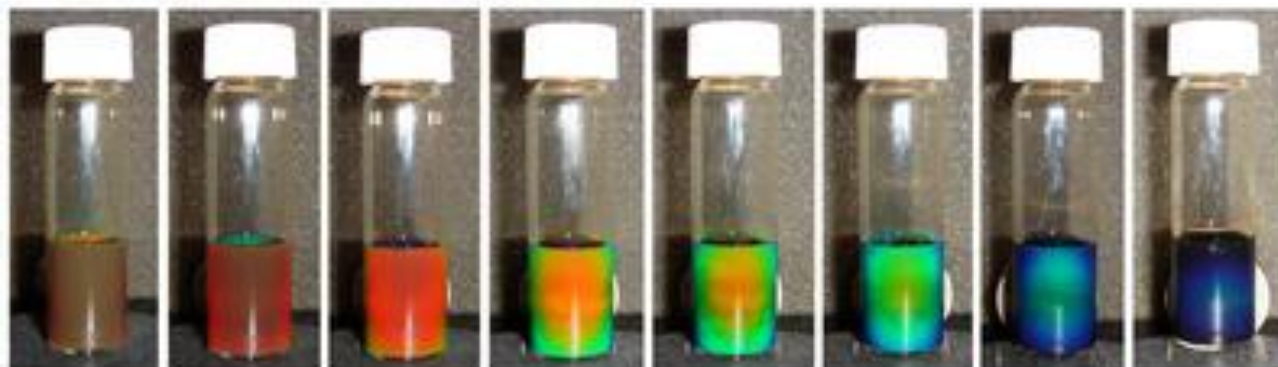
Jianping Ge, Yongxing Hu, and Yadong Yin\*

Angewandte  
Chemie



$\text{Fe}_3\text{O}_4$  120 nm

UC RIVERSIDE UNIVERSITY OF CALIFORNIA Newsroom





# Magnetic photonic crystals

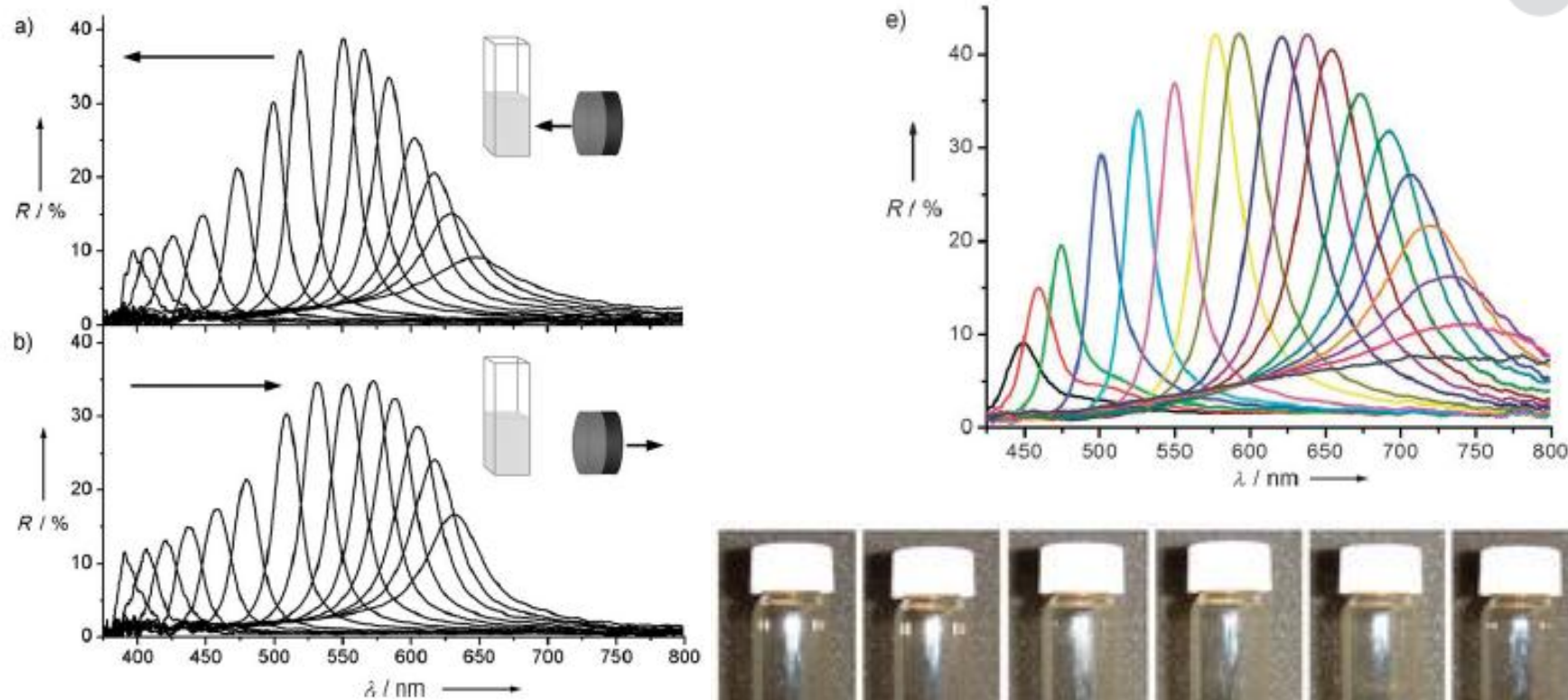
VIP Photonic Crystals

DOI: 10.1002/anie.200701992

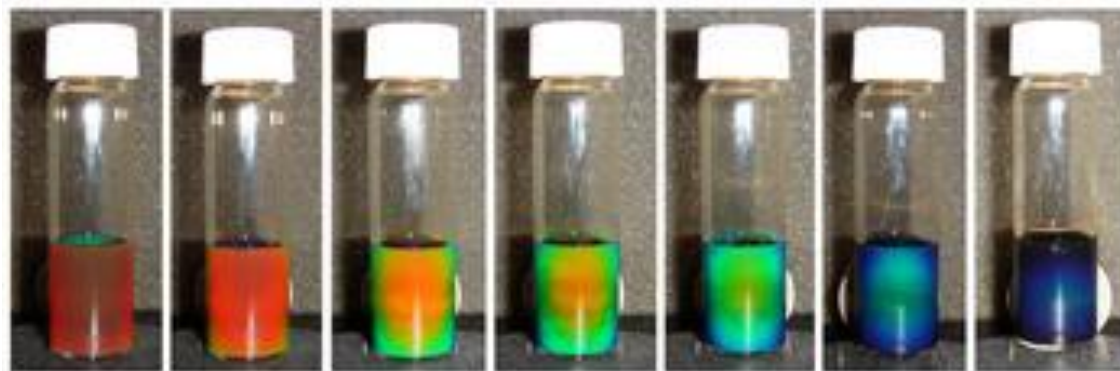
## Highly Tunable Superparamagnetic Colloidal Photonic Crystals\*\*

