

Koniec technologii krzemowej? Prawo Moora i jego konsekwencje.

- a. Trochę historii
- b. Jak to działa
 - i. Trochę logiki
 - ii. Od bramki do bramki
 - iii. Jak działa tranzystor
- c. Prawo Moora
 - i. Nanotechnologia
 - ii. Domieszki – koncentracja i statystyka
 - iii. Tunelowanie
 - iv. Chłodzenie



Amara's law is a maxim stating:
*We tend to overestimate the effect
 of a technology in the short run and
 underestimate the effect in the long
 run.*

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Trochę historii

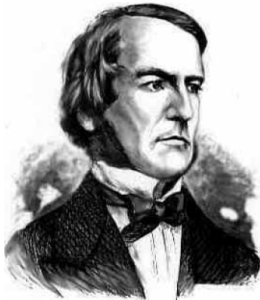
1. Początek XIX w. ok.. 1800 Francuz Joseph Jacquard i jego krosna (sprzeciw w Lyonie)



Źródło: http://en.wikipedia.org/wiki/Jacquard_loom

Trochę historii

1. George Boole (1815-1865)

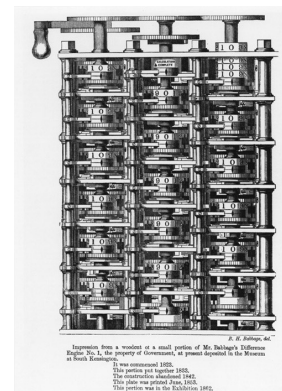
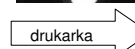


Prof.. Ryszard Tanas <http://zon8.physd.amu.edu.pl/~tanaz/>

Trochę historii

2. Połowa XIX w. Anglik Charles Babbage i jego „maszyna analityczna”.

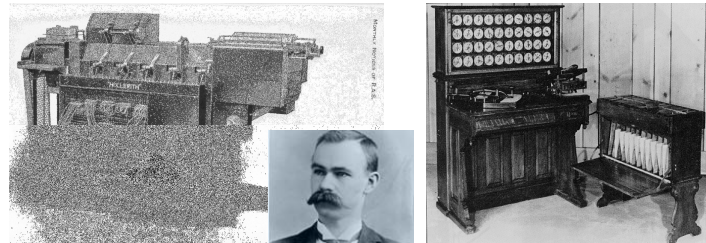
Skonstruowana w 1985 –1991 r. w Science Museum w Londynie. Urządzenie składa się z 4000 części i waży ponad 3 tony. Podobnie jak i drukarka.



Źródło: <http://www.cbi.umn.edu/exhibits/cb.html> , <http://www.sciencemuseum.org.uk/galleryguide/E2052.asp>
<http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/710950.stm>

Trochę historii

3. Koniec XIX w. Herman Hollerith wynalazł maszynę liczącą, którą można było „programować” przy pomocy kart. Wykorzystano ją w 1890 r w spisie powszechnym w USA.

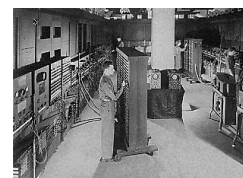


W 1911 r. Hollerith's Tabulating Machine Company łączy się z dwoma innymi Computing Scale Company of America oraz International Time Recording Company. Powstaje Computing-Tabulating-Recording Company (C-T-R) . W 1924 r. zmienia nazwę na **International Business Machines Corporation** – IBM.

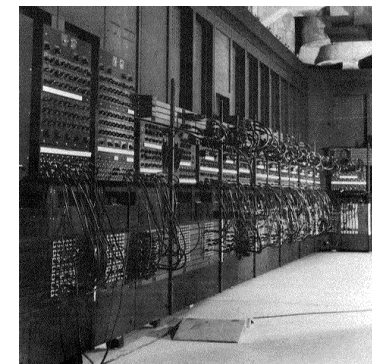
Źródło: <http://www.columbia.edu/acis/history/census-tabulator.html>, IBM

Trochę historii

1945 ENIAC – lampowa maszyna licząca, zawierała 18 000 lamp próżniowych, 70 000 oporników oraz 5 milionów połączeń. Zużywała 160 kilowatów energii. Zaprojektowana przez Jouna Prospera Eckerta (1919-1995) i Johna Mauchly'ego (1907-1980). Wazyła 27 ton, zajmowała 460 m³, i mogła dodać 5,000 numerów/s.



Eniac - max. 116h



Źródło: <http://ei.cs.vt.edu/~history/ENIAC.Richey.HTML>

Trochę historii

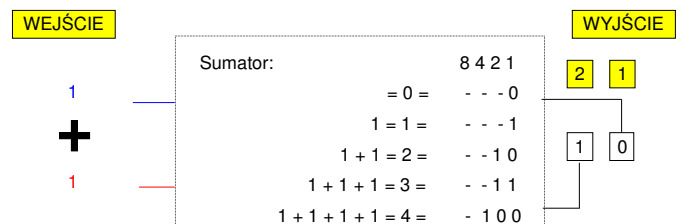
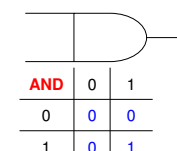
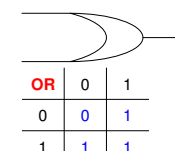
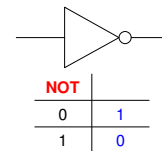
- W połowie lat 40-tych John von Neuman wymyślił projekt maszyny EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) – z pamięcią do przechowywania danych i programów oraz z centralną jednostką procesorową
- 1948 – William Shockley, John Bardeen oraz Walter Brattain z Bell Labs wymyślają tranzystor (Nobel 1956)
- Rok 1955
 - 2 października komputer ENIAC zostaje ostatecznie wyłączony i zdemontowany.
 - Firma Semiconductor Laboratory, założona przez Williama Shockley'a, jest pierwszą założoną w Dolinie Krzemowej.
- Lata 50 XX w. – „superkomputer” IBM 360
- Lata 60 XX w. – minikomputer Digital Equipment Corporation
- W 1969 r. Intel Corporation dostaje zamówienie na układ do japońskiego kalkulatora...



