

# Mikroelektronický nanosvět



Josef Humlíček Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Ústav fyziky kondenzovaných látek  
humlicek@physics.muni.cz  
3. dubna 2007



- Elektronika - přemístování náboje
- Tranzistor, Ge a Si
- MOSFET
- Integrace, Moorův zákon
  
- Nejmenší tranzistory
- Rozměry a rychlost
- Fundamentální limity
- Modifikace a alternativy
- Výhled

Řízený pohyb elektronů ve vakuové elektronice

počítač ENIAC na University of Pennsylvania

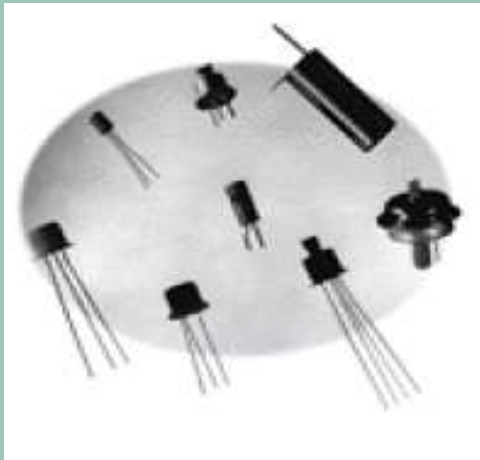


man changing one  
of 18,000 tubes

Bellovy laboratoře, prosinec 1947: Bardeen, Brattain & Shockley  
germaniový tranzistor, Nobelova cena 1956



Malý samočinný počítač (MSP2A z VÚMS Praha na PřF MU Brno)  
germaniové tranzistory Tesla Rožnov