Jianping Ge, Yongxing Hu, and Yadong Yin\*

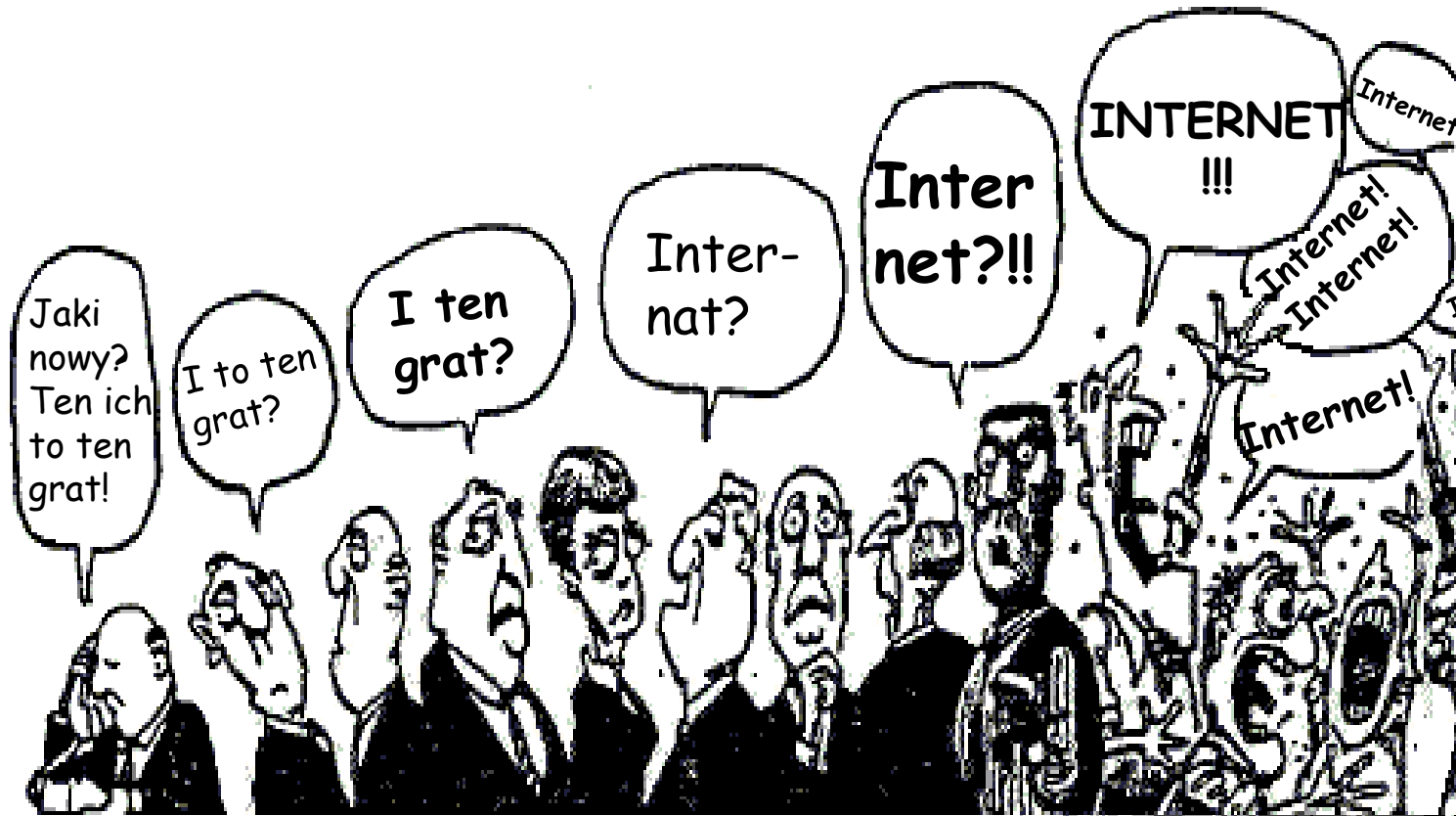
Angewandte  
Chemie



**Figure 3.** Reversible optical responses of 93-nm  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  colloidal photonic crystals to varying external magnetic field. Diffraction peaks blue-shift (a) as the magnet-sample distance decreases from 3.1 to 1.8 cm, and red shift (b) as the distance increases from 1.8 to 3.1 cm in step sizes of 0.1 cm in both cases.



# Podsumowanie



# Fizyka Materii Skondensowanej

[Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl](mailto:Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl)

[Konrad.Dziatkowski@fuw.edu.pl](mailto:Konrad.Dziatkowski@fuw.edu.pl)

<http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/FM>

S

 **inżynieria**  
nanostruktur



# Świat klasyczny i kwantowy

## Mechanika kwantowa:

Warunki początkowe

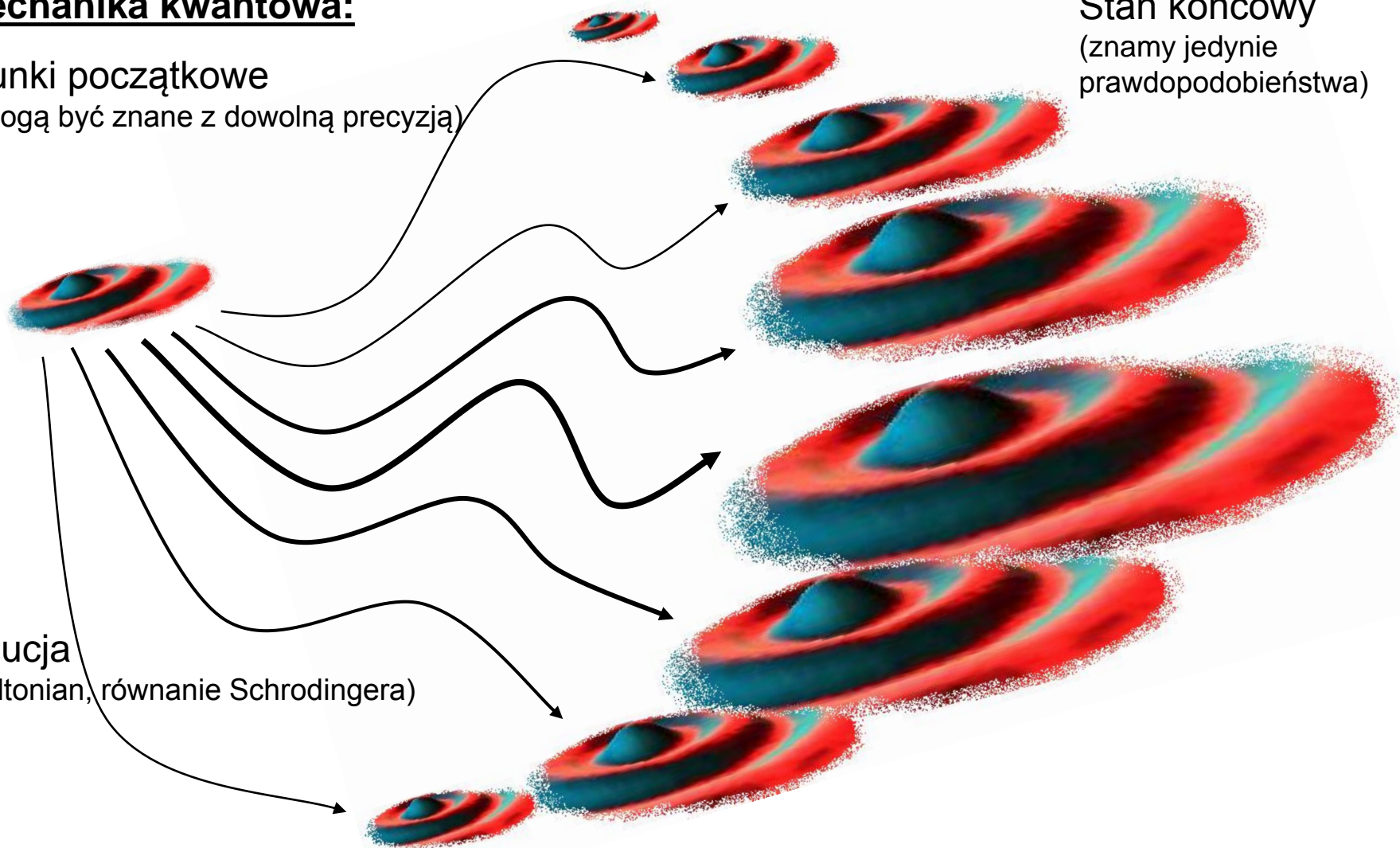
(nie mogą być znane z dowolną precyzją)

Stan końcowy

(znamy jedynie prawdopodobieństwa)

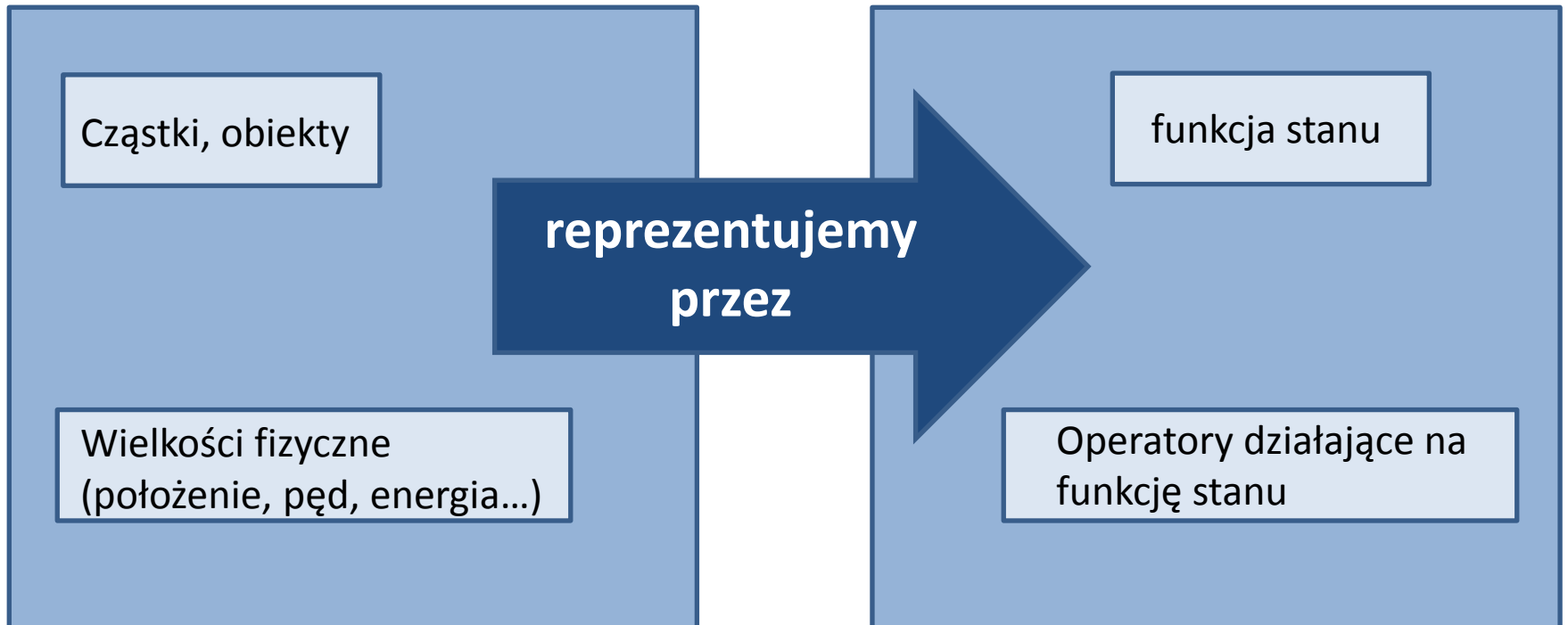
Ewolucja

(Hamiltonian, równanie Schrodingera)



# Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 1: funkcję falową określają m.in LICZBY KWANTOWE:  $\Psi_n(\vec{r}, t)$

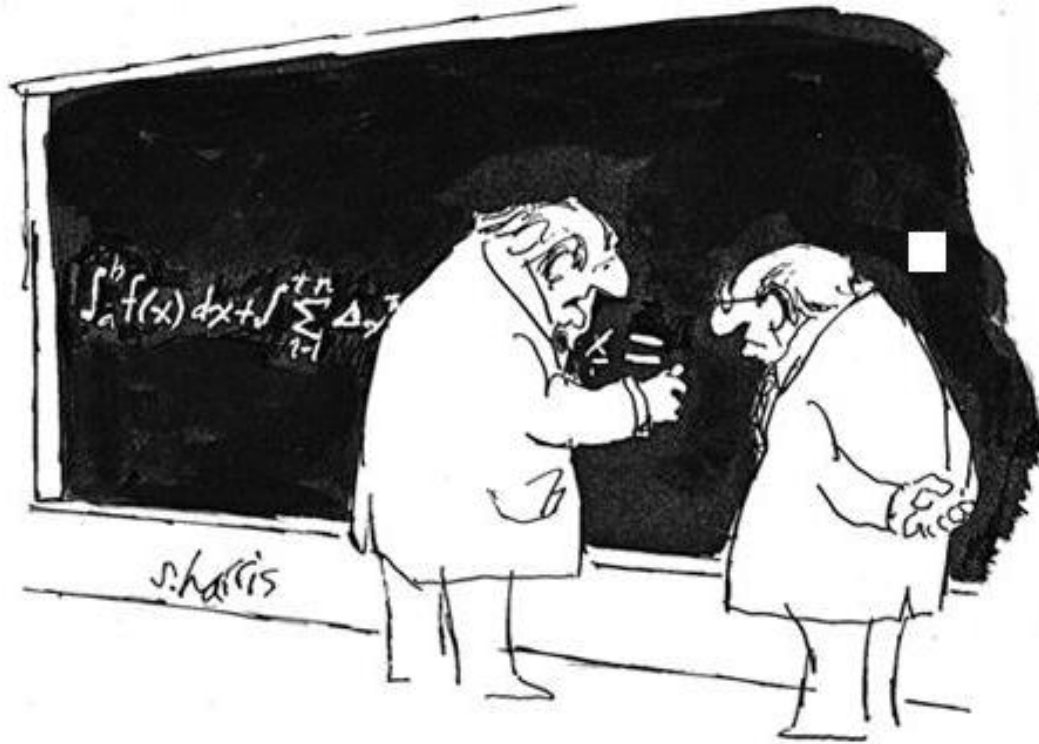


Co to jest OPERATOR?

# Rachunek zaburzeń

Pole magnetyczne, sprzężenie spin orbita, J, L, S

S. Harris



"THIS IS THE PART I ALWAYS HATE."

# Pole elektryczne

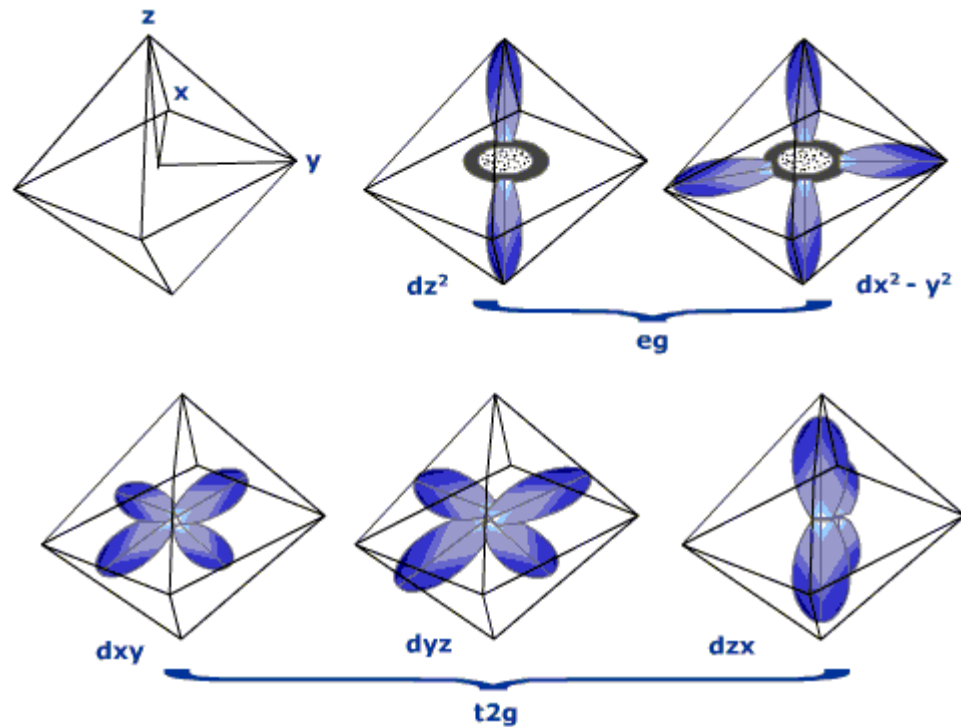
Efekt Starka dla atomu wodoru

Pole elektryczne  $E$

$$H' = \vec{p}\vec{E} = ezE_z$$

Moment dipolowy  $p$

Atom w polu ligandów:  
(symetria oktaedryczna)



# Co to jest spin?

- Spin?



Sebastian Münster, *Cosmographia* in 1544



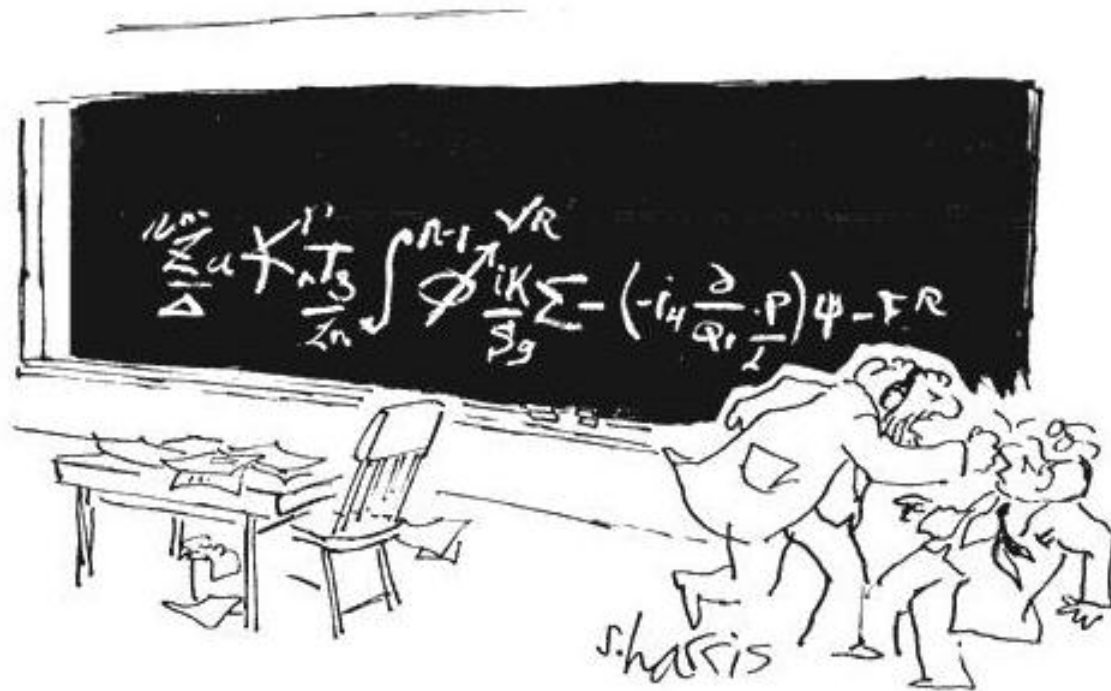
Disney



# Dipolowe przejścia optyczne.

## Reguły wyboru, czas życia

S. Harris



*"You want proof? I'll give you proof!"*

# PODSUMOWANIE – złota reguła Fermiego

Prawdopodobieństwo przejścia na jednostkę czasu:

$$W(t) = W \\ 0 \leq t \leq \tau$$

$$P_{mn} = \frac{w_{mn}}{\tau} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle m|W|n\rangle|^2 \delta(E_m - E_n)$$

Przejścia są możliwe tylko do stanów  $E_m = E_n$

$$W(t) = w^\pm e^{\pm i\omega t} \\ 0 \leq t \leq \tau$$

$$P_{nm} = \frac{w_{nm}}{\tau} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle n|w^\pm|m\rangle|^2 \delta(E_n - E_m \pm \hbar\omega)$$