J. Von Neuman, źródło Wikipedia

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Jak to działa? Trochę logiki



Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Jak to działa? Trochę logiki

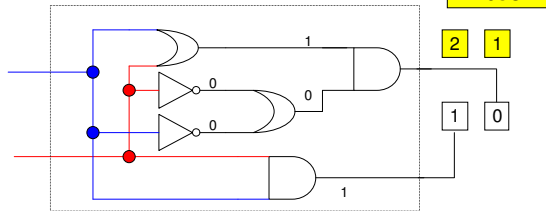
NOT	
0	1
1	0

OR	
0	0
0	1
1	1

AND	
0	0
0	0
1	0
1	1

WEJŚCIE

1
+



WYJŚCIE

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Jak to działa? Trochę logiki

NOT	
0	1
1	0

OR	
0	0
0	1
1	1

AND	
0	0
0	0
1	0
1	1

XOR	
0	0
0	1
1	1
1	0

NOR	
0	1
0	0
1	0
1	0

NAND	
0	1
0	1
1	1
1	0

XNOR	
0	1
0	0
1	0
1	1

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Jak to działa? Trochę logiki

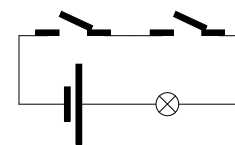
NAND	
0	1
0	1
1	0

Gate	Equivalent in NAND gates
NOT	
AND	
OR	
NOR	

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

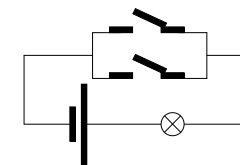
Od bramki do bramki.

AND



AND	
0	0
0	0
1	0
1	1

OR

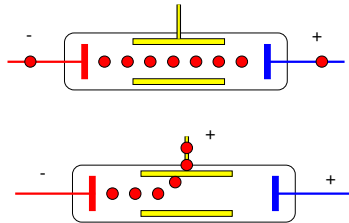


OR	
0	0
0	1
1	1

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Od bramki do bramki.

Lampa próżniowa jako przełącznik



Potrzeba było przełączników: **szybkich i niezawodnych**.

Na początku (rewolucji koszty, rozmiar, pobór mocy, łatwość obsługi, uniwersalność, skalowalność, kompatybilność nie miały dużego znaczenia...

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Eniac - max. 116h

Trochę historii



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



Źródło: http://www.facsnet.org/tools/sci_tech/tech/applications/chipsys.php3 <http://www.luceni.com/minds/transistor/history.html>, <http://www.pbs.org/transistor/science/events/pointtrans.html>

Jak działa tranzystor?

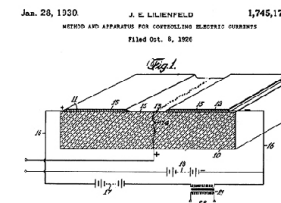


Prof. Juliusz Edgar Lilienfeld
1925 tranzystor polowy Cu_2S (Lipsk)

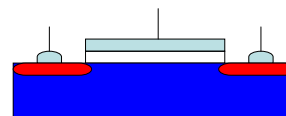
<http://www.pbs.org/transistor/science/events/pointtrans.html>

Jak działa tranzystor?

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



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



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

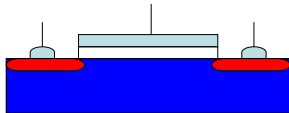
<http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/1926-field.html>

Jak działa tranzystor?

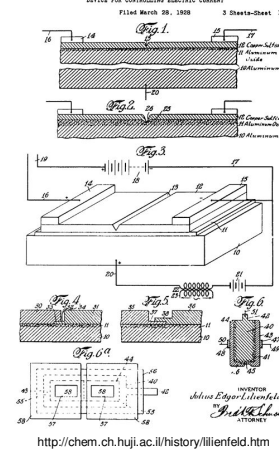
18.04.1881, (Lemberg) - 8.08.1963, (Charlotte Amalie, U.S.A.)



Prof. Julius Edgar Lilienfeld

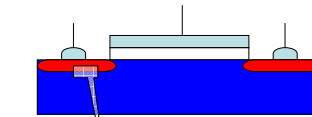


March 7, 1933. J. E. LILIENFELD 1,900,018



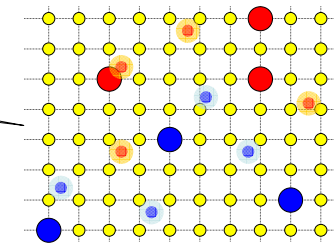
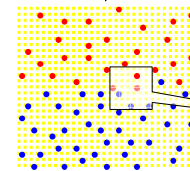
<http://chem.ch.huji.ac.il/history/lilienfeld.htm>

Półprzewodniki



Nośniki:
dziury +
elektrony -

Domieszki:
Akceptory (typ p) - czerwony
Donory (typ n) - niebieski



<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.