# Krystalová struktura: diamant a grafit

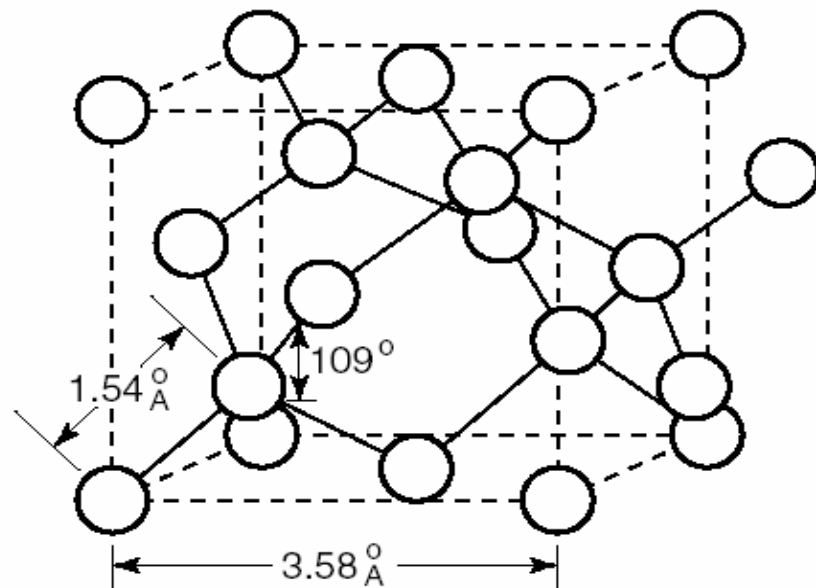


Figure 1-3. The crystal structure of diamond

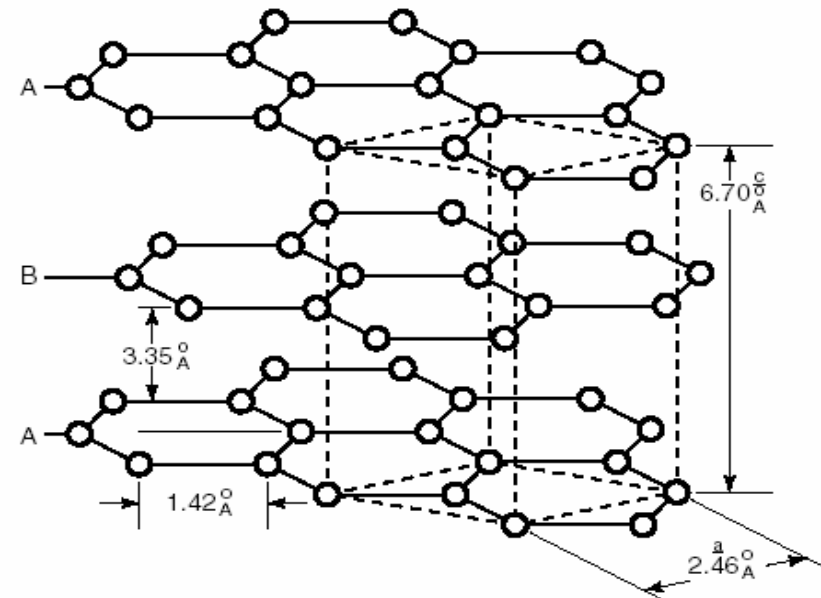


Figure 1-5. The crystal structure of graphite

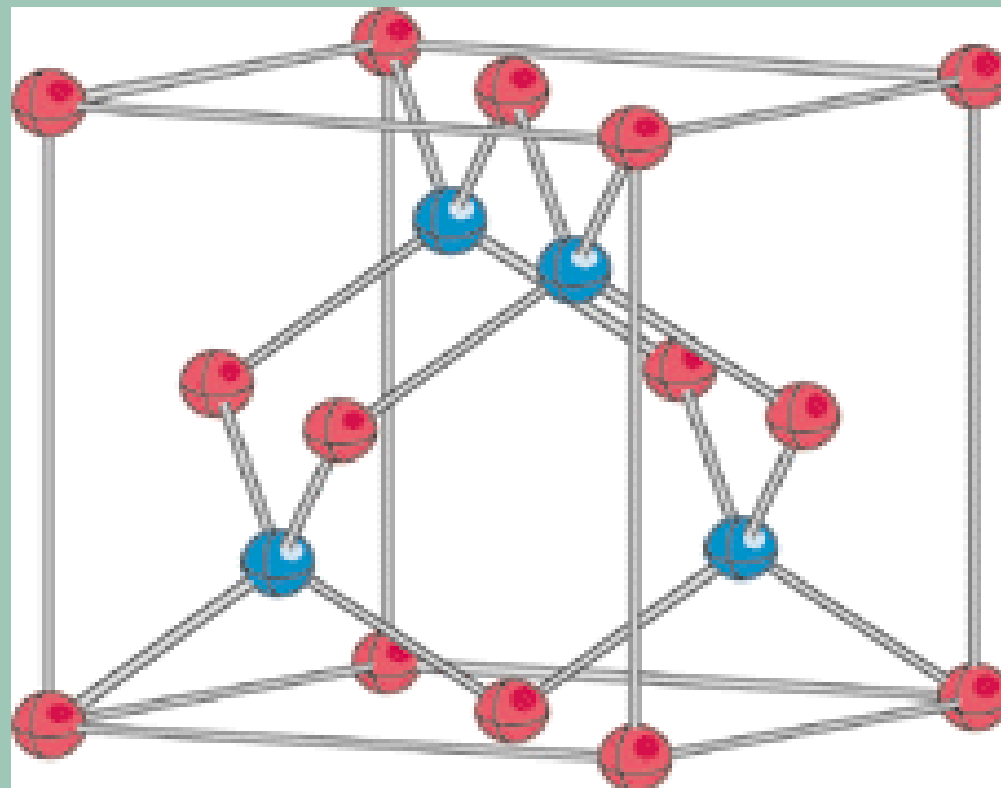
Diamantová struktura Si:

gap 1.1 eV

mřížková konstanta 0.543 nm

(8 atomů v krychli, vzdálenosti 0.234 nm)