Przejścia są możliwe tylko do stanów  $E_m = E_n \pm \hbar\omega$

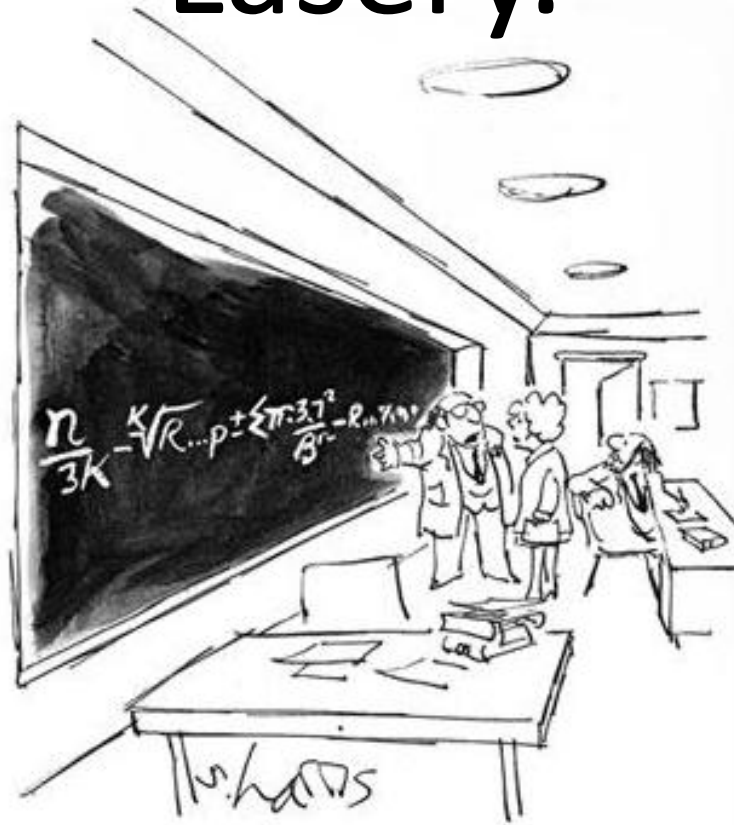
**Zaburzenie w postaci fali elektromagnetycznej.**

$$A_{nm} = \frac{\omega_{nm}^3 e^2}{3\pi\epsilon_0 \hbar c^3} |\langle m|\vec{r}|n\rangle|^2 = \frac{4\alpha}{3} \frac{\omega_{nm}^3}{c^2} |\langle m|\vec{r}|n\rangle|^2$$

$$P_{nm} = A_{nm} \delta(E_n - E_m \pm \hbar\omega)$$

# Wyprowadzenie prawa Plancka. Lasery.

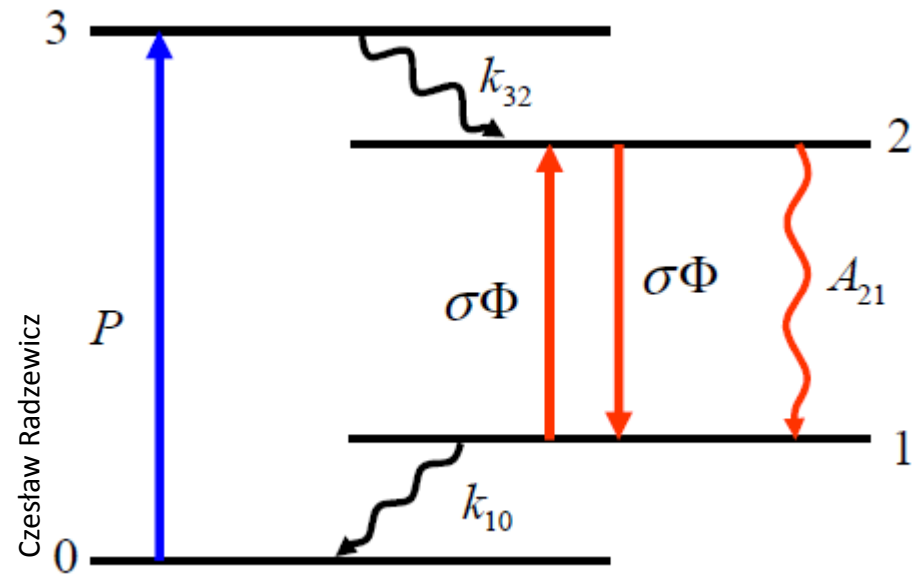
S. Harris



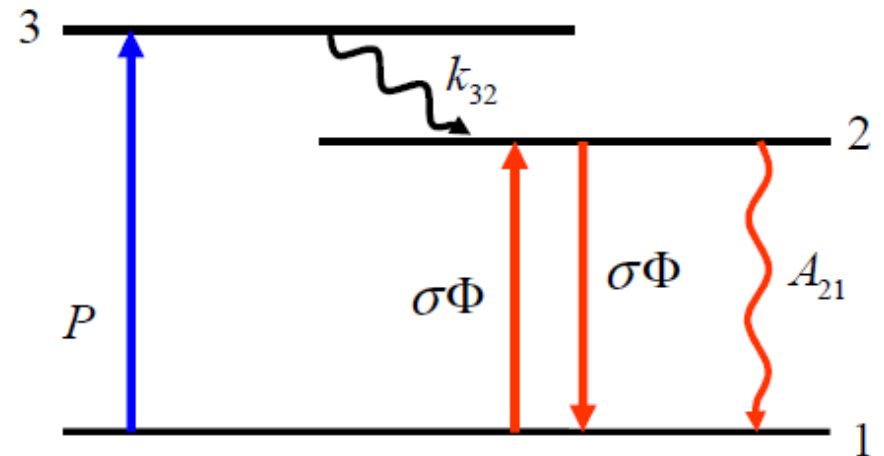
"BUT THIS IS THE SIMPLIFIED VERSION FOR THE GENERAL PUBLIC."

# Lasery

Lasery potrzebują co najmniej 3ch stanów



Rzadko stosowany laser 3-poziomowy



# Fala elektromagnetyczna

Zaburzenie w postaci fali elektromagnetycznej.

$$A_{nm} = \frac{\omega_{nm}^3 e^2}{3\pi\epsilon_0 \hbar c^3} |\langle m | \vec{r} | n \rangle|^2 = \frac{4\alpha}{3} \frac{\omega_{nm}^3}{c^2} |\langle m | \vec{r} | n \rangle|^2$$

W przypadku degeneracji stanów wprowadza się „siłę linii”

$$A_{nm} = \frac{4\alpha}{3} \frac{\omega_{nm}^3}{c^2} \frac{S_{mn}}{g_m} \quad S_{nm} = \sum_i \sum_j |\langle n_i | \vec{r} | m_j \rangle|^2$$

degeneracja poziomego wyjściowego

W przypadku stanów atomu wodoru wygodnie jest przedstawić operator  $\vec{r}$  w postaci kołowej:

$$|\langle n_i | \vec{r} | m_j \rangle|^2 = |\langle n_i | z | m_j \rangle|^2 + \frac{1}{2} |\langle n_i | x + iy | m_j \rangle|^2 + \frac{1}{2} |\langle n_i | x - iy | m_j \rangle|^2$$

łatwo jest wtedy całkować harmoniki sferyczne, bo:

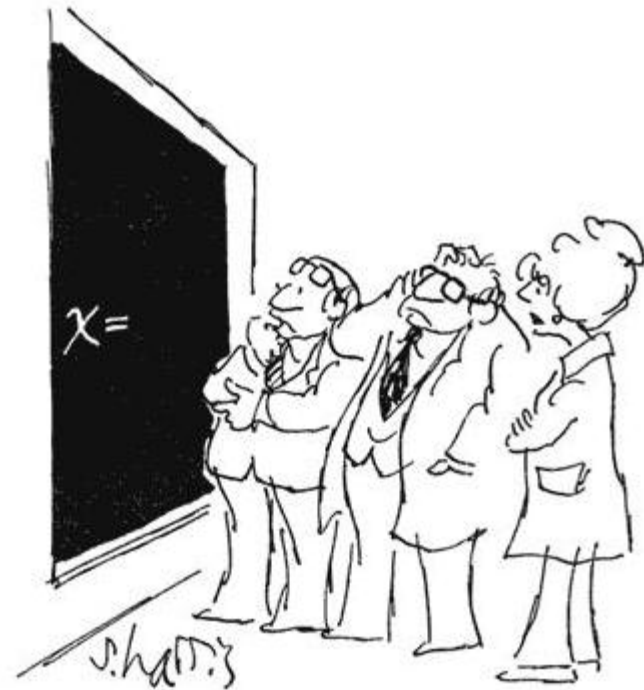
**Sprawdzić!**

$$z = r \cos \vartheta$$

$$x \pm iy = r e^{\pm i\varphi} \sin \vartheta$$

# Optyka - powtórzenie

- Propagacja fali elektromagnetycznej.
- Natężenie fali.
- Oddziaływanie fali e-m z ośrodkiem,
- Odbicie plazmowe,
- klasyczny współczynnik załamania,
- kształt linii widmowych, poszerzenia.



