

Nanotechnologia

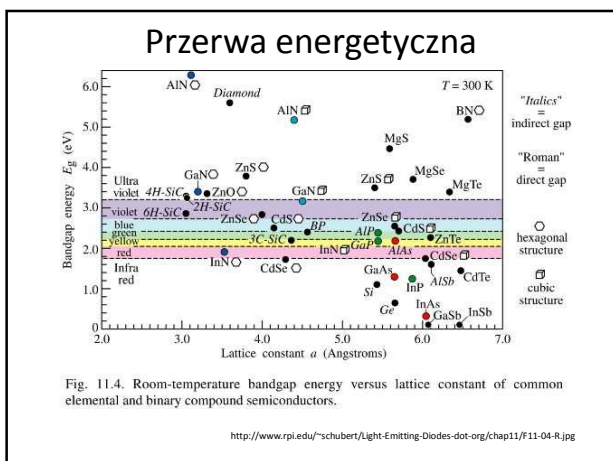
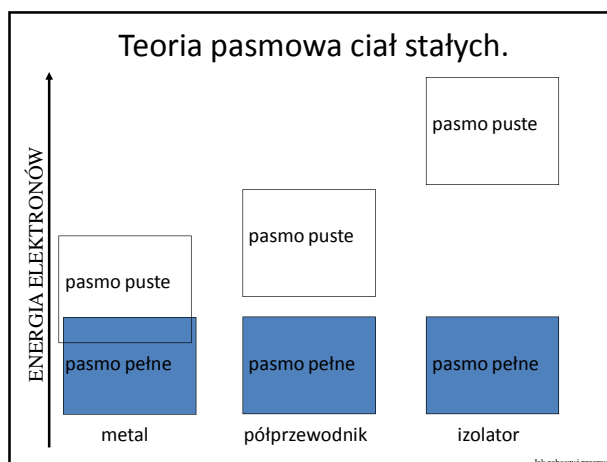
Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl
http://www.fuw.edu.pl/~szcztyko/NT




36 atomów kobaltu na podłożu z miedzi tworzy „korale kwantowe”. Elektron na powierzchni miedzi oddziałując z atomem kobaltu umieszczonym w ognisku elipsy tworząc „kwantowy miraż”.

Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego

Uniwersytet Warszawski 2010




Funkcja rozkładu


Rozkład Fermiego-Diraca

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

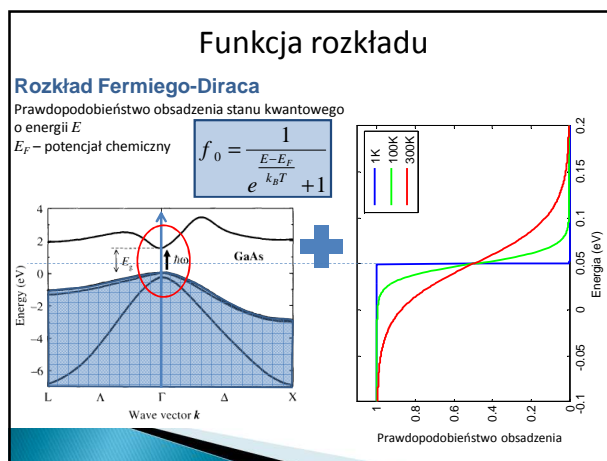
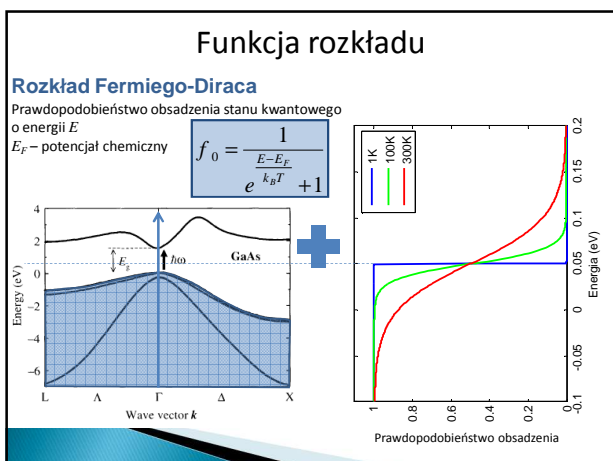
Prawdopodobieństwo obsadzenia

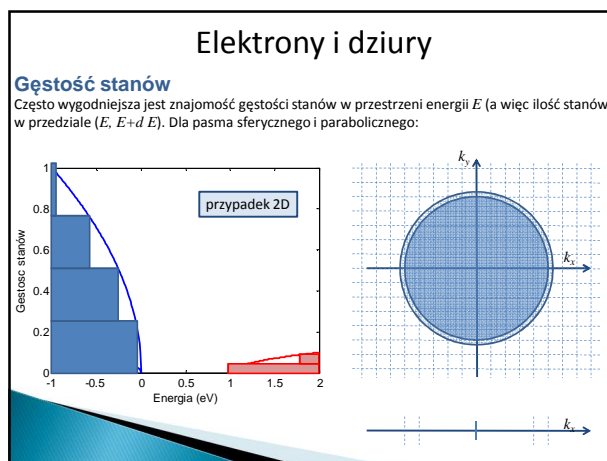
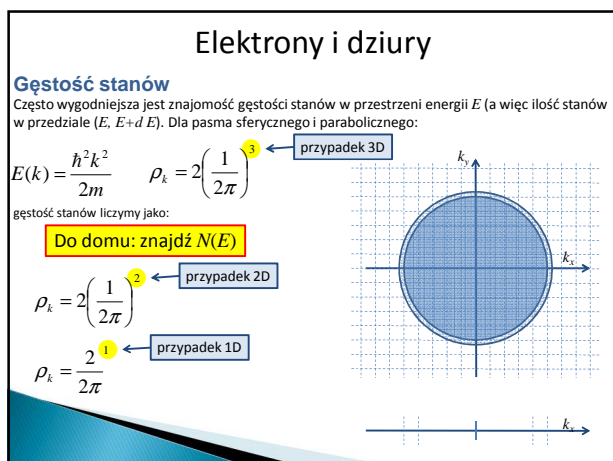
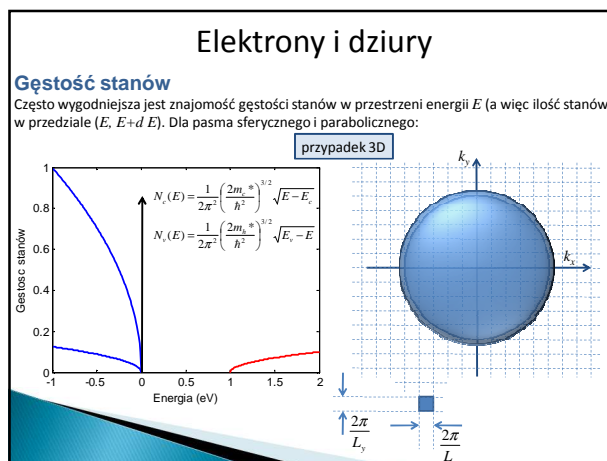
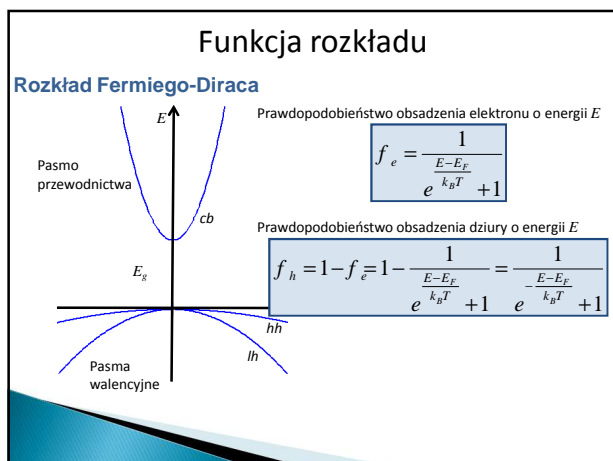
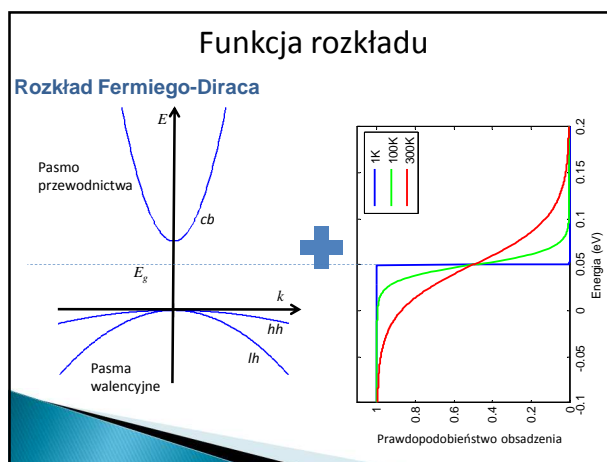
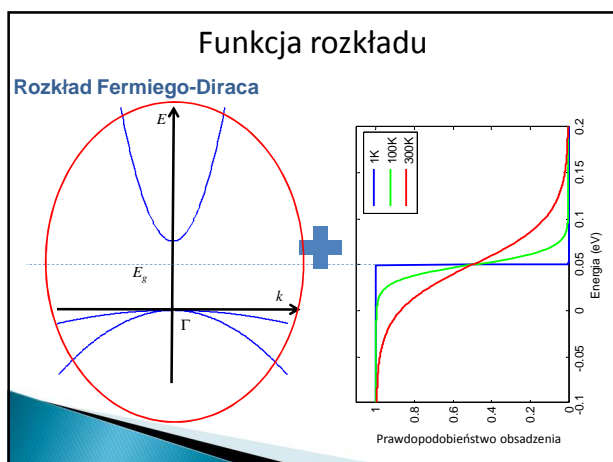