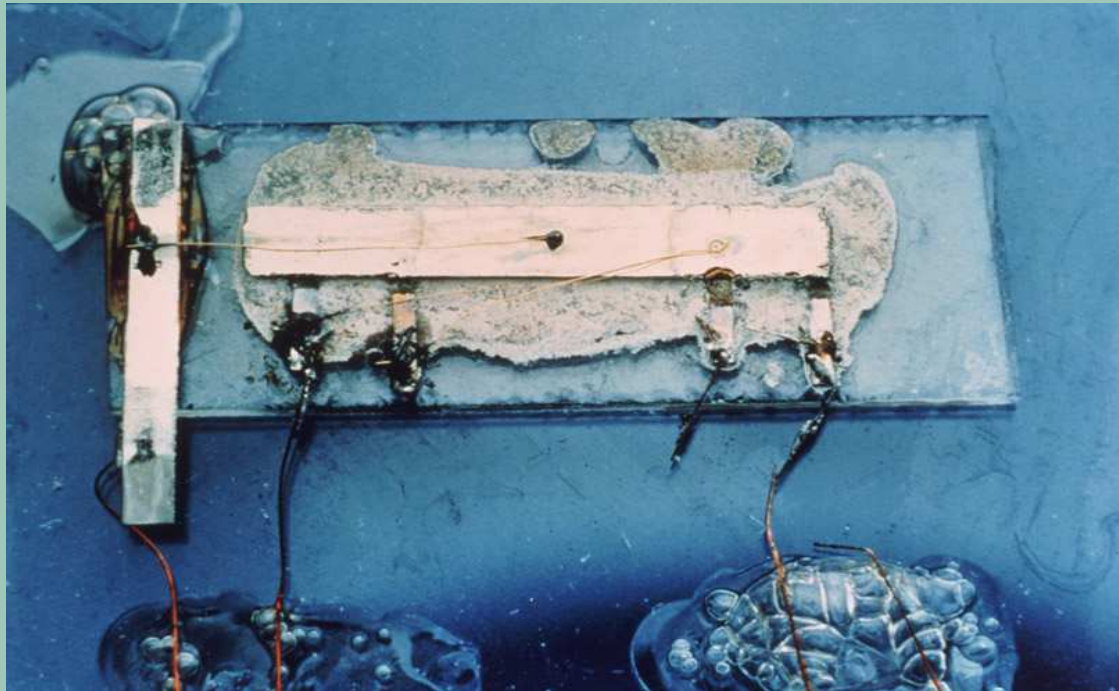
bod tání 1410 C



Idea „integrovaného obvodu“: Geoffrey Dummer (RRE Malvern)