# Optyka - powtórzenie

Fala elektromagnetyczna w próżni	Fala elektromagnetyczna w dielektryku
<p>Równania Maxwella:</p> $\nabla \times \vec{E} = \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ $\nabla \times \vec{B} = \text{rot} \vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	<p>Równania Maxwella:</p> $\nabla \times \vec{E} = \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ $\nabla \times \vec{B} = \text{rot} \vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
<p><b>Ale w jaki sposób ośrodek oddziałuje z falą elektromagnetyczną? Czy <math>\varepsilon</math> (a więc <math>n</math>) jest stałe?</b></p>	
<p>Równanie:</p> $\Delta B = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$	<p>Równanie:</p> $\Delta B = \mu_0 \varepsilon_0 \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$
<p>Prędkość fali elektromagnetycznej:</p> $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	<p>Prędkość fali elektromagnetycznej:</p> $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \mu \varepsilon}} = \frac{c}{n}$
<p>Współczynnik załamania:</p> $n = 1$ $k = \frac{\omega}{c}$	<p>Współczynnik załamania:</p> $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu \varepsilon}$ $k = \frac{n \omega}{c}$

# Klasyczny model współczynnika załamania

## Fala w ośrodku (różnym):

$$\frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} + \gamma \frac{d\vec{x}}{dt} + \omega_0^2 \vec{x} = \frac{q\vec{E}}{m} e^{i\omega t}$$

Model Lorentza

$$\frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} + \gamma \frac{d\vec{x}}{dt} + \omega_0^2 \vec{x} = 0$$

Widmo emisji

$$\frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} + 0 + 0 = \frac{q\vec{E}}{m} e^{i\omega t}$$

Fala w plazmie

Rozwiązanie dla stanu ustalonego typu:

$$\vec{x} = \vec{x}_0 e^{i\omega t}$$



# Klasyczny model współczynnika załamania

## Zjawisko Mossbauera



The Nobel Prize in Physics 1961

“Explain it! The most important thing is, that you are able to explain it! You will have exams, there you have to explain it. Eventually, you pass them, you get your diploma and you think, that's it! – No, the whole life is an exam, you'll have to write applications, you'll have to discuss with peers... So learn to explain it! You can train this by explaining to another student, a colleague. If they are not available, explain it to your mother – or to your cat!”

Za Wikipedią



Rudolf Ludwig Mössbauer  
ur. 1929

# Wiązania chemiczne i cząsteczki

- Orbitale atomowe
  - $n$  – energia
  - $l$  – moment pędu
  - $s$  – spin
- Rydberg: 13,6 eV



*"What do you expect, since 90% of all the scientists who ever lived are alive today?"*

# Cząsteczki

## Hamiltonian wieloelektronowy

$$\hat{H}(\vec{r}, \vec{R})\Psi(\vec{r}, \vec{R}) = E\Psi(\vec{r}, \vec{R})$$

$$\hat{H} = \hat{T}_e + \hat{T}_N + V(\vec{r}, \vec{R})$$

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \sum_i \nabla_i^2 - \sum_N \frac{\hbar^2}{2M_N} \nabla_N^2 -$$

$i, j$  – elektrony  
 $N, K$  – atomy

$$-\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{N,i} \frac{Z_N e^2}{|\vec{r}_i - \vec{R}_N|} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{N < K} \frac{Z_N Z_K e^2}{|\vec{R}_N - \vec{R}_K|} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i < j} \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$

# Cząsteczki

## Przybliżenia

$$[\hat{T}_N + E_{el}^n(\vec{R})]\chi^n(\vec{R}) = E\chi^n(\vec{R})$$

Energia kinetyczna drgań (oscylacji) i rotacji (obrotów) separują się, ponieważ zakładamy drgania i powolne obroty.

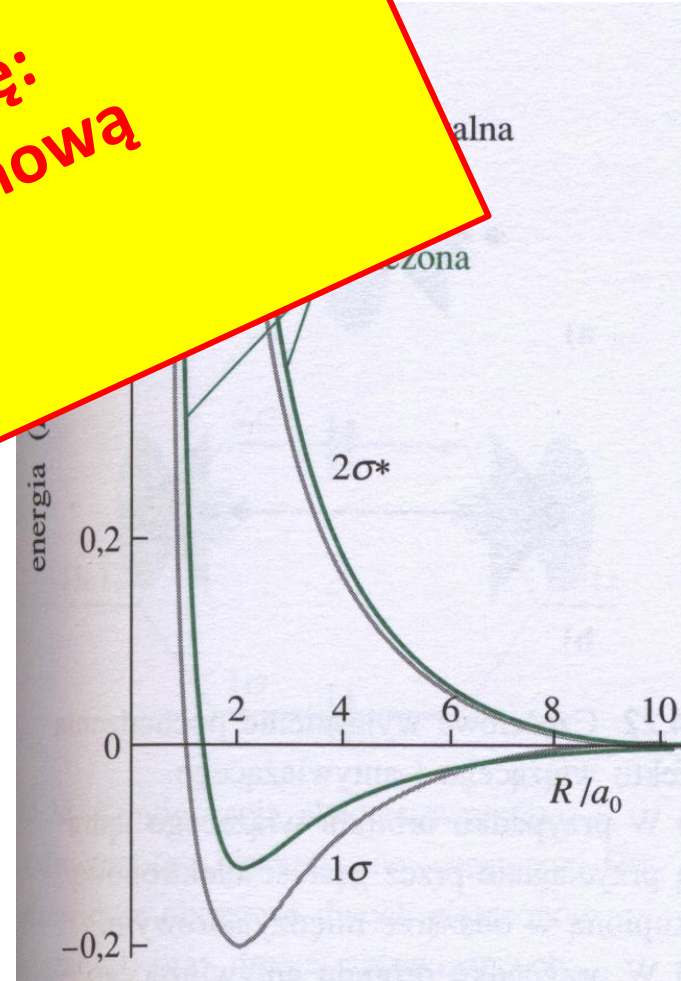
$$[\hat{T}_{osc} + \hat{T}_{rot} + \Delta E_{el}(\vec{R})]$$

Operatory działają niezależnie, możemy rozdzielić

- Po kolei zajmujemy się:
- Strukturą elektronową
  - Rotacjami
  - Oscylacjami

$$\Psi = \chi_{el} \chi_{osc} \chi_{rot}$$

$$E = E_{el} + E_{osc} + E_{rot}$$

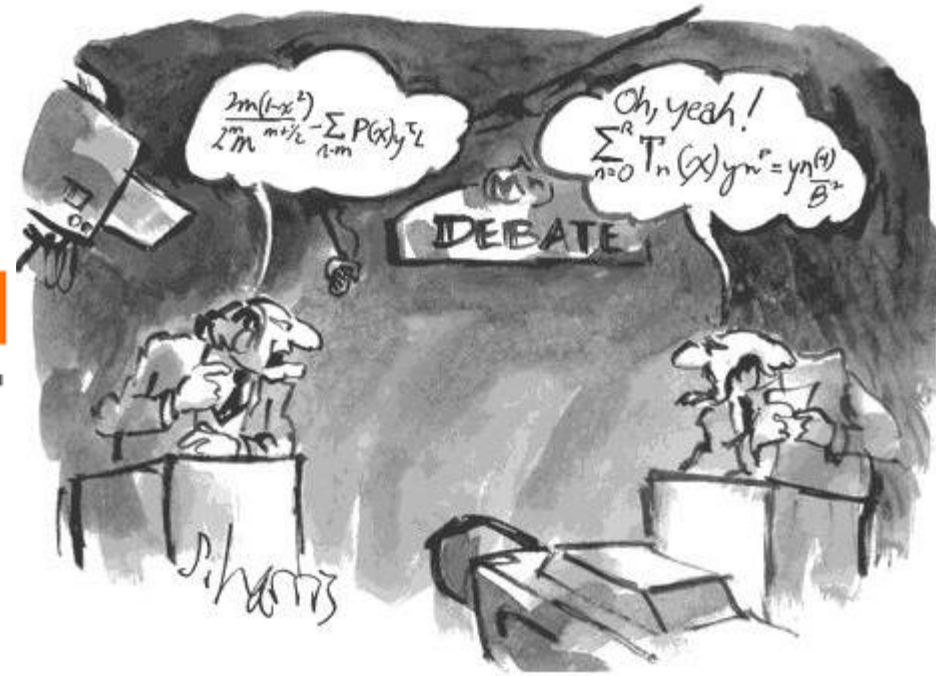


# Przejścia optyczne w cząsteczkach

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

<http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/NT>

**N**inżynieria  
nanostruktur



<http://www.sciencecartoonsplus.com/>

Podziękowania za pomoc w przygotowaniu zajęć:

Prof. dr hab. Paweł Kowalczyk

Prof. dr hab. Dariusz Wasik

Uniwersytet Warszawski

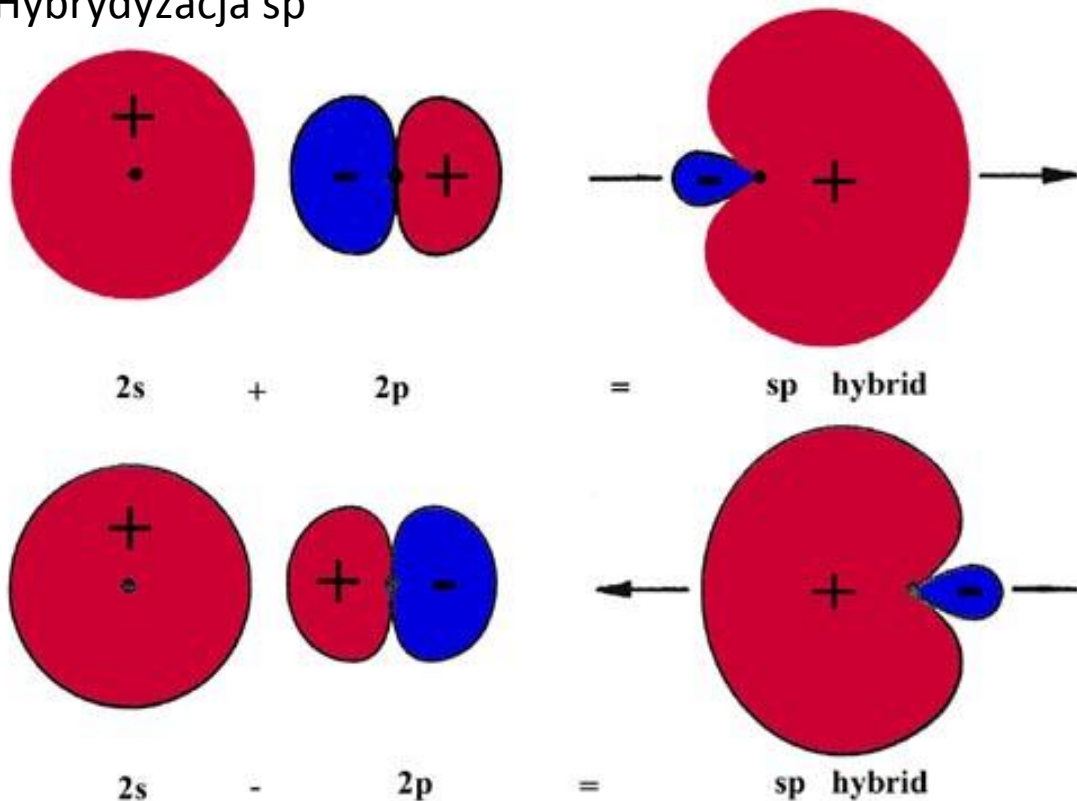
2011

# Cząsteczki

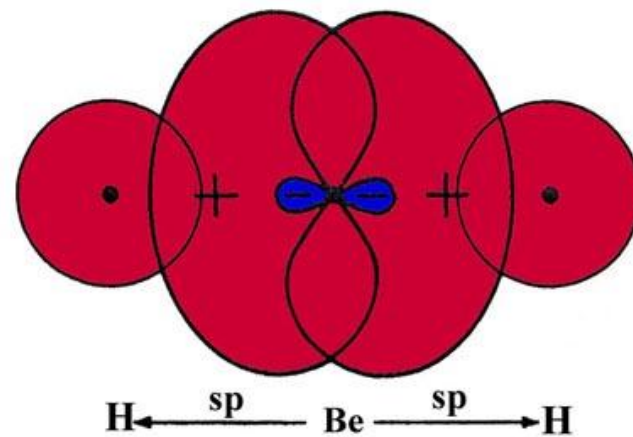
## Hybrydyzacja sp i całki przykrycia

Kąty między wiązaniami wodoru wynoszą 180°.

Hybrydyzacja sp



Wodorek Berylu  $\text{BeH}_2$



$$h_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} s - \frac{1}{\sqrt{2}} p_x$$
$$h_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} s + \frac{1}{\sqrt{2}} p_x$$

# Cząsteczki

## Hybrydyzacja i całki przykrycia

Kąty między wiązaniami wodoru wynoszą  $109,5^\circ$ .

Hybrydyzacja  $sp^3$

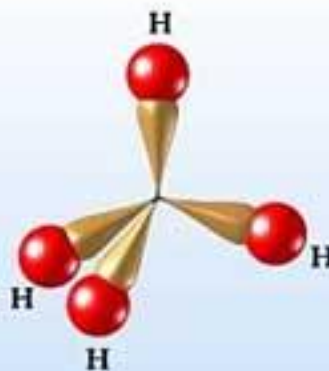
$$h_1 = \frac{1}{2}(s + p_x + p_y + p_z)$$

$$h_2 = \frac{1}{2}(s + p_x - p_y - p_z)$$

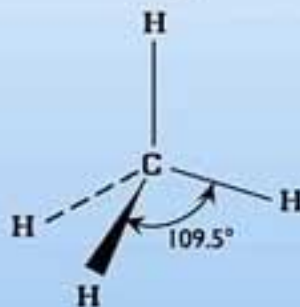
$$h_3 = \frac{1}{2}(s - p_x + p_y - p_z)$$

$$h_4 = \frac{1}{2}(s - p_x - p_y + p_z)$$

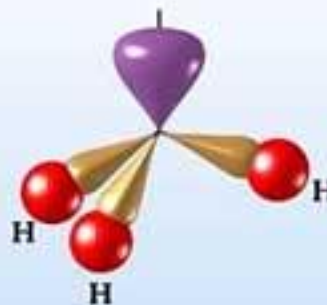
Metan  $CH_4$



$CH_4$



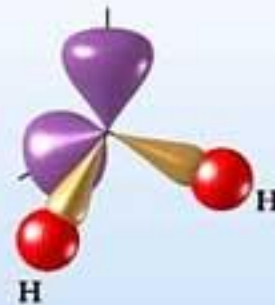
Amoniak  $NH_3$



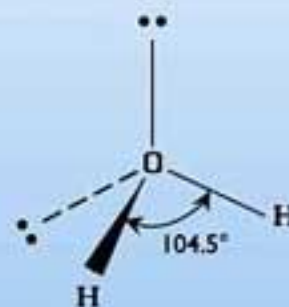
$NH_3$



Woda  $H_2O$



$H_2O$



# Materia skondensowana

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

<http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/NT>

**Inżynieria**  
nanostruktur



Podziękowania za pomoc w przygotowaniu zajęć:

Prof. dr hab. Paweł Kowalczyk

Prof. dr hab. Dariusz Wasik

Uniwersytet Warszawski

2011

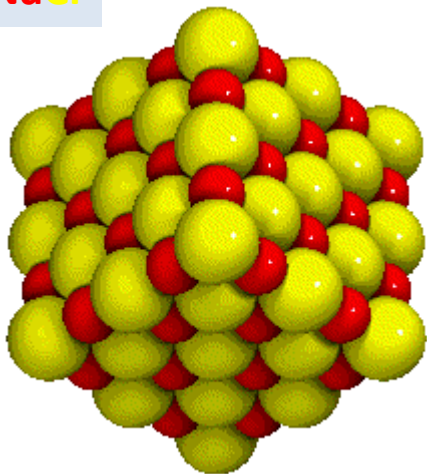


# Rodzaje wiązań

## Wiązanie jonowe

**Elektroujemność** (ozn.  $\chi$ ) - zdolność atomu w cząsteczce do przyciągania (przyłączania) elektronu. W skrajnym przypadku, gdy elektroujemności obu pierwiastków bardzo się różnią (np. Li i F), dochodzi do pełnego przeskoiku elektronów na bardziej elektroujemny atom, co prowadzi do powstania wiązania jonowego ( $\Delta\chi \geq 1,7$ ).

NaCl



Tablica 2.4. Wartości elektroujemności (wg Paulinga) dla kilku ważniejszych pierwiastków (dla H przyjęto 2,1)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Li 1,0	Be 1,5	B 2,0	C 2,5	N 3,0	O 3,5	F 4,0
Na 0,9	Mg 1,2	Al 1,5	Si 1,8	P 2,1	S 2,5	Cl 3,0
K 0,8	Ca 1,0	Ga 1,6	Ge 1,7	As 2,0	Se 2,4	Br 2,8
Rb 0,8			Sn 1,7			J 2,4

Jonowość

Jonowość

# Struktura krystaliczna

## Sieci Bravais

**Przykład:** struktura najgęstszego upakowania




# Krystalografia

## Czynnik atomowy

Np. rozkład elektronów o symetrii kulistej

gęstość ładunku



$$f = -\frac{1}{e} \int \rho_e(\vec{\xi}) \exp(-i\Delta\vec{k}\vec{\xi}) d^3\xi = -\frac{1}{e} 2\pi \int \xi^2 \rho_e(\xi) \exp(-i\Delta k \xi \cos\theta) d\xi d(\cos\theta) =$$
$$= -\frac{2\pi}{e} \int \xi^2 \rho_e(\xi) \frac{\exp(i\Delta k \xi) - \exp(-i\Delta k \xi)}{i\Delta k \xi} d\xi = -\frac{4\pi}{e} \int \xi^2 \rho_e(\xi) \frac{\sin(\Delta k \xi)}{\Delta k \xi} d\xi$$

Dla małych kątów rozproszeń  $\Delta k \xi \rightarrow 0$   $f = -Z$

Atomowy czynnik rozpraszania  $f$  oznacza stosunek amplitudy promieniowania rozproszonego przez **rzeczywisty rozkład elektronów** w atomie do amplitudy promieniowania rozproszonego przez **jeden elektron punktowy**.

# Studia II stopnia IN

Studia II stopnia na makrokierunku „Inżynieria nanostruktur” odbywają się w ramach trzech ścieżek kształcenia:

- **Fotonika (Photonics),**
- **Modelowanie Nanostruktur i Nowych Materiałów (MONASTR) (Modeling of Nanostructures and Novel Materials), Nanotechnologie**
- **Charakteryzacja Nowych Materiałów (NiChNM) (Nanotechnologies and the Characterization of Novel Materials).**

Studenci mają do wyboru zajęcia profilowane na zdobycie specjalistycznego wykształcenia związanego z nanotechnologiami, zagadnieniami będącymi aktualnymi problemami naukowymi i realizacji programu studiów II stopnia we współpracy z grupami badawczymi.