Enrico Fermi
1901 – 1954



Paul Adrien Maurice Dirac
1902 – 1984





Koncentracja samoistna

Jaka jest koncentracja nošników dla T>0?

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

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

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

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

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

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

Koncentracja samoistna

Jaka jest koncentracja nošników dla T>0?

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

$$n = p = n_i$$

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

$$n = 2 \left(\frac{m_c^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F - E_g}{k_B T}} = N_c e^{\frac{E_F - E_g}{k_B T}}$$

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

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

Koncentracja samoistna

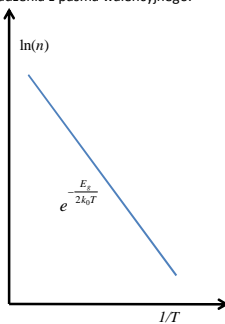
Jaka jest koncentracja nošników dla T>0?

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

$$n = p = n_i$$

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

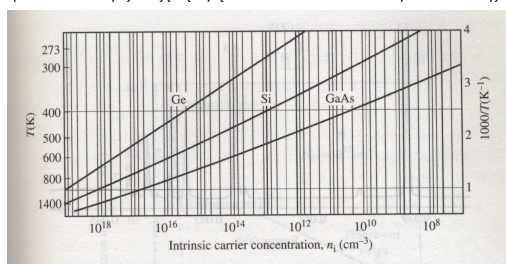
$$n = p = 2 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_c^* m_h^*)^{3/4} e^{\frac{E_g}{2k_B T}} = \sqrt{N_c N_v} e^{\frac{E_g}{2k_B T}}$$



Koncentracja samoistna

Jaka jest koncentracja nošników dla T>0?

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



J. Singleton

Koncentracja samoistna

Jaka jest koncentracja nošników dla T>0?

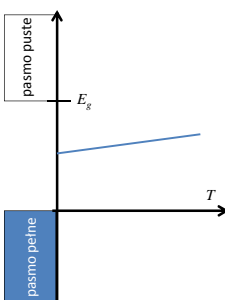
W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

$$n = p = n_i$$

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

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

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



Koncentracja samoistna

Jaka jest koncentracja nošników 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

Eg \ T	77K	300K	1200K	material
0,25eV	10 ⁸ cm ⁻³	10 ¹⁶ cm ⁻³	10 ¹⁸ cm ⁻³	InSb PbSe
1eV	-	10 ¹⁰ cm ⁻³	10 ¹⁷ cm ⁻³	Ge, Si, GaAs
4eV	-	-	10 ¹¹ cm ⁻³	ZnS, SiC, GaN, ZnO, C (diament)

K. Singleton

W powyższej tabelce wartości poniżej 10¹⁰ cm⁻³ nie mają sensu gdyż koncentracja zanieczyszczeń, a co za tym idzie koncentracja wynikająca z nieintencjonalnego domieszkania jest większa

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

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

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 znaczne zmiany koncentracji i typu przewodnictwa (elektrony lub dziury).

Domieszki i defekty

Nośniki: dziury (+), elektrony (-)

Domieszki: Akceptory (typ p), Donory (typ n)

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 ← →

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

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:

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

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

	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

Wyprowadzenie „klasyczne”

Orbitalny moment pędu:

$$L_n = m^* v_n r_n = m^* r_n^2 \omega_n = n \hbar$$

Potencjał kulombowski i siła dośrodkowa

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r_n^2} = \frac{m^* v_n^2}{r_n} = m^* \omega_n^2 r_n$$

Przy tablicy

	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 ϵ i małą „poprawką” do potencjału.

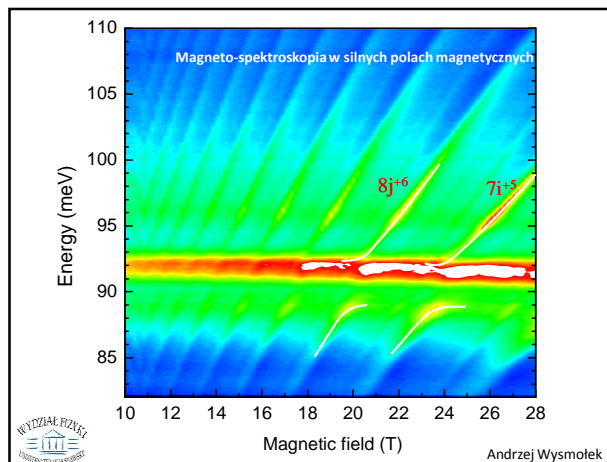
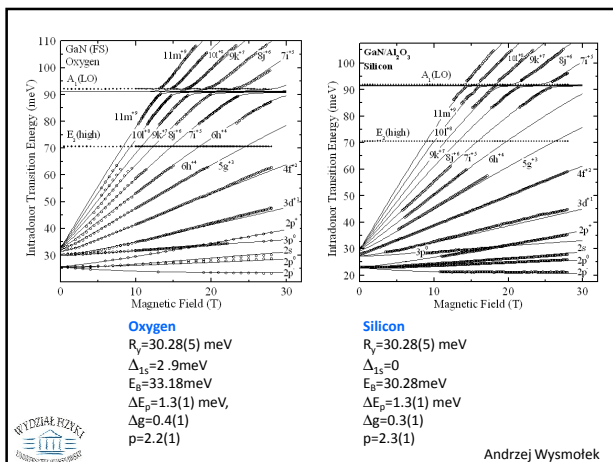
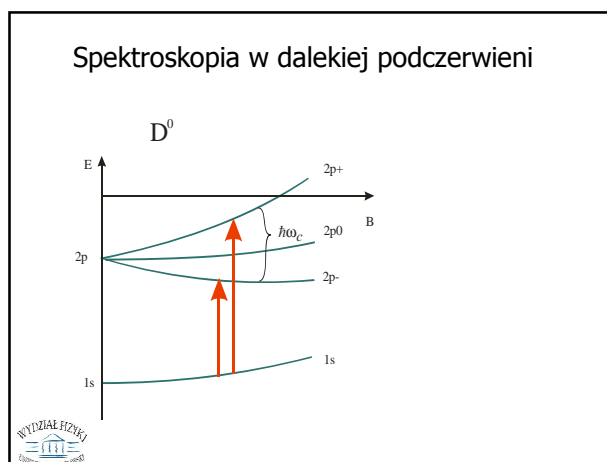
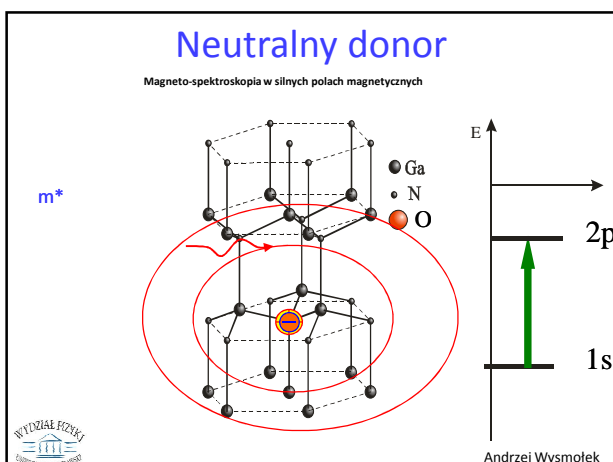
$$E_n = -\left(\frac{m^*}{m_0}\right) \frac{13.6eV}{\epsilon^2 n^2}$$