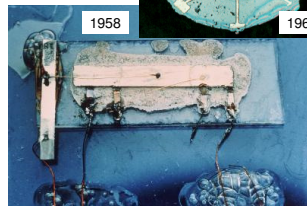
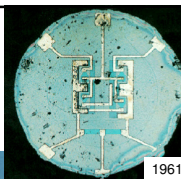
A. Newell, D. Shaw i F. Simon wynajdują IPL (Information Processing Language - język przetwarzania informacji).

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 inżynierów.

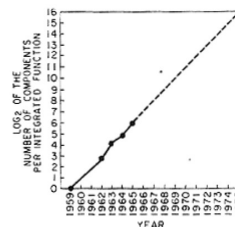
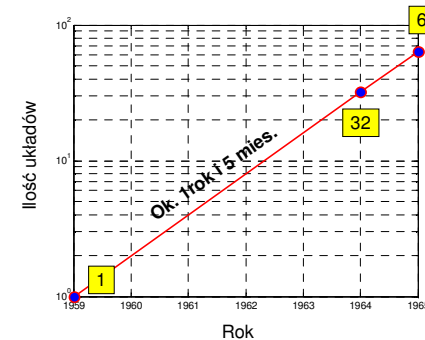
1958 Pierwszy układ scalony (IC – Integrated Circuit) wykonany przez Jacka Kilby na germanie w **Texas Instruments** (2000 Nagroda Nobla z fizyki). Niezależnie Robert Noyce (**Fairchild**) zbudował IC na krzemie.



Zródło: http://www.facsnet.org/tools/sci_tech/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)

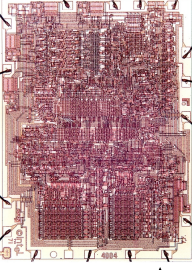


Zródło: Wikipedia, Intel, <http://www.pdos.pl/bogus/hardware/processor/intel/i4004/i4004.htm>

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 1972
Ilość tranzystorów: 2 300
Technologia: 10 µm, PMOS
Wielkość płytki krzemu: 19 mm²
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



i8008
Data wprowadzenia: kwiecień 1972
Ilość tranzystorów: 3 500
Technologia: 10 µm, PMOS
Wielkość płytki krzemu: 19 mm²
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

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

Trochę historii



1975 Altair (i jego klony)

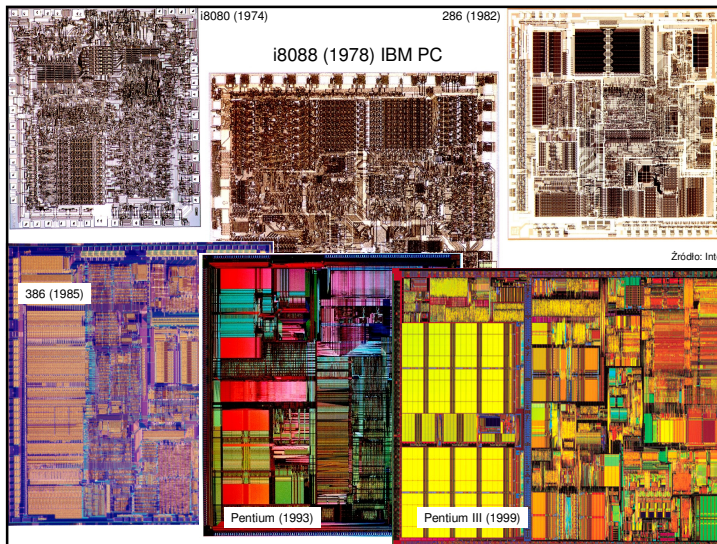
procesor Intel 8080
Bill Gates i Paul Allen piszą wersję BASICa na Altair



A gdzie jest ekran i klawiatura?

Źródło: <http://www.pldos.pl/bogus/spis.htm>

Apple I (1976)





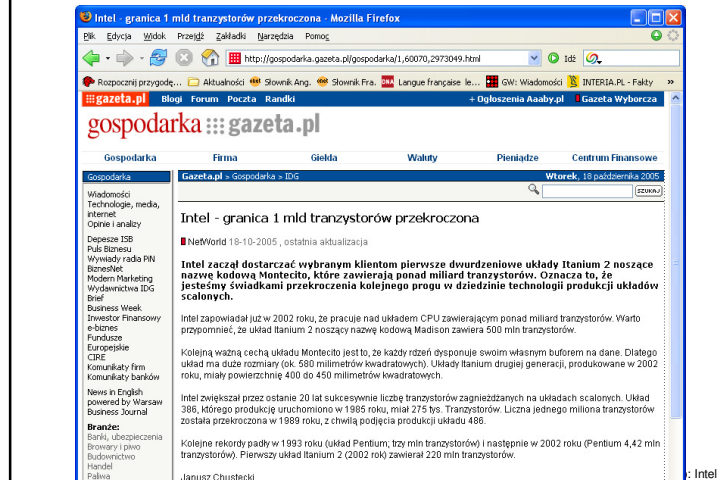
Pentium 4 (2000)
42 000 000 tranzystorów
technologia 0.18 mikrona.
Zegar 1.5 GHz
6 warstw

Rozmiar procesorów Intel (w skali)

Procesor	1974	1978	1982	1985	1993	1999	2000
i4004	2 300	3 500	290 000	275 000	3 100 000	3 100 000	42 000 000