Robert Noyce (Fairchild Semiconductor): integrace v Si

Jack Kilby (Texas Instruments, 1958): integrovaný obvod v Ge, Nobelova cena 2000

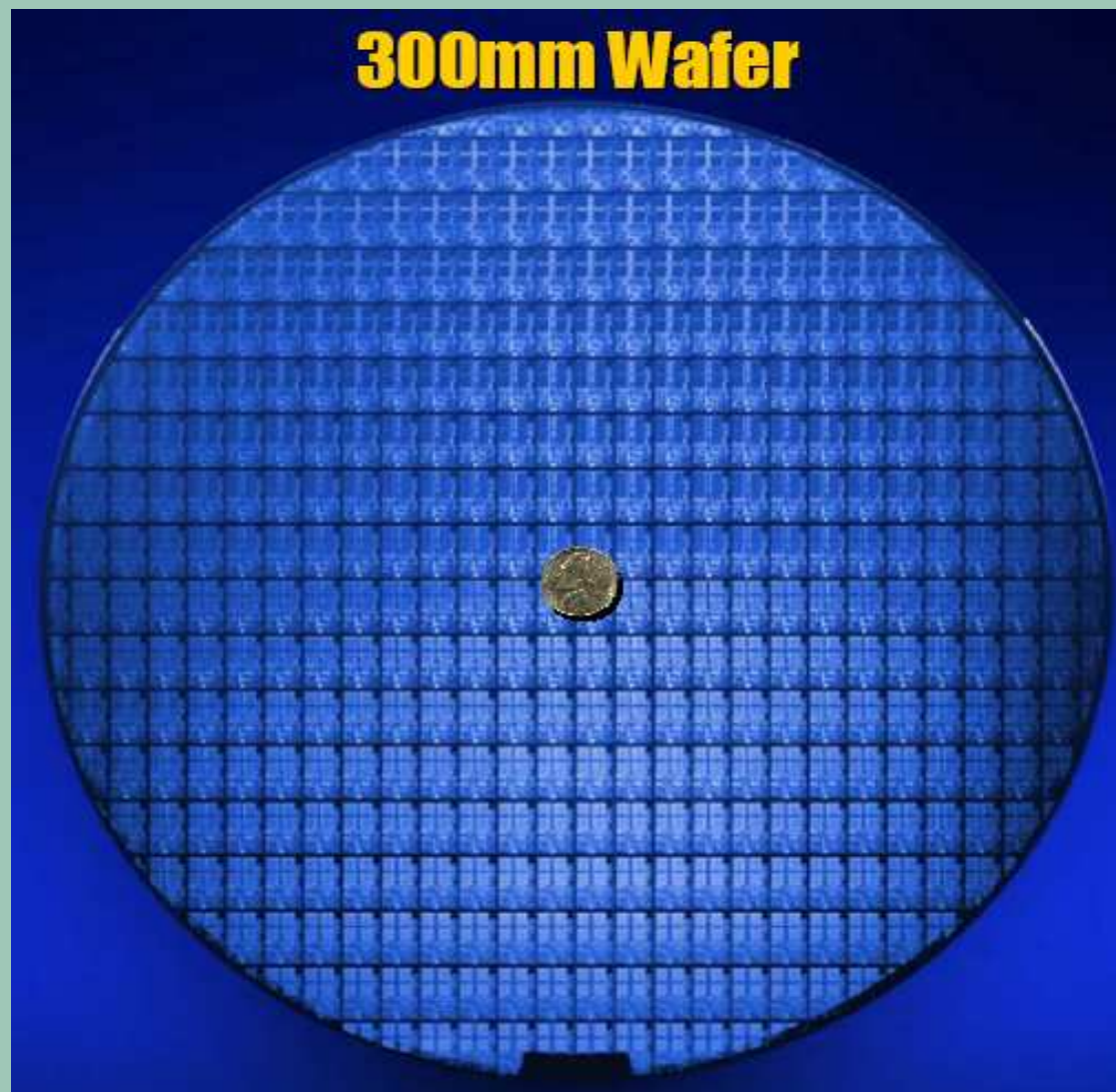




Kilby 1958

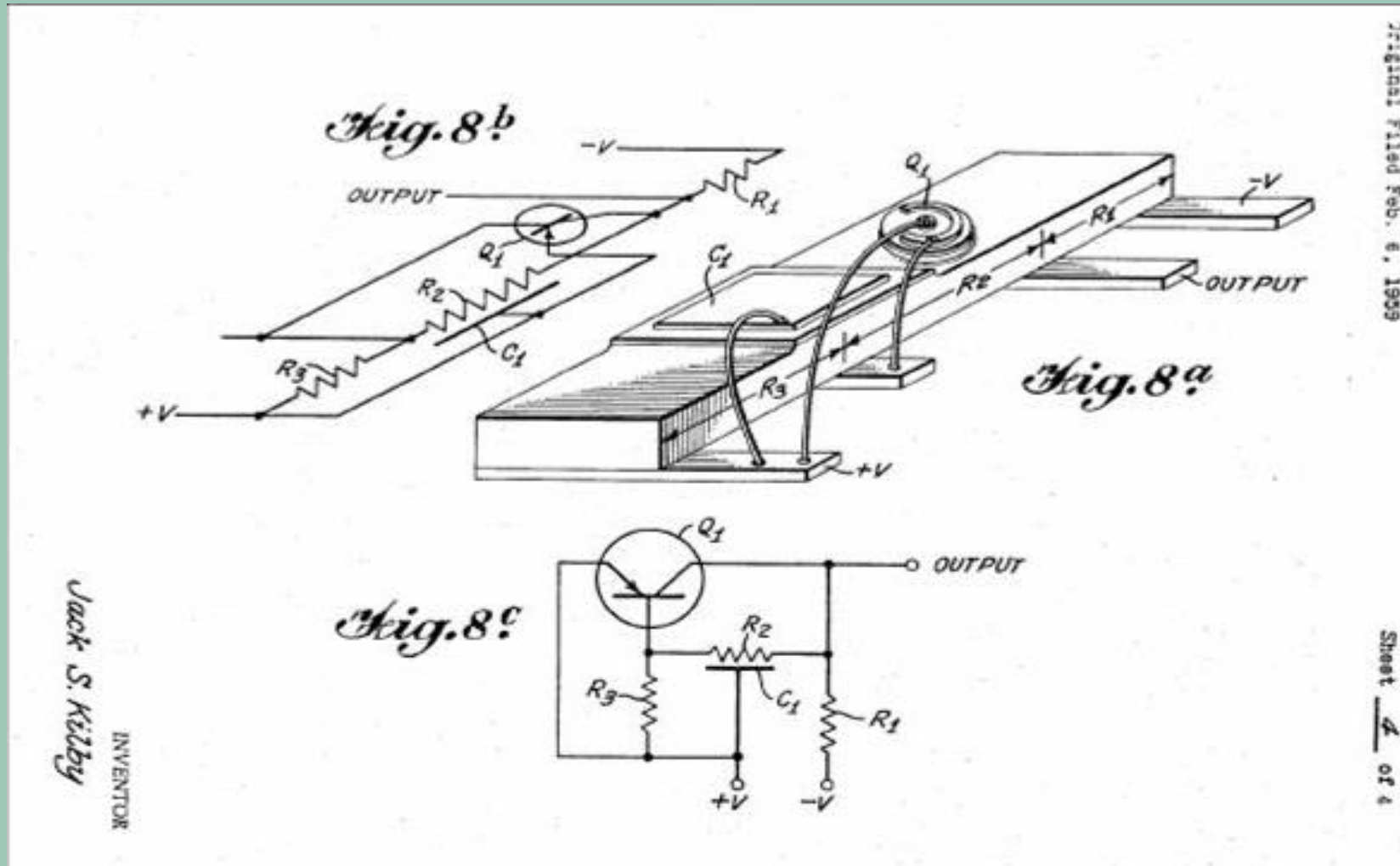


Intel (**I**ntegrated **e**lectronics, zakladatelé  
Moore a Noyce 1968) 2006: 300 → 450 mm



Jack Kilby U.S. Patent 3,434,015

obrázky ze souboru pat3434015.pdf (Google vyhledá za 0.1 s)



Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965

The experts look ahead

# Cramming more components onto integrated circuits

With unit cost falling as the number of components per circuit rises, by 1975 economics may dictate squeezing as many as 65,000 components on a single silicon chip