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

$$r_B^* = -\frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_0 e^2} \epsilon_s \left(\frac{m_0}{m^*}\right) \approx 0.5 \text{ \AA} \epsilon_s \left(\frac{m_0}{m^*}\right)$$

	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

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

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

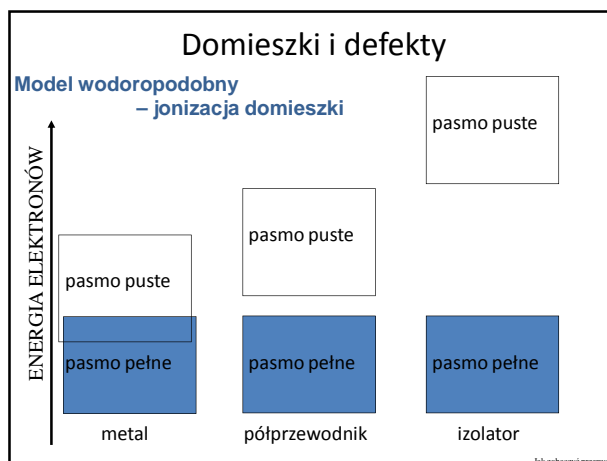
Dla typowych półprzewodników $m_e^* \approx 0.1 m_e$, $\epsilon_s \approx 10$, zatem energia wiązania dla stanu podstawowego jest rzędu meV.

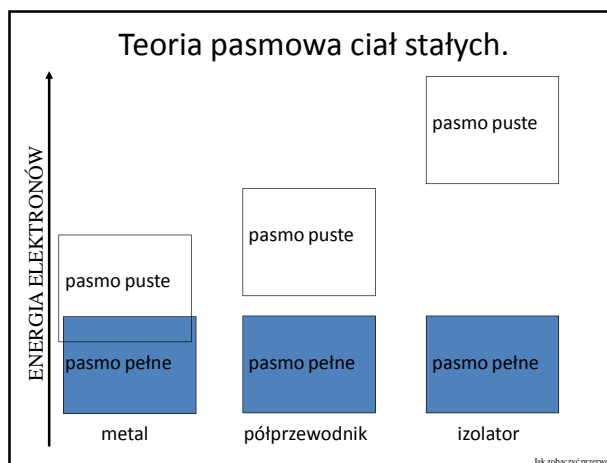
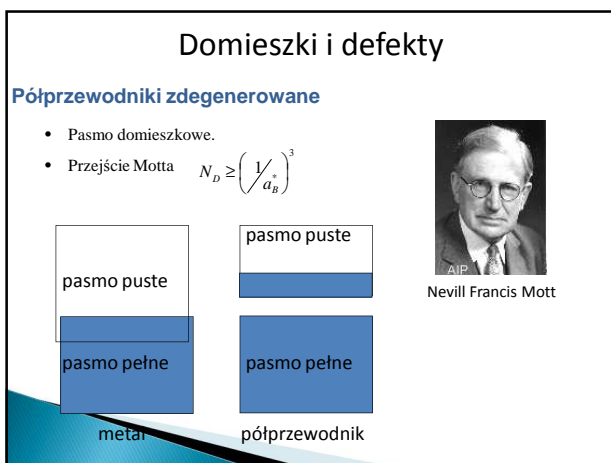
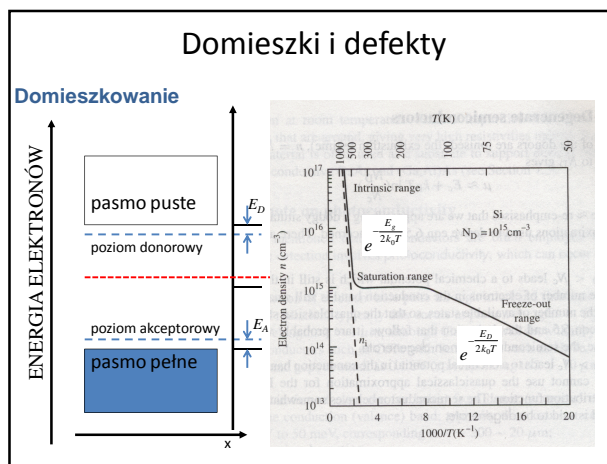
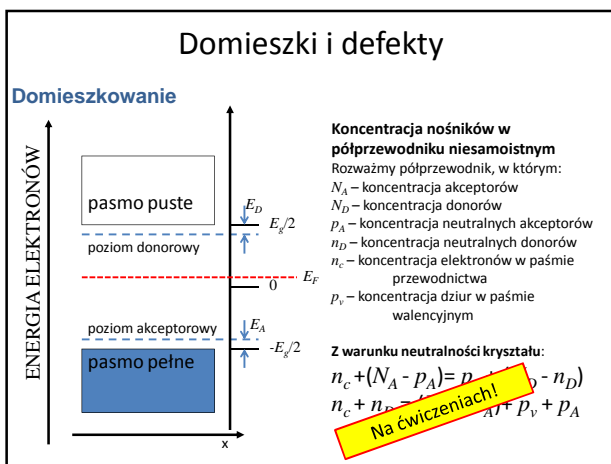
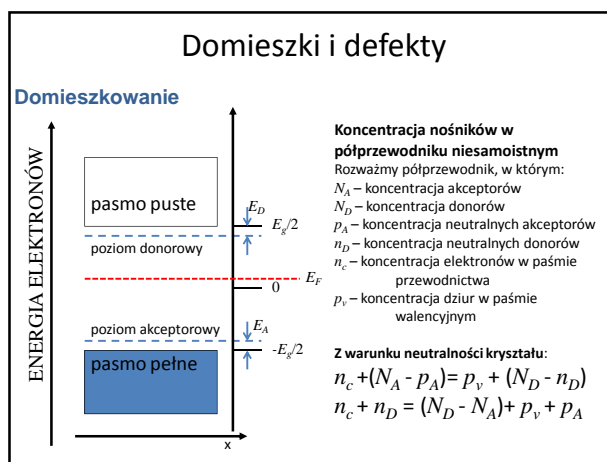
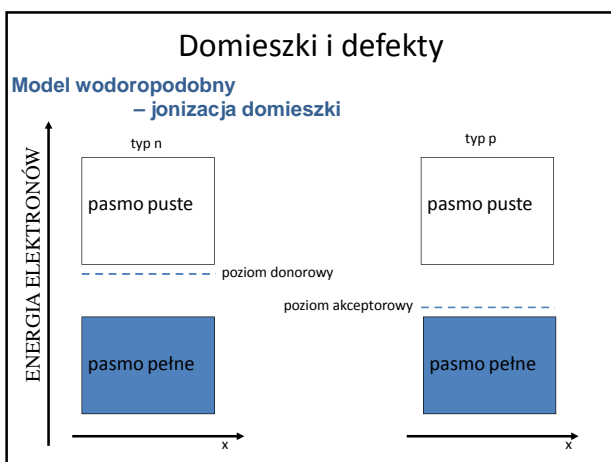
Promień Bohra dla stanu podstawowego jest rzędu 100Å:

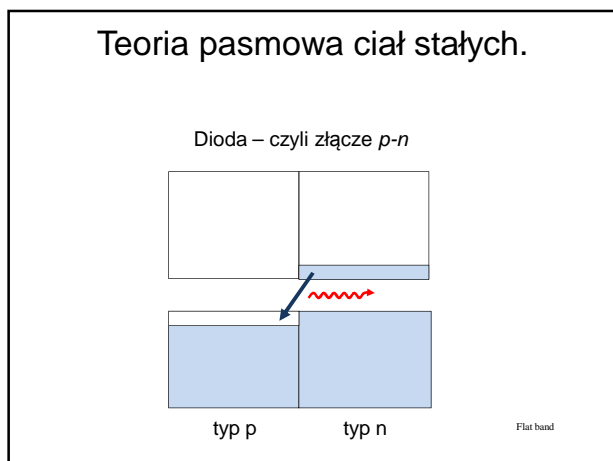
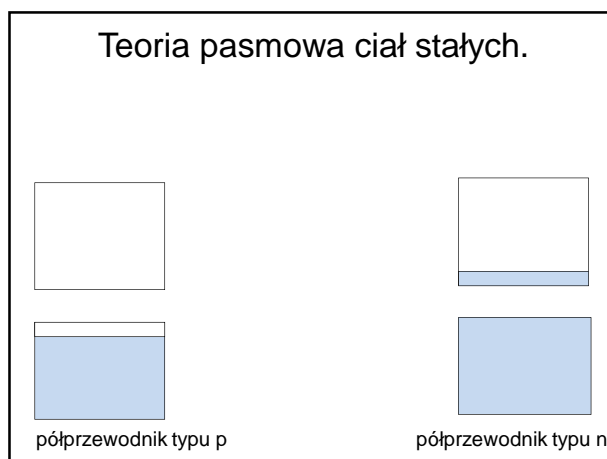
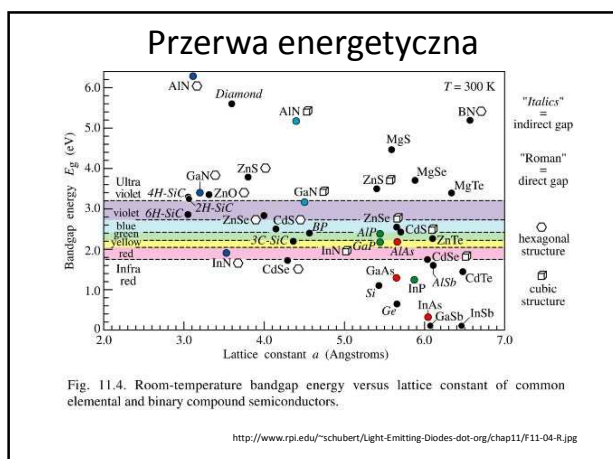
$$r_B^* = - \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_0 e^2} \epsilon_s \left(\frac{m_0}{m_e^*} \right) \approx 0.5 \text{ \AA} \epsilon_s \left(\frac{m_0}{m_e^*} \right)$$

	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...







Top-down, czyli małe jest piękne!

Prescott, Intel

Nanotechnologia
Litografia
Udoskonalenia
Galeria
Fizyka na Hożej

Uniwersytet Warszawski

Metoda Czochralskiego

Prof. Jan Czochralski 1868 - 1953.

Urodzony w 1868 roku jako ósmy syn ubożego stolarza. Nie jest pewne czy zdał maturę. Nie stać go było na opłacenie studiów. Odkrywa metody wzrostu kryształów - "metody Czochralskiego". Uznawany za "praojca elektroniki". Polski uczyony najczęściej wymieniany w literaturze światowej. W Polsce prawie nieznan...

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 Świerdka, 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

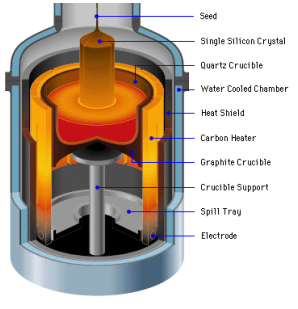
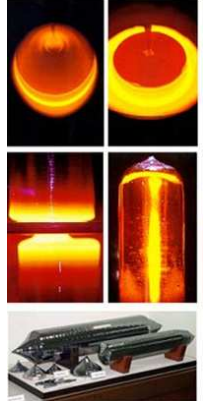


<http://www.ptwk.org.pl/pol/patron.html>

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

[Handwritten notes and signatures on the document]

Metoda Czochralskiego

<http://www.sahmy.com/Product/6/Wafers.htm>

Metoda Czochralskiego





<http://www.sahmy.com/Product/6/Wafers.htm>


Metoda Czochralskiego



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

http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/backbone/r6_1_2.html

Czego/kogo brakuje w Polsce




BIENVENUE EN POLOGNE

TERAZ POLSKA

Uniwersytet Warszawski

Metoda Czochralskiego



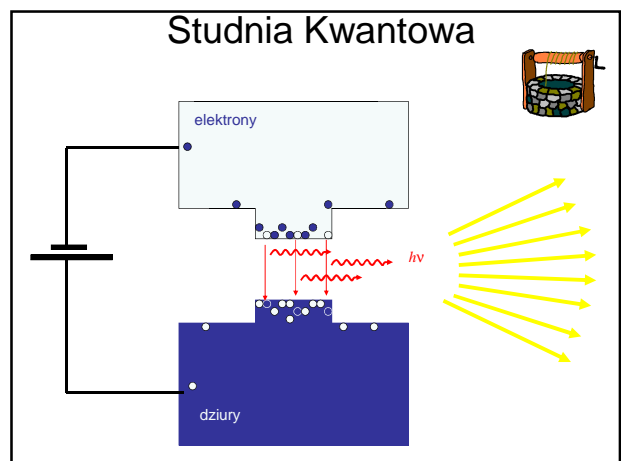
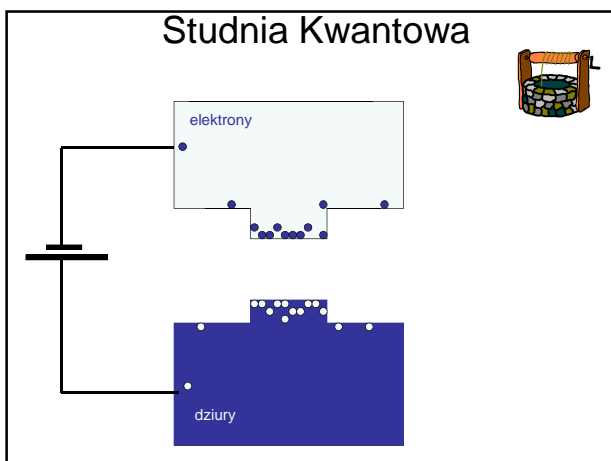
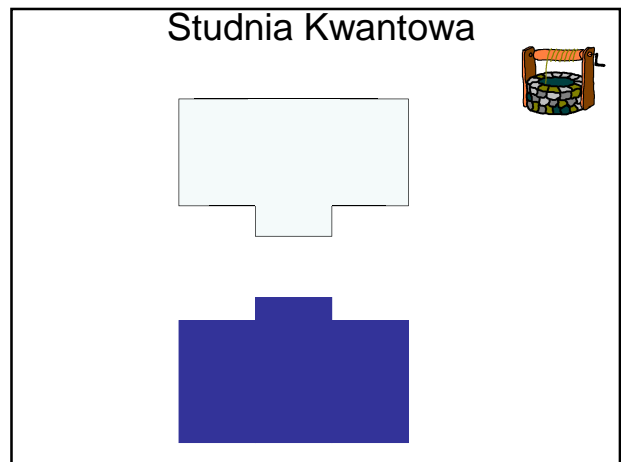
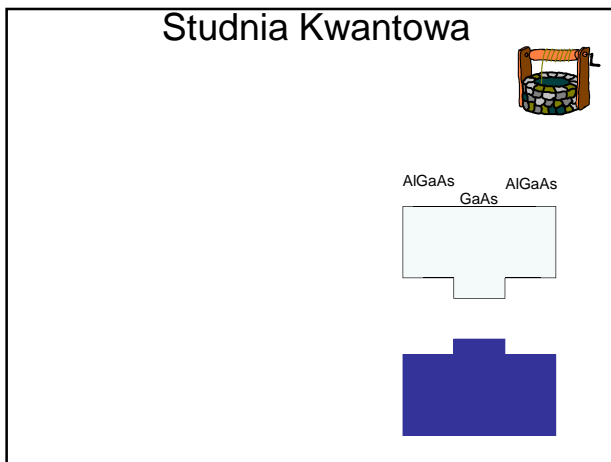
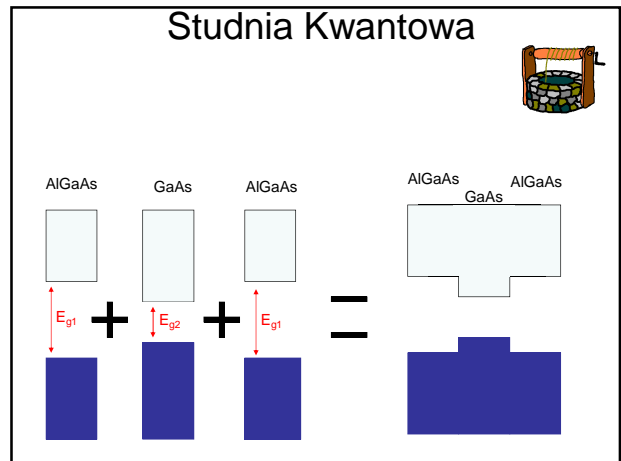
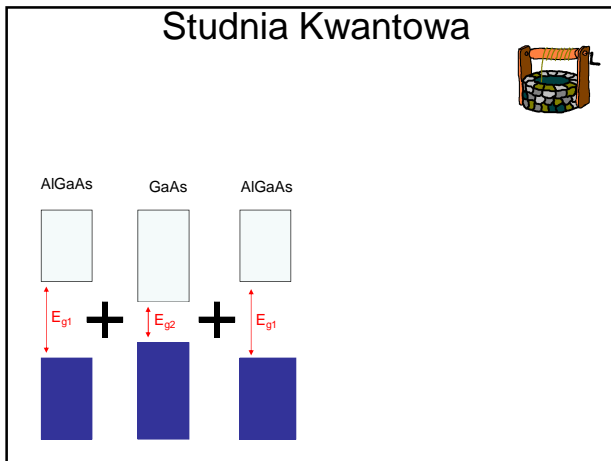
ITME Institute of Electronic Materials Technology