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

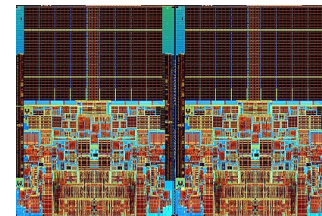
TRENDY: Pierwsze Prawo Moore'a



Nanotechnologia

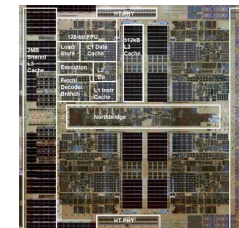
Intel Quad-Core Penryn series (2008)

800 000 000 tranzystorów
technologia 45 nm
Zegar max 3,33 GHz
9 warstw
Moc ok. 65 W

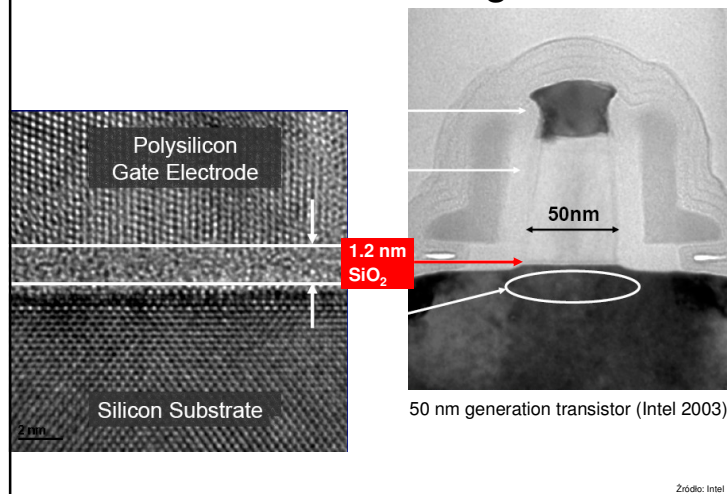


AMD Phenom X4 QUAD-Core (2008)

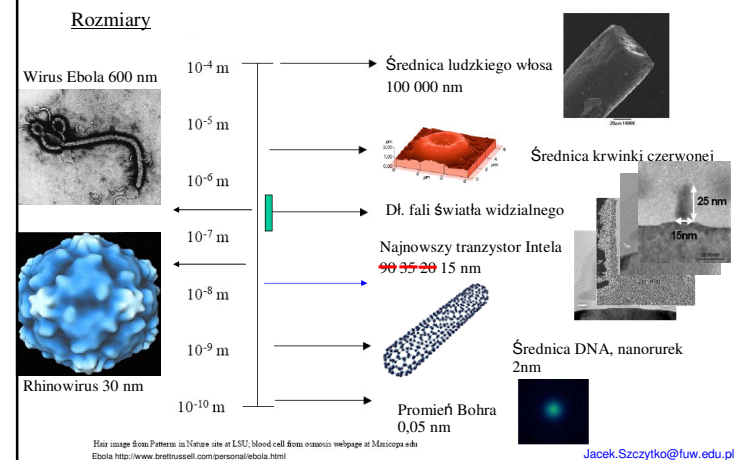
450 000 000 tranzystorów
technologia 65 nm.
Zegar max 2,6 GHz
11 warstw
Moc 95 W - 140 W



Nanotechnologia



Nanotechnologia



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.

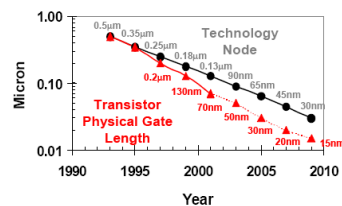
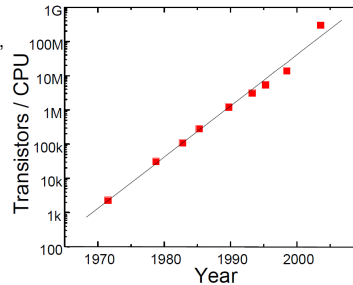


Figure 1: Logic technology node and physical L_g vs. year of introduction.



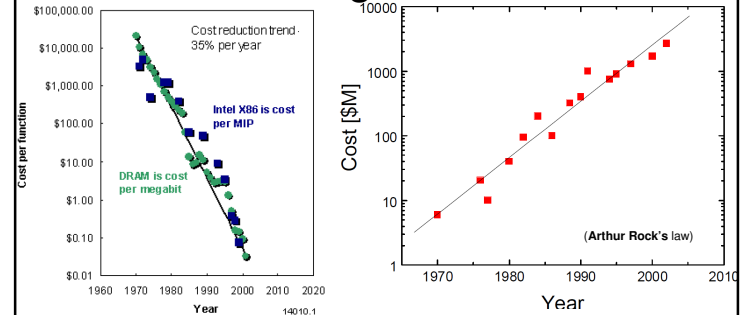
Te trendy nie mogą być kontynuowane w nieskończoność.

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

EKONOMIA

Źródło: Intel

PROBLEM: Drugie Prawo Moore'a



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

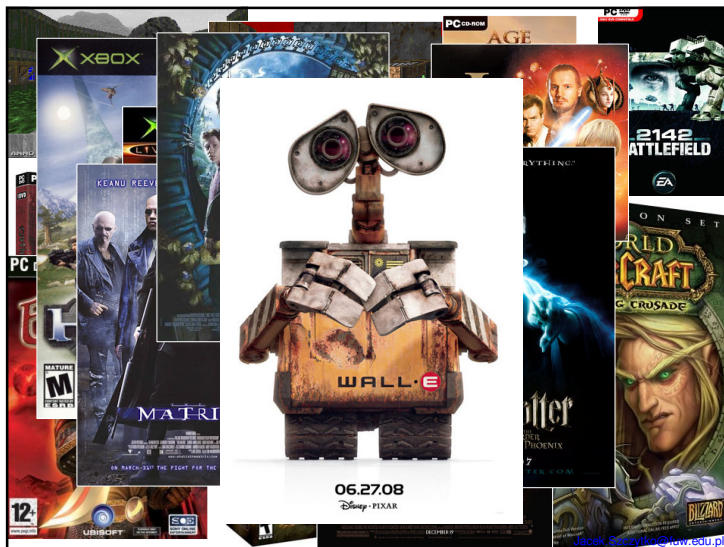
ALE: Koszt fabryki produkującej chipy rośnie także wykładniczo!