# Studia II stopnia IN



Po pierwszym semestrze II etapu studiów, studenci mogą wybrać ścieżkę kształcenia. W tym celu muszą udać się do opiekuna danej ścieżki, który przedstawi możliwości wykonywania prac magisterskich oraz ich opiekunów. Opiekun będzie ustalał z każdym studentem indywidualny program studiów w zakresie wybieranych przedmiotów



**Nowe wyzwania - nowe kierunki. Rozwój kierunków interdyscyplinarnych dla potrzeb gospodarki opartej na wiedzy**

- Stypendia – 1000 zł/mies
- Wyjazdy na dowolne konferencje w Europie
- Zajęcia doskonalące i warsztaty naukowe
- Pomoc w znalezieniu zatrudnienia

# Elektrony w kryształach – funkcja Blocha, pasma.

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

<http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/NT>

**inżynieria**  
nanostruktur



s

s

# Podstawy modelu jednoelektronowego

## Twierdzenie Blocha

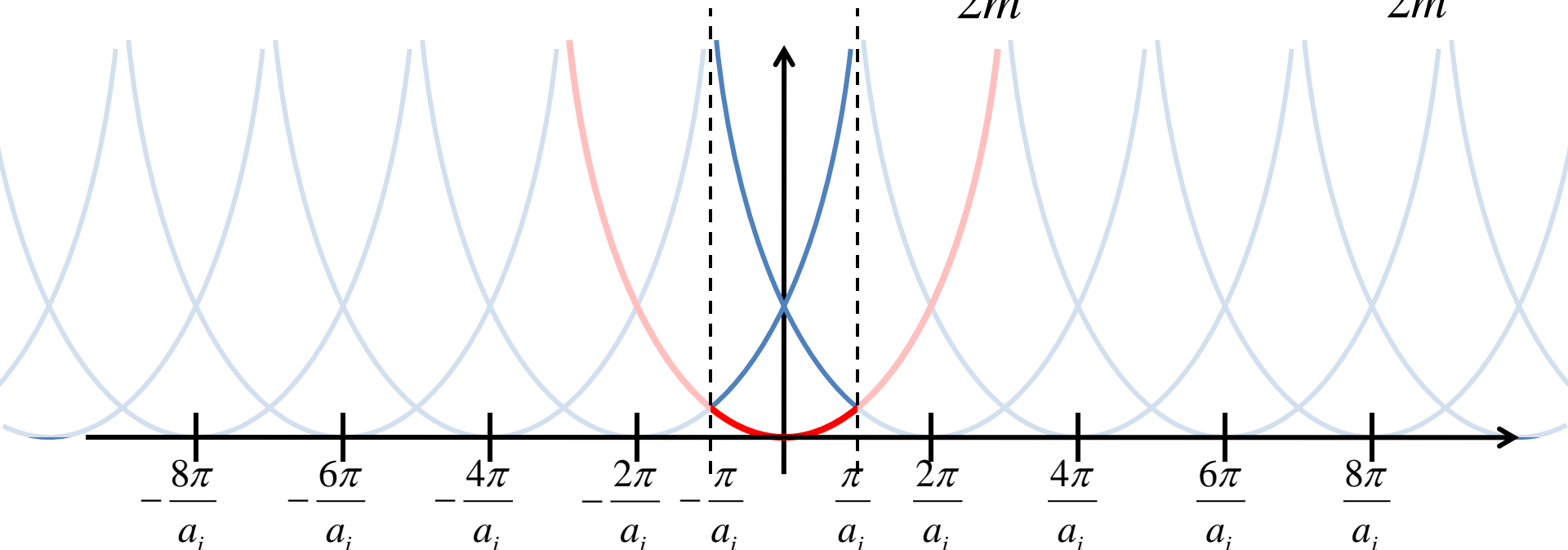
Wartości własne energii są periodyczną funkcją liczby kwantowej  $k$ .  $\vec{G} = h\vec{g}_1 + k\vec{g}_2 + l\vec{g}_3$

$$E(n, \vec{k}) = E(n, \vec{k} + \vec{G})$$

$$g_i = \frac{2\pi}{a_i}$$

**Model prawie swobodnych elektronów** – dla fali płaskiej w pustej przestrzeni energia od wektora falowego wyraża się wzorem:

$$E(n=1, \vec{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = E(\vec{k} + \vec{G}) = \frac{\hbar^2 (\vec{k} + \vec{G})^2}{2m}$$



# Elektrony i dziury.

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

<http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/NT>

**N**inżynieria  
nanostruktur





# Podstawy modelu jednoelektronowego

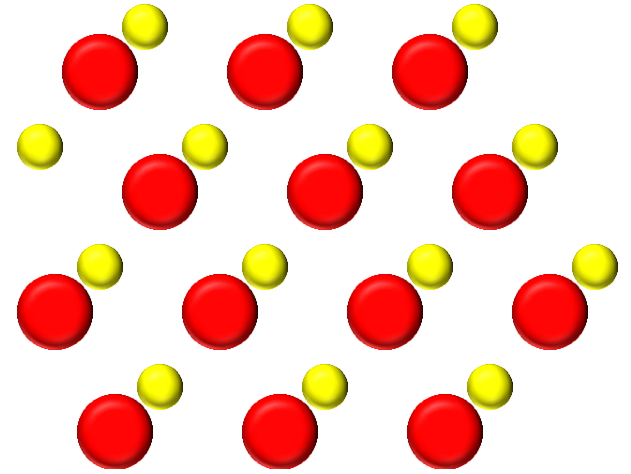
## Twierdzenie Blocha

Jeśli potencjał jest periodyczny  $V(\vec{r}) = V(\vec{r} + \vec{R})$   
to rozwiązania równania Schrodingera

$$\left( \frac{\vec{p}^2}{2m_0} + V(\vec{r}) \right) \Psi(\vec{r}) = E \Psi(\vec{r})$$

mają postać:  $\Psi_{n,\vec{k}}(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\vec{r}} u_{n,\vec{k}}(\vec{r})$

Wektory sieci Bravais

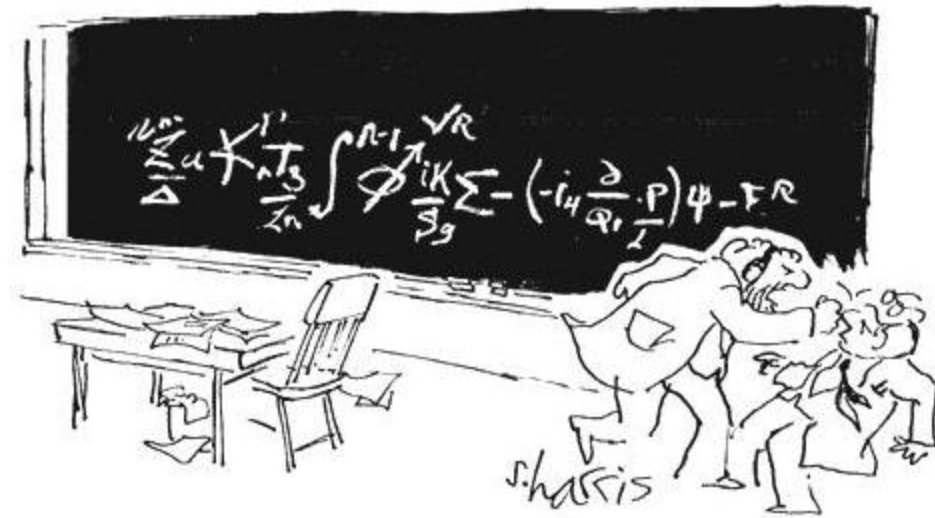


gdzie tzw. f. Blocha:  $u_{n,\vec{k}}(\vec{r}) = u_{n,\vec{k}}(\vec{r} + \vec{R})$

$$\psi_{n,\vec{k}+\vec{G}}(\vec{r}) = \psi_{n,\vec{k}}(\vec{r})$$

$$E(n, \vec{k}) = E(n, \vec{k} + \vec{G})$$

$$\hat{p}\psi(\vec{r}) = -i\hbar(i\vec{k} + \nabla u_{n,\vec{k}})e^{i\vec{k}\vec{r}} \neq \hbar\vec{k}\psi(\vec{r})$$