Products

SILICON WAFERS

as cut, lapped, etched, polished

Zakofczone



Studnie Kwantowe

Lasery półprzewodnikowe

MOCVD

Studnia kwantowa

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

MBE

Studnia kwantowa

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

Hubert J. Krenner

Studnia Kwantowa

Inżynieria przerwy energetycznej

TEM J. Jasiński

A. Babiniński

Wymiary świata

3D: Kryształ objętościowy

2D: Studnia kwantowa

1D: Drut kwantowy

0D: Kropka kwantowa

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

Turid Worren NTNU Norway

Struktury niskowymiarowe

Low-dimensional Semiconductor Systems

2D

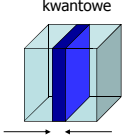
1D

“0D”
Dyskretna struktura elektronowa

Hubert J. Krenner

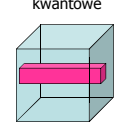
Struktury niskowymiarowe

Low-dimensional Semiconductor Systems



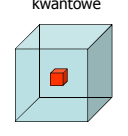
Studnie kwantowe

2D



Druty kwantowe

1D



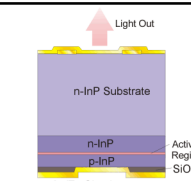
Kropki kwantowe

"0D"

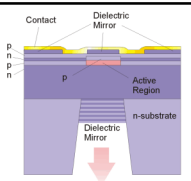
Dyskretna struktura elektroniczna

Hubert J. Kremer

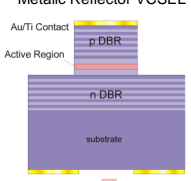
Vertical Cavity Surface Emitting Laser



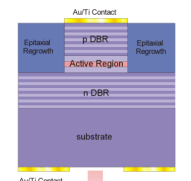
Metallic Reflector VCSEL



Etched Well VCSEL



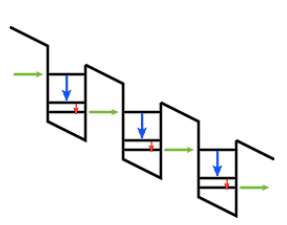
Air Post VCSEL



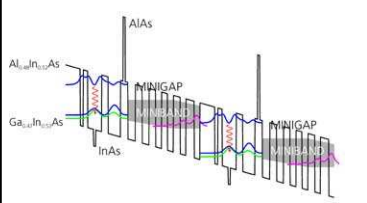
Buried Regrowth VCSEL



http://bitnigspiana.ac/physics/vcse/vcse.htm

QCL - Quantum Cascade Laser



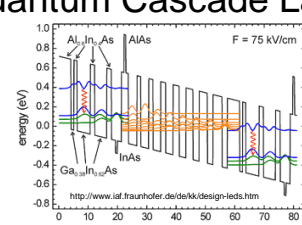
QCL - Quantum Cascade Laser





http://www.sacher-laser.com/QCL_LaserHead.php

QCL - Quantum Cascade Laser



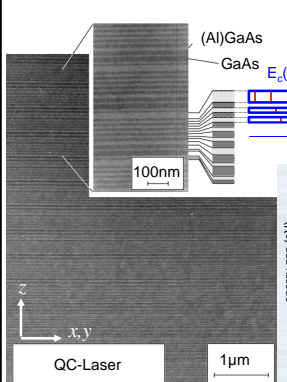
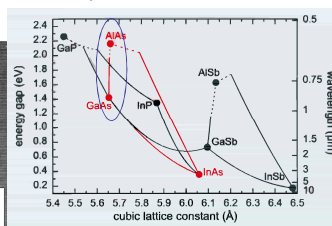



http://www.sacher-laser.com/QCL_LaserHead.php

Band structure engineering

Przestronne zmiany przerwy energetycznej
→ Inżynieria przerwy energetycznej

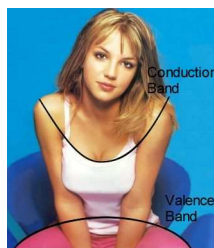
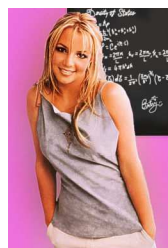
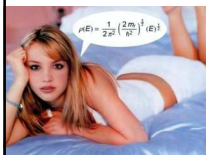
→ Możliwe ponieważ GaAs i AlAs mają tę samą strukturę krystaliczną i stałą sieci

Hubert J. Kremer

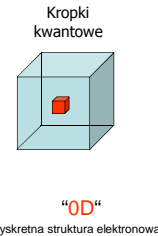
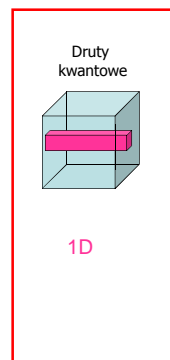
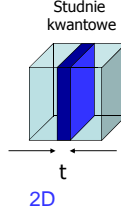
Studnie Kwantowe

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



Struktury niskowymiarowe

Low-dimensional Semiconductor Systems



Hubert J. Krenner

Druty

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

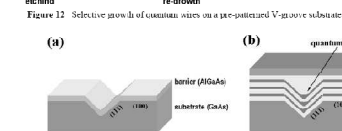
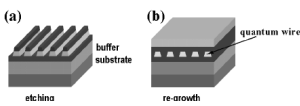
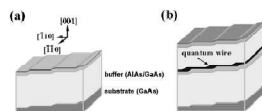


Figure 11 Growth of quantum wires on a vicinal surface with multiatomic steps



Druty

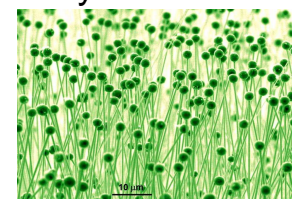
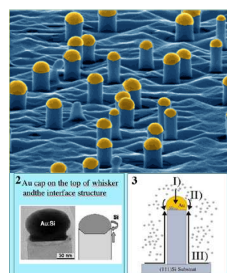
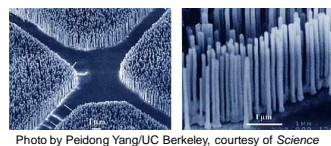


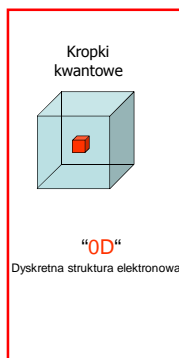
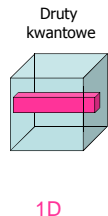
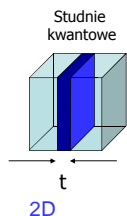
Fig. 3) Growth contains three components: Beside diffusion through the droplet (I) and diffusion on the droplet surface (II), there is a strong surface diffusion component (III) along the whisker. Si material is coming from the surrounding of the whisker.