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

Ten trend w oczywisty sposób również nie może być kontynuowany!

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

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.

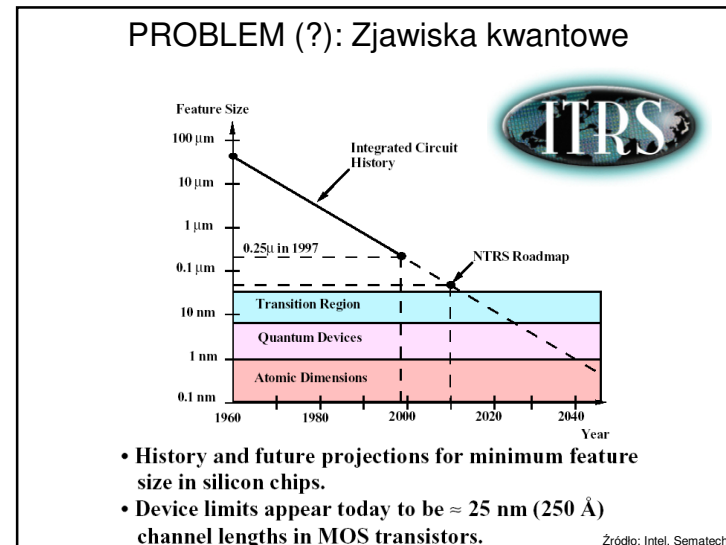
ITRS

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 Elementy pamięci

Źródło: Intel, Sematech



Granice miniaturyzacji?

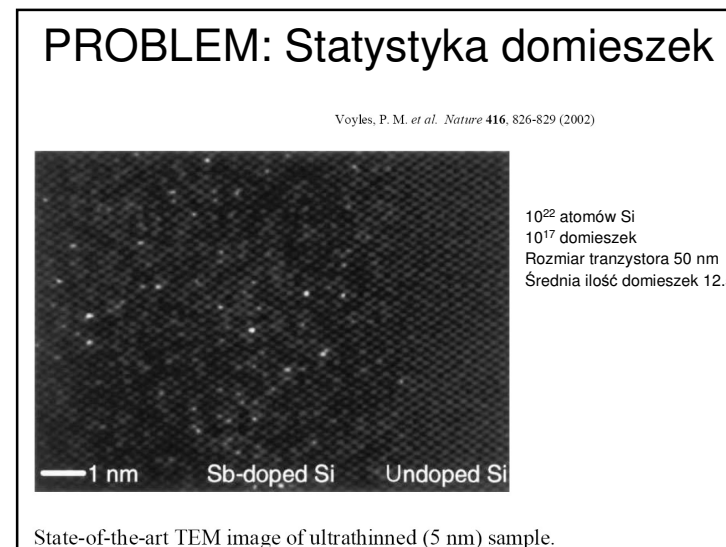
Myślimy, że tranzystor jest zbudowany tak.

25 nm MOSFET
Produkcja od 2008

4,2 nm MOSFET
Produkcja ???

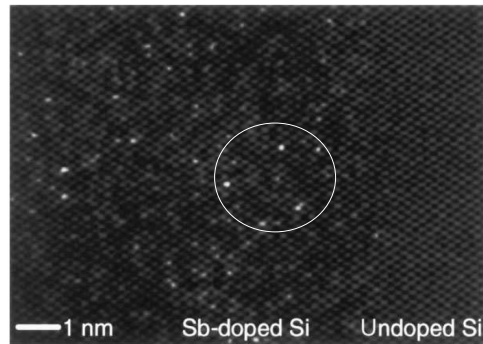
Asen Asenov, Glasgow
David Williams Hitachi-Cambridge

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



PROBLEM: Statystyka domieszek

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

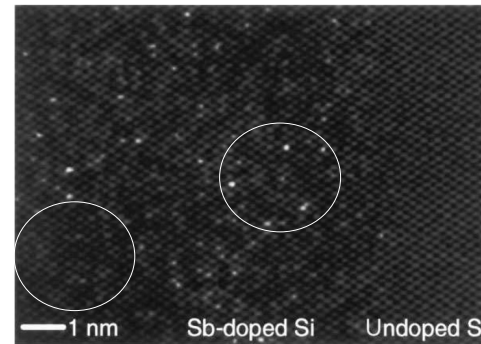


10^{22} atomów Si
 10^{17} domieszek
Rozmiar tranzystora 50 nm
Średnia ilość domieszek 12.5

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

PROBLEM: Statystyka domieszek

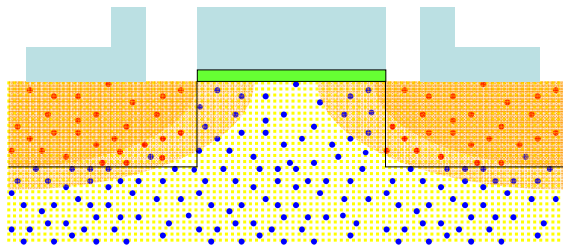
Voyles, P. M. *et al.* *Nature* **416**, 826-829 (2002)