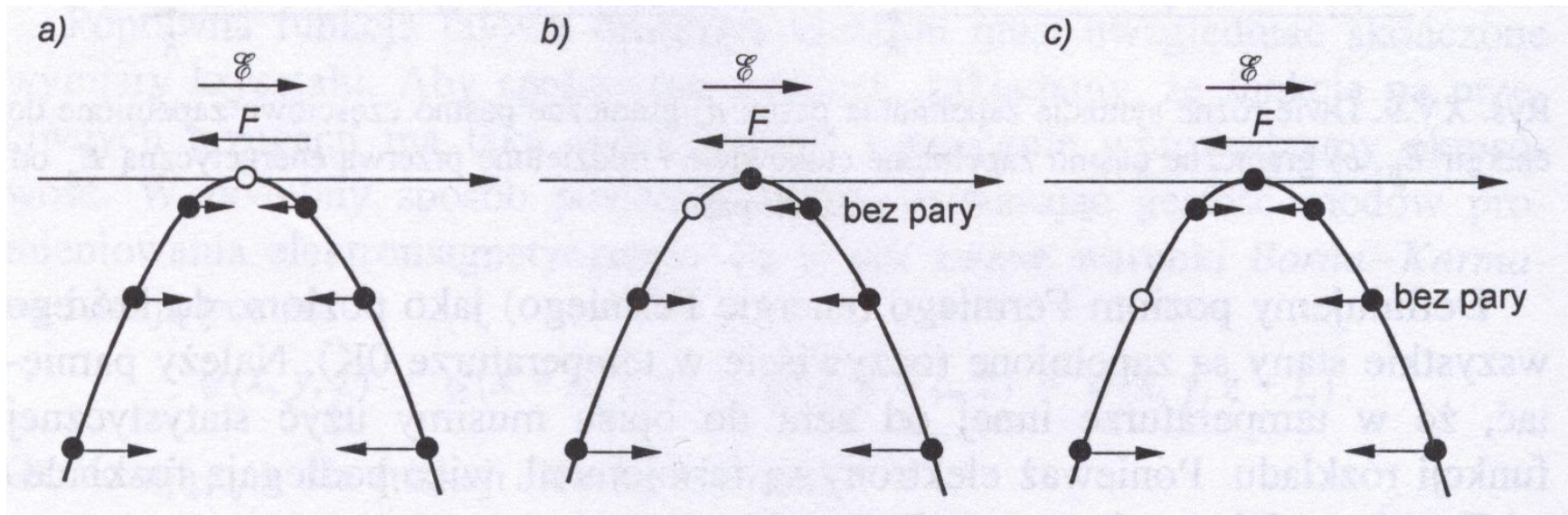


"You want proof? I'll give you proof!"

# Elektrony i dziury

## Kwazicząstki - dziury

Dla opisu sumarycznych właściwości tych  $2N-1$  elektronów wprowadzamy pojęcie nowej kwazicząstki - dziury. Dziura quasi cząstka z dodatnią masą efektywną, która opisuje właściwości zbioru elektronów w ciele stałym o masie ujemnej z jednym stanem pustym.



Pole elektryczne  $E$

$$\vec{j} = -e\vec{v}_{e\text{-bez-pary}}$$

$$\vec{j} = +e\vec{v}_{e\text{-w-pustym-miejscu}}$$

$$\vec{v}_h = \vec{v}_{e\text{-w-pustym-miejscu}}$$

# Półprzewodniki (ang. semiconductors).

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

<http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/NT>

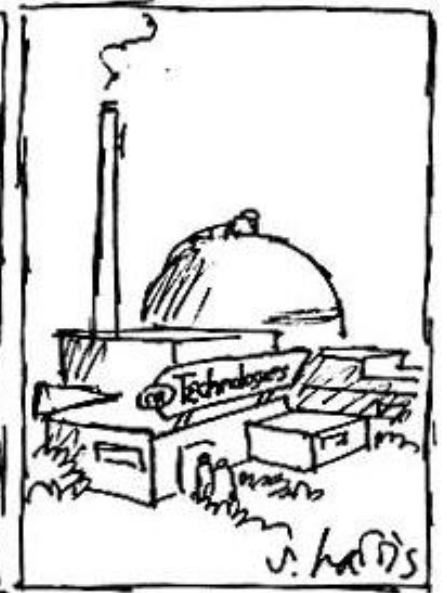
**inżynieria**  
nanostruktur



BIG SCIENCE



LITTLE SCIENCE



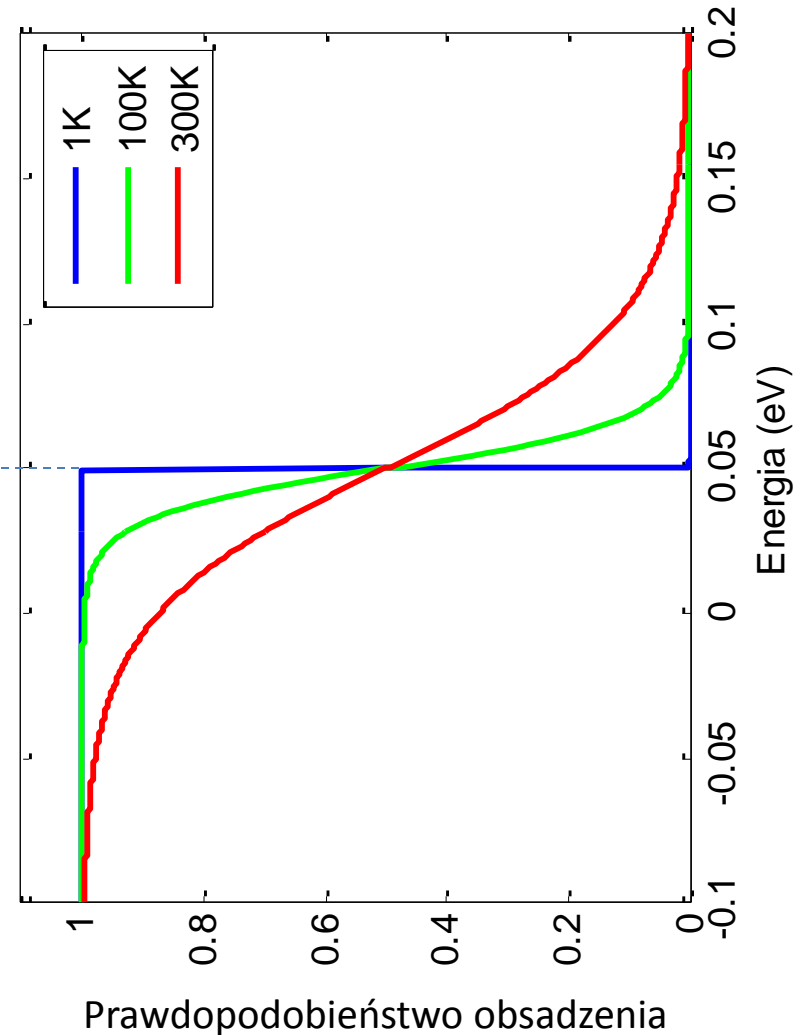
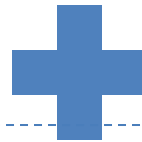
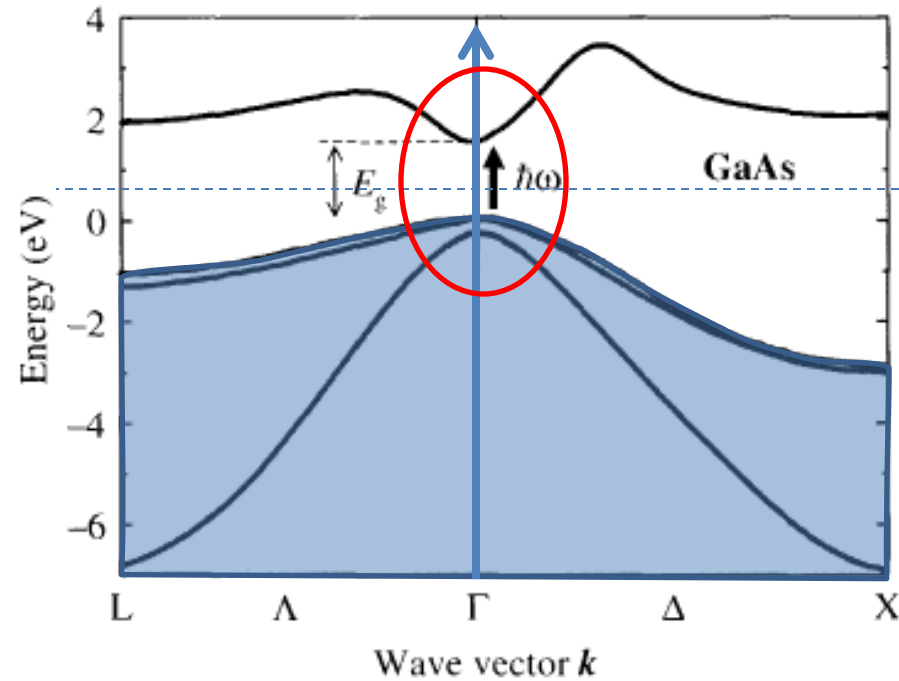
# Funkcja rozkładu

## Rozkład Fermiego-Diraca

Prawdopodobieństwo obsadzenia stanu kwantowego o energii  $E$

$E_F$  – potencjał chemiczny

$$f_0 = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1}$$



# Elektrony i dziury

## Gęstość stanów

Często wygodniejsza jest znajomość gęstości stanów w przestrzeni energii  $E$  (a więc ilość stanów w przedziale  $(E, E+dE)$ ). Dla pasma sferycznego i parabolicznego:

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad \rho_k = 2 \left( \frac{1}{2\pi} \right)^3 \leftarrow \text{przypadek 3D}$$

gęstość stanów liczymy jako:

**Do domu: znajdź  $N(E)$**

$$\rho_k = 2 \left( \frac{1}{2\pi} \right)^2 \leftarrow \text{przypadek 2D}$$

$$\rho_k = \frac{2}{2\pi} \leftarrow \text{przypadek 1D}$$