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

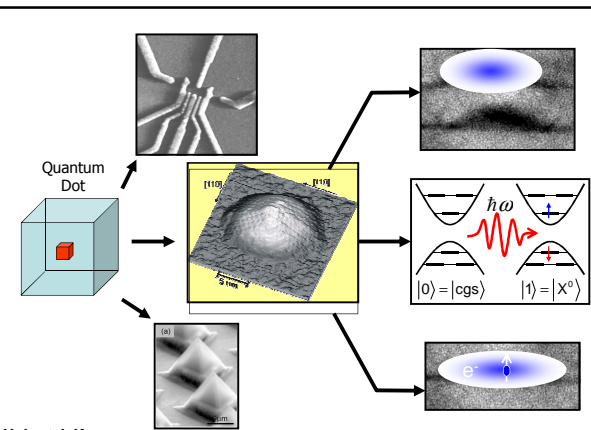


Struktury niskowymiarowe

Low-dimensional Semiconductor Systems



Hubert J. Krenner



Hubert J. Krenner
Walter Schottky Institut and Physik Department E24, TU München

Wzrost kropek kwantowych

EPITAXIAL LAYER
(e.g. InAs)

SUBSTRATE
(GaAs)

Energy

Time

$\alpha_2 + \beta_{12} = \alpha_1$

Island formation

TEM

0.25 μm x 0.25 μm

• Defect-free semiconductor "clusters" on a 2D quantum well wetting layer

Hubert J. Kremer

GaN/AlGaIn QD's

Digital Instruments NanoScope

Scan size 10.00 μm

Scan rate 0.3889 Hz

Number of samples 512

Image Data Height 300.0 nm

Data scale 300.0 nm

view angle

light angle

0 deg

x 2,000 $\mu\text{m}/\text{div}$

z 300,000 nm/div

Wzrost – K. Pakuła, AFM – Rafał Bożek

Doświadczenie

Single mode fiber - mode field diameter 5.5 μm

Collection (600 μm)

$T=300\text{K}$

Minimum step ~50 nm

Maximum step ~1 μm

$T=4.2\text{K}$

Minimum step ~5 nm

Maximum step ~100 nm

0.2-1 μm

300 μm

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

FUW Hoza 69

GaN/AlGaIn QD's

PL intensity (arb. units)

Energy (eV)

czas

energia

μPL - Katarzyna Surowiecka et al.

Trochę historii

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

Bardeen

Brattain

Shockley

Zródło: http://www.facsnet.org/node/50_techtech/applications/chipsys.php3 <http://www.lucient.com/minds/transistorhistory.html> <http://www.pbs.org/transistor/science/events/pointtrans.html>

Jak działa tranzystor?

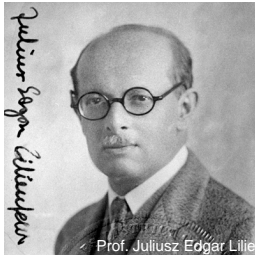
Prof. Juliusz Edgar Lilienfeld

1925 tranzystor polowy Cu_2S (Lipsk)

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

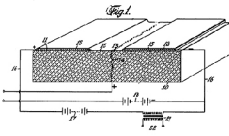
Jak działa tranzystor?

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



Juliusz Edgar Lilienfeld

Prof. Juliusz Edgar Lilienfeld



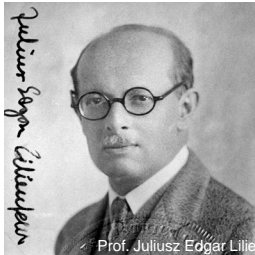
U.S. Patent 1,745,175 (MESFET)
U.S. Patent 1,900,018 (MOSFET)

Prof. Juliusz Edgar Lilienfeld
1925 tranzystor polowy Cu_2S (Lipsk)

<http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/1926-field.html>

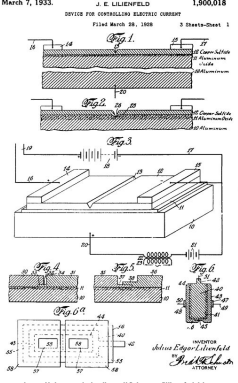
Jak działa tranzystor?

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



Juliusz Edgar Lilienfeld

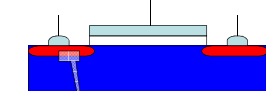
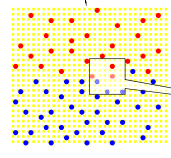
Prof. Juliusz Edgar Lilienfeld



March 7, 1933. J. E. LILIENFELD 1,900,018
DEVICE FOR REGULATING CURRENT OUTPUT

<http://chem.ch.huji.ac.il/history/lilienfeld.htm>

Półprzewodniki

Nośniki:	Domieszki:
dziury +	Akceptory (typ p)
elektrony -	Donory (typ n)

<http://jas.eng.buffalo.edu/education/solid/unitCell/home.html>
<http://jas.eng.buffalo.edu/education/mos/mosfet/mosfet.html>

Trochę historii

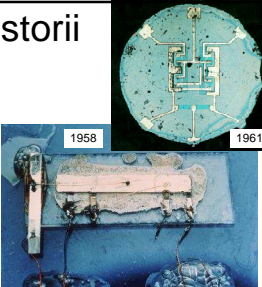
1955 Shockley Semiconductor – pierwsza firma w Palo Alto (krzemowej dolinie)

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.

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.

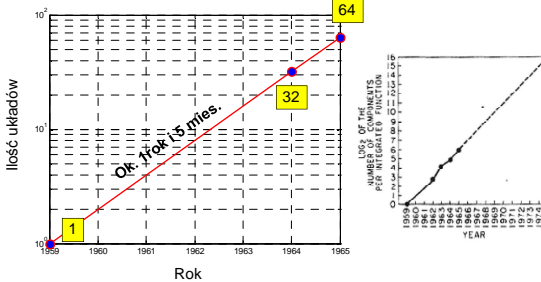
1958 Pierwszy układ scalony (IC – Integrated Circuit) wykonany przez Jack Kilby na germanie w **Texas Instruments** (2000 Nagroda Nobla z fizyki). Niezależnie Robert Noyce (Fairchild) zbudował IC na krzemie.



Zródło: http://www.facsnet.org/tools/tdi_techtech/applications/chipsys.php3 <http://www.lucent.com/minds/transistor-history.html>

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)



Ilość układów


Rok

Źródło: Wikipedia, Intel, <http://www.pdps.pl/bogus/hardware/processor/intel/i4004/i4004.htm>

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: kwiecień 1971
Ilość tranzystorów: 2300
Technologia: 1µm PMOS
Wielkość płytki krzemu: 19 mm²
Szybkość pracy Taktowanie rdzenia: 200 kHz (0.06 MIPS), magistrali sys.: 200 kHz
Szerokość magistrali danych (wewn./zewn.): 8 bitów
Szerokość magistrali adresowej: 14 bitów

i8008
Data wprowadzenia: kwiecień 1972
Ilość tranzystorów: 3500
Technologia: 10 µm PMOS
Wielkość płytki krzemu: 19 mm²
Szybkość pracy Taktowanie rdzenia: 200 kHz (0.06 MIPS), magistrali sys.: 200 kHz
Szerokość magistrali danych (wewn./zewn.): 8 bitów
Szerokość magistrali adresowej: 14 bitów

Zródło: Wikipedia, Intel, <http://www.pdps.pl/bogus/hardware/processor/intel/i4004/i4004.htm>

Trochę historii



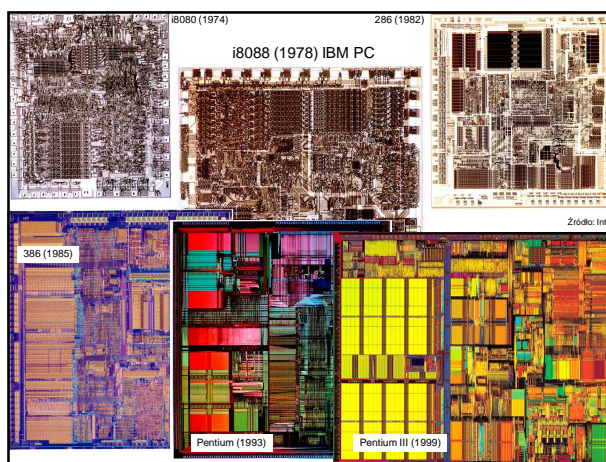
1975 Altair (i jego klony)
procesor Intel 8080
Bill Gates i Paul Allen piszą wersję BASICa na Altair



A gdzie jest ekran i klawiatura?