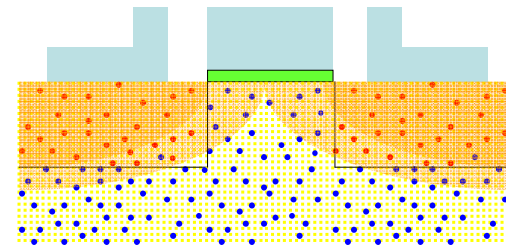
10^{22} atomów Si
 10^{17} domieszek
Rozmiar tranzystora 50 nm
Średnia ilość domieszek 12.5

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

PROBLEM: Tunelowanie

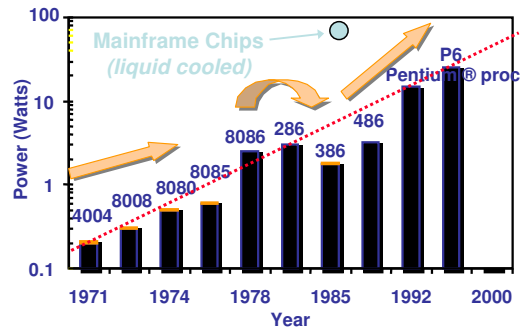


PROBLEM: Tunelowanie



PROBLEM: Chłodzenie

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

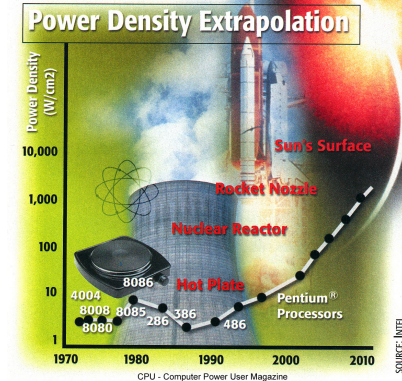


PROBLEM: Chłodzenie

Gęstość mocy rośnie dramatycznie.

10^7 tranzystorów pracujących z częstotnością 1.5 GHz zużywa 130 W. Zakładając, że na tej samej powierzchni za jakiś czas będzie pracować 10^8 tranzystorów z częstotnością 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

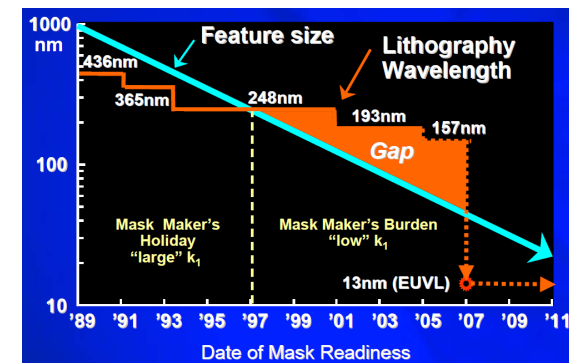
Krzem 2007,

- 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

week05

PROBLEM: itd...

itd...

itd...

itd...

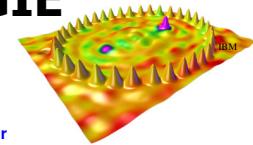
NOWE TECHNOLOGIE

- Przeprojektowanie CMOS (np. wertykalne, FIN, MOSFET z podwójną bramką)
- Urządzenia alternatywne (np. na pojedynczych elektronach)
- Urządzenia hybrydowe (np. FET z nanorurek)
- Nowe architektury (np. samonaprawiające się, defect-tolerance, automaty komórkowe)
- Zupełnie nowe architektury (np. komputery molekularne, komputery kwantowe)



NOWE TECHNOLOGIE

Jacek.Szcztyko@fuw.edu.pl



Dialog z przyrodą musi być prowadzony w języku matematyki, w przeciwnym razie przyroda nie odpowiada na nasze pytania.

Michał Heller

Koniec technologii krzemowej? Prawo Moora i jego konsekwencje (czyli o postępie technologicznym);

Nanotechnologia I (czyli nano jest trendy)

Kwanty, stany, pasma (czyli mechanika kwantowa dla początkujących);

Nanotechnologia II, III, IV (studnie, druty, kropki; nanorurki i nanomaszyny);

Spintronika stosowana; Dlaczego elektrony kręczą? (czyli o spinie);

Kwantowa kryptografia i teleportacja I i II (czyli o splątaniu kwantowym oraz kodach i kluczach);

Komputery kwantowe I i II (czyli o przyszłych informatykach oraz o przyszłych komputerach)

Badania i postęp (czyli o finansowaniu badań);

W smutnym kolorze blue (czyli o niebieskim laserze i białych diodach);

Optoelektronika (czyli o manipulowaniu światłem);

Nieliniowo, adaptacyjnie i femtosekundowo, czyli ekstremalnie w optyce;

Czy komputer może myśleć? Prezentacja prac studentów

Uwaga: Wykład może być zaliczony do godzin pozakierunkowych: przedmioty ogólnouniwersyteckie Wydziału Fizyki kod: **1100-NT-OG**

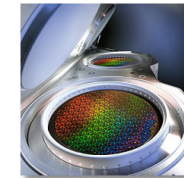
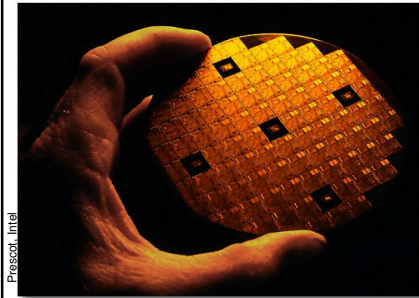
↓ Top-down



Vincent Laforet/The New York Times

Top-down, czyli małe jest piękne!

Nanotechnologia
Litografia
Udoskonalenia
Galeria
Fizyka na Hożej



Nanotechnologia

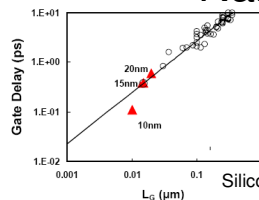


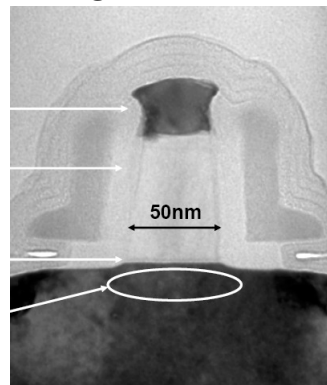
Figure 3: Gate delay vs. transistor physical gate length L_G .

Silicide layer

Silicidn gate electrode

1.2 nm SiO_2 gate oxide

Strained Silicon



50 nm generation transistor (Intel 2003)

Intel 2Q 2003:
Oxide thickness: ~ 3 nm
Channel length: ~ 90 nm
Gate position: ~ 6 nm (!)
Characteristic time: ~ 1.6 ps
Subthreshold leakage: 0.01 mA/micron
Parasitic RSD contribution: < 16%
Energy per switching: 0.35 fJ
Static power dissipation: 5.6 nW

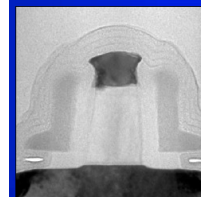
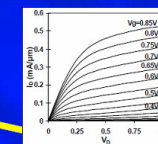
Źródło: Intel

Nanotechnologia

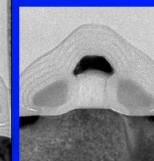
Planar CMOS Transistor Scaling

Today

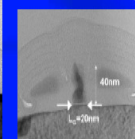
Future



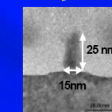
50 nm L_{GATE}



30 nm L_{GATE}



20 nm L_{GATE}



15 nm L_{GATE}

Intel R&D groups exploring aggressive scaling
of conventional planar CMOS transistors

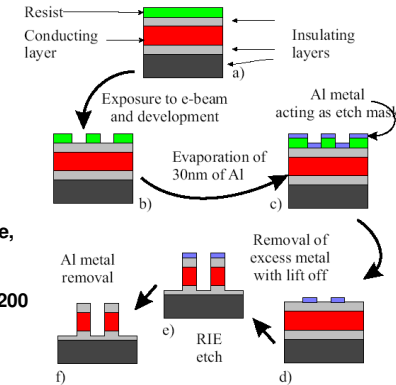
Źródło: Intel

Gdzie jest limit



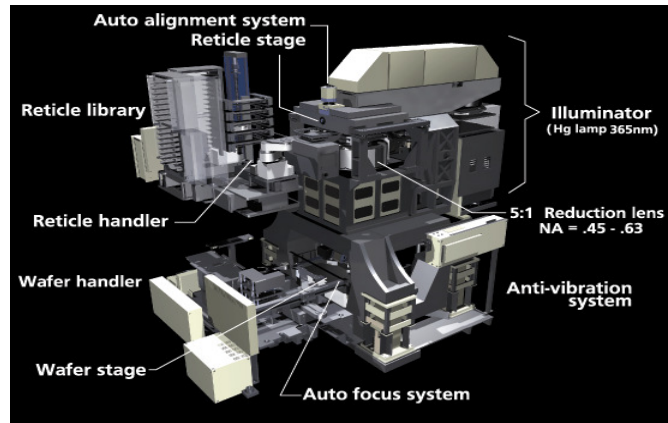
W jaki sposób produkowane są układy scalone?

1. Dominuje technologia krzemowa
2. Obecne układy $\sim 10^9 - 10^{10}$ tranzystorów
3. Podłoża - 300mm, $\sim 10^3$ chipów
4. Fotolitografia, naświetlanie, trawienie etc
5. Typowo ~ 20 masek, 150 - 200 kroków procesów



Nanotechnologia

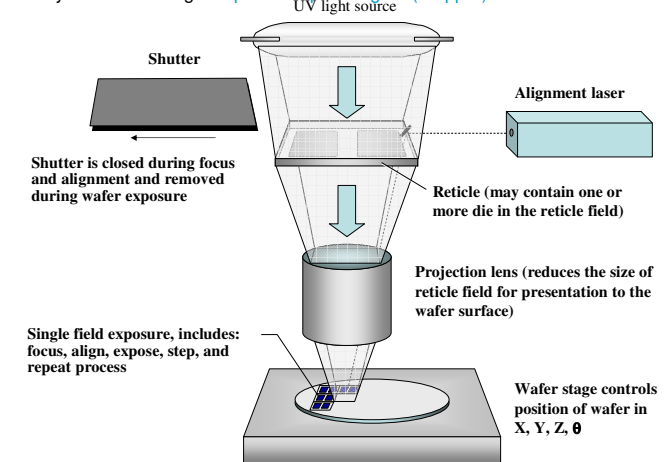
Maszyna do technologii Step-and-Repeat Aligner (Stepper)