Źródło: <http://www.pldos.pl/bogusisipie.htm>

Apple I (1976)



Źródło: Intel

Pentium 4 (2000)
42 000 000 tranzystorów
technologia 0.18 mikrona.
Zegar 1.5 GHz
6 warstw

Rozmiar procesorów Intel (w skali)

4004	8080	8085	8088	8086
80286	386	80486	486 CPU	386SL
Pentium Processor		Pentium III Processor		

Źródło: Intel, http://www.facsnet.org/tools/sci_tech/tech/fundaments/mooreslaw.php3

TRENDY: Pierwsze Prawo Moore'a

Intel - granica 1 mld tranzystorów przekroczona

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. 500 milimetrów kwadratowych). Układy Itanium drugiej generacji, produkowane w 2002 roku, miały powierzchnię 450 do 450 milimetrów kwadratowych.

Intel zwiększał przez ostatnie 20 lat sukcesywnie liczbę tranzystorów zgromadzonych 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, 4,2 mln tranzystorów). Pierwszy układ Itanium 2, 2002 roku zawierał 220 mln tranzystorów.

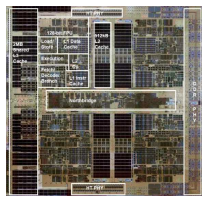
Źródło: Intel

Nanotechnologia

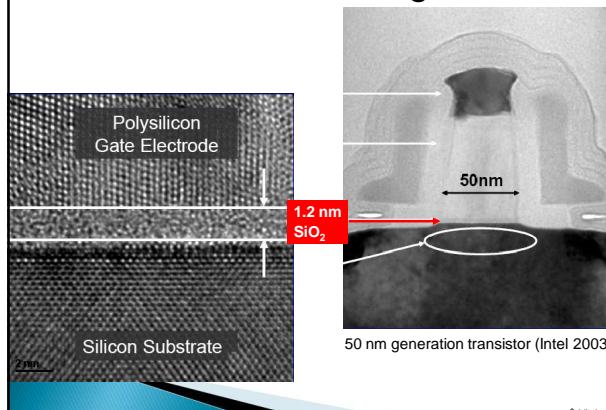
Core i7-9xx Extreme Edition (2009)
800 000 000 tranzystorów, 2, 4, 8 rdzeni
technologia 45 nm – 32 nm
Zegar max 3,33 GHz
9 warstw
Moc ok. 65 W

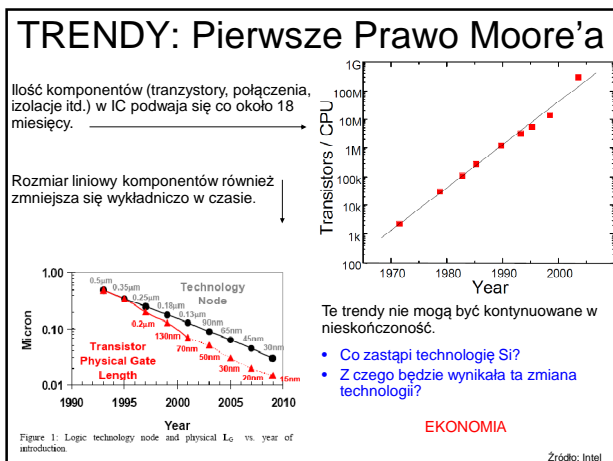
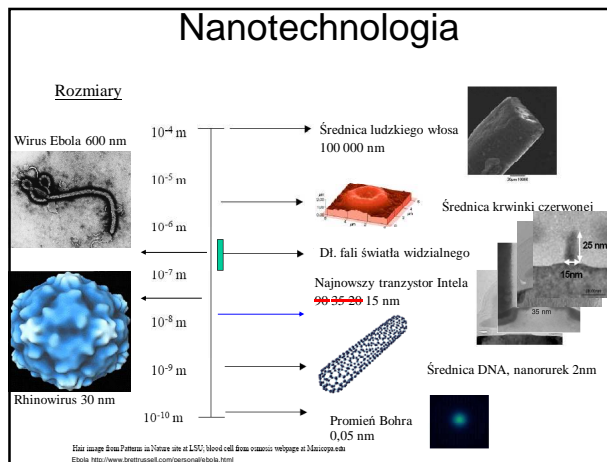
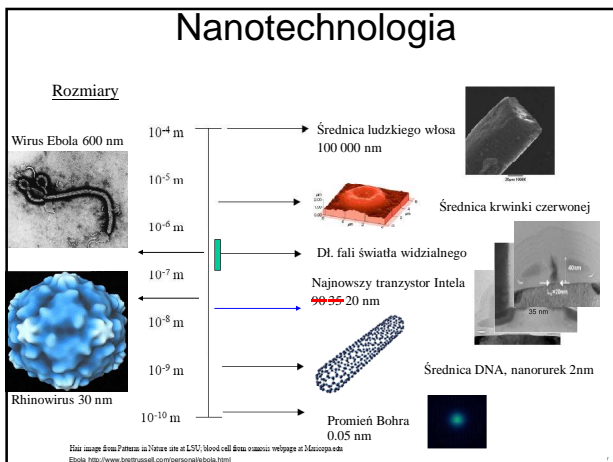
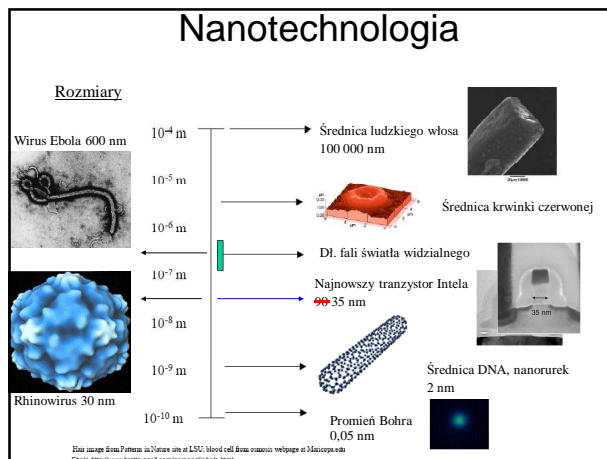
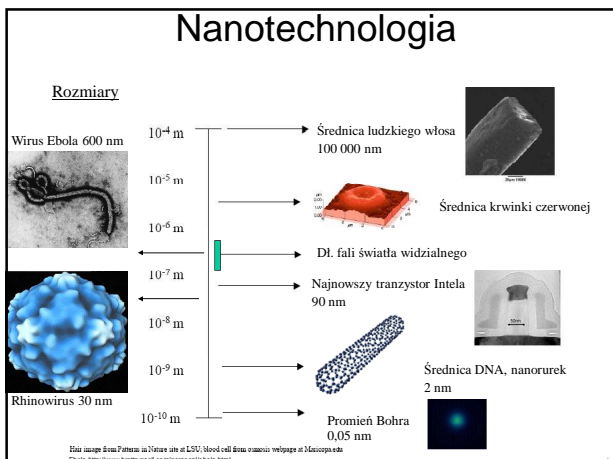


AMD Athlon II X2 B24 (2009)
450 000 000 tranzystorów; 2,3,4 rdzenie
technologia 45 nm.
Zegar max 2,8 – 3,1 GHz
11 warstw
Moc 65 W -140 W



Nanotechnologia

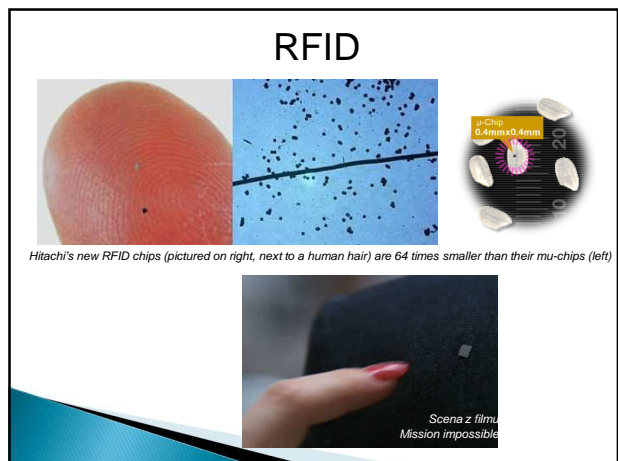
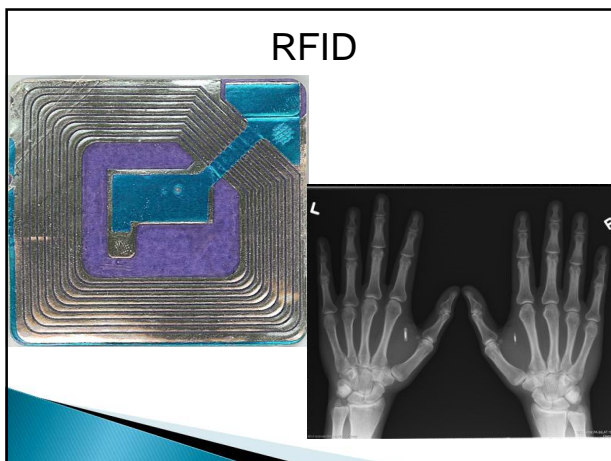




Inżynieria nanostruktur

Trendy – prawo Moore'a: skalaki

Uniwersytet Warszawski



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"

The image sensor, CCD, is the advanced digital camera's electronic eye.