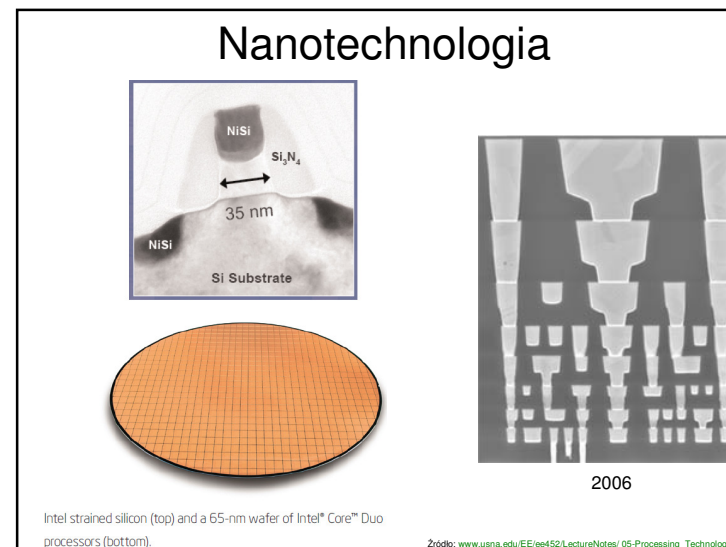
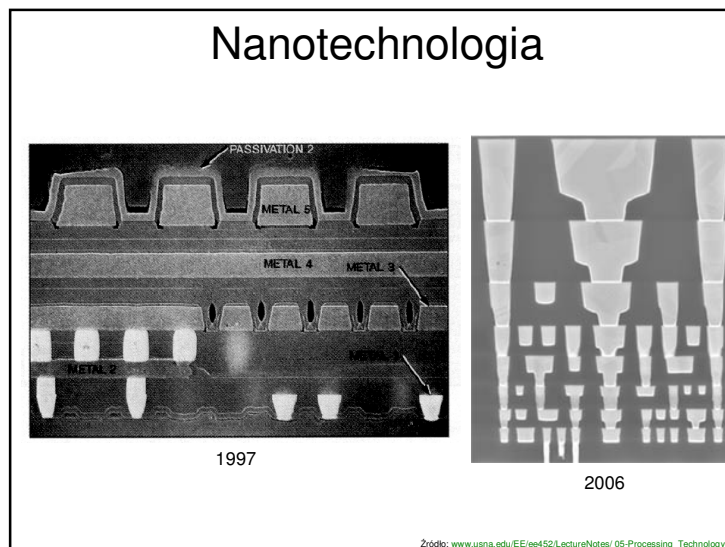
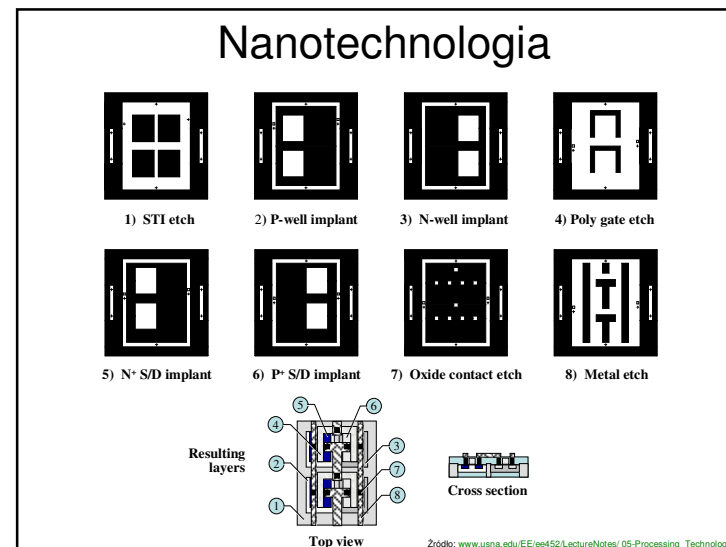
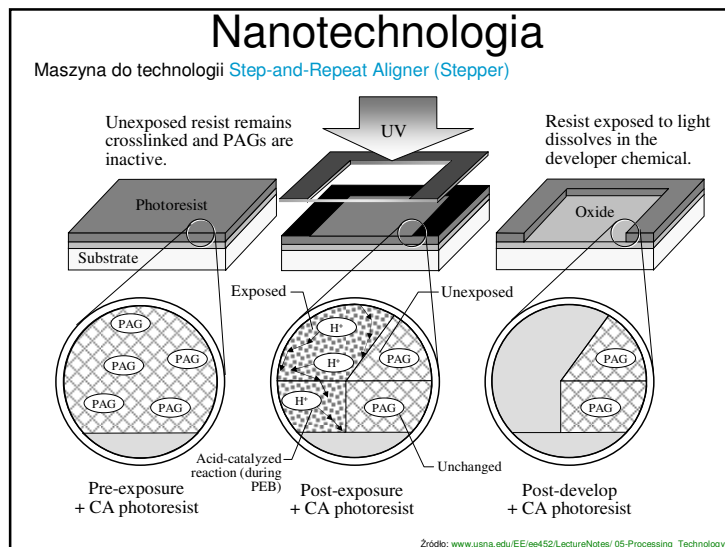
Źródło: www.usna.edu/EE/ee452/LectureNotes/05-Processing_Technology

Nanotechnologia

Maszyna do technologii Step-and-Repeat Aligner (Stepper)



Źródło: www.usna.edu/EE/ee452/LectureNotes/05-Processing_Technology



Nanotechnologia



Film