Light particles (photons) strike the photodiodes and the photoelectrons are collected in the wells. The more light, the more electrons are collected in the wells.

The CCD array is read out row by row.

Electrons slide off the array into a register built and an analog-to-digital converter.

Willard S. Boyle
b. 1924
(in Amherst, NS, Canada)

George E. Smith
b. 1930

1/4 of the prize
Bell Laboratories
Murray Hill, NJ, USA

1/4 of the prize
Bell Laboratories
Murray Hill, NJ, USA

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. Montanari

Omnivision Readies for Wafer Level Camera Cube Production

evolution of the mobile phone camera

OV7640 VGA
Circa 2004
8x8x0.8mm

OV7670 VGA
Circa 2005
6x6x0.8mm

OV7680 VGA
Circa 2006
4.5x4.5x3.0mm

OV7690 VGA
2009
2.5x2.5x2.0mm

reflexible 1 glass element glued onto CSP

reflexible 2 surface lens made at wafer level

2002 2005 2008

<http://www.i-micronews.com/lectureArticle.asp?id=2723>

PROBLEM: Drugie Prawo Moore'a

Cost reduction trend 30% per year

Intel X86 is cost per MIP

DRAM is cost per megabit

Cost per function

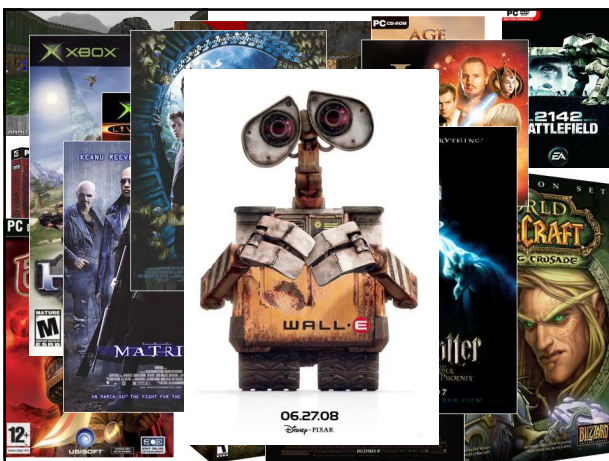
Year

(Arthur Rock's law)

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 (10¹² USD)

Ten trend w oczywisty sposób również nie może być kontynuowany!

Źródło: Intel



NO EXPONENTIAL IS FOREVER...

BUT WE CAN DELAY „FOREVER”

Gordon Moore, 2003

International Technology Roadmap for Semicond.

SEMATECH Accelerating the next technology revolution.

ITRS

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.

Tranzystor A B C D E F G H I

Elementy pamięci F

Źródło: Intel, Sematech

PROBLEM (?): Zjawiska kwantowe

Feature Size

100 μm
10 μm
1 μm
0.1 μm
10 nm
1 nm
0.1 nm

Year
1960 1980 2000 2020 2040

0.25 μm in 1997

Integrated Circuit History

NTRS Roadmap

Transition Region

Quantum Devices

Atomic Dimensions

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

Źródło: Intel, Sematech

Granice miniaturyzacji?

Myślmy, że tranzystor jest zbudowany tak.

25 nm MOSFET
Produkcja od 2008

4,2 nm MOSFET
Produkcja ???

Asen Asenov, Glasgow
David Williams Hitachi-Cambridge

IEEE Trans Electron Dev 50(9), 1837 (2003)

PROBLEM: Statystyka domieszek

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

10²² atomów Si
10¹⁷ domieszek
Rozmiar tranzystora 50 nm
Średnia ilość domieszek 12.5

1 nm Sb-doped Si Undoped Si

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

PROBLEM: Statystyka domieszek

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

10²² atomów Si
10¹⁷ domieszek
Rozmiar tranzystora 50 nm
Średnia ilość domieszek 12.5

1 nm Sb-doped Si Undoped Si

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

PROBLEM: Statystyka domieszek

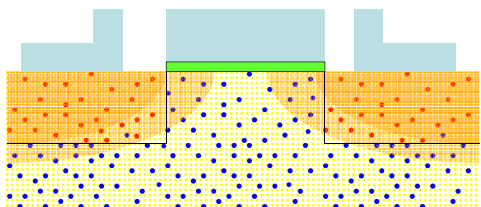
Voyles, P. M. *et al. Nature* 416, 826-829 (2002)

10²² atomów Si
10¹⁷ domieszek
Rozmiar tranzystora 50 nm
Średnia ilość domieszek 12.5

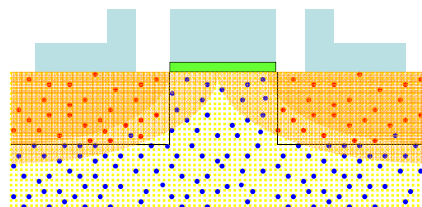
1 nm Sb-doped Si Undoped Si

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

PROBLEM: Tunelowanie

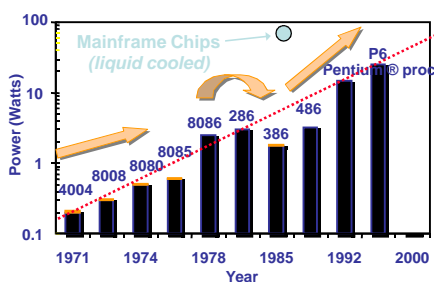


PROBLEM: Tunelowanie



PROBLEM: Chłodzenie

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

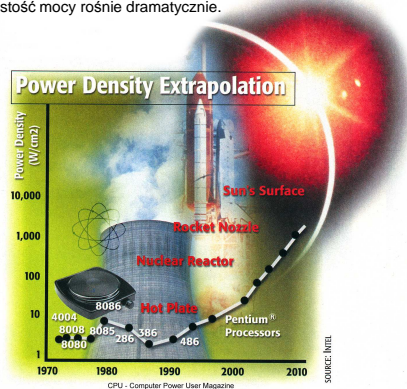


PROBLEM: Chłodzenie

Gęstość mocy rośnie dramatycznie.

10⁷ tranzystorów pracujących z częstotliwością 1.5 GHz zużywa 130 W. Zakładając, że na tej samej powierzchni za jakiś czas będzie pracować 10⁸ tranzystorów z częstotliwością 10 GHz otrzymamy gęstość mocy na poziomie 10 kW/cm² (porównywalną gęstość mocy ma silnik rakietowy!)

[Film](#)



PROBLEM: Podłoża

Krzem 2003,

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

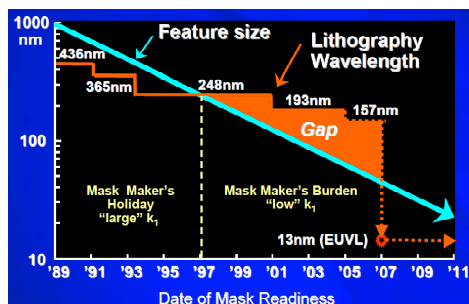
Krzem 2007,

- 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/m² <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/m² <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/m² <100 nm
- Fluktuacje granic rezystu 1 nm

www.09

PROBLEM: itd...

itd...

itd...

itd...