By Gordon E. Moore

Director, Research and Development Laboratories, Fairchild Semiconductor division of Fairchild Camera and Instrument Corp.

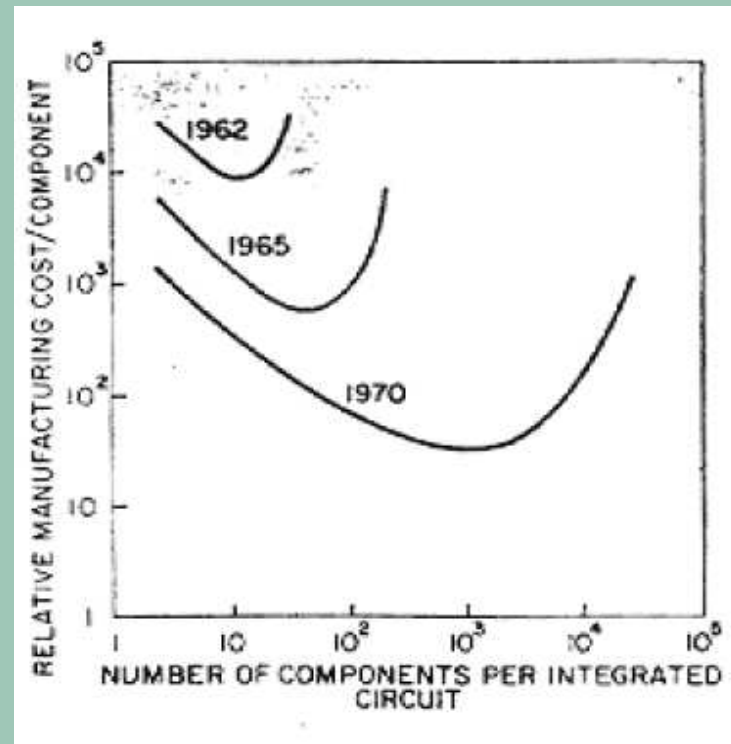
The author



Dr. Gordon E. Moore is one of the new breed of electronic engineers, schooled in the physical sciences rather than in electronics. He earned a B.S. degree in chemistry from the University of California and a Ph.D. degree in physical chemistry from the California Institute of Technology. He was one of the founders of Fairchild Semiconductor and has been director of the research and development laboratories since 1959.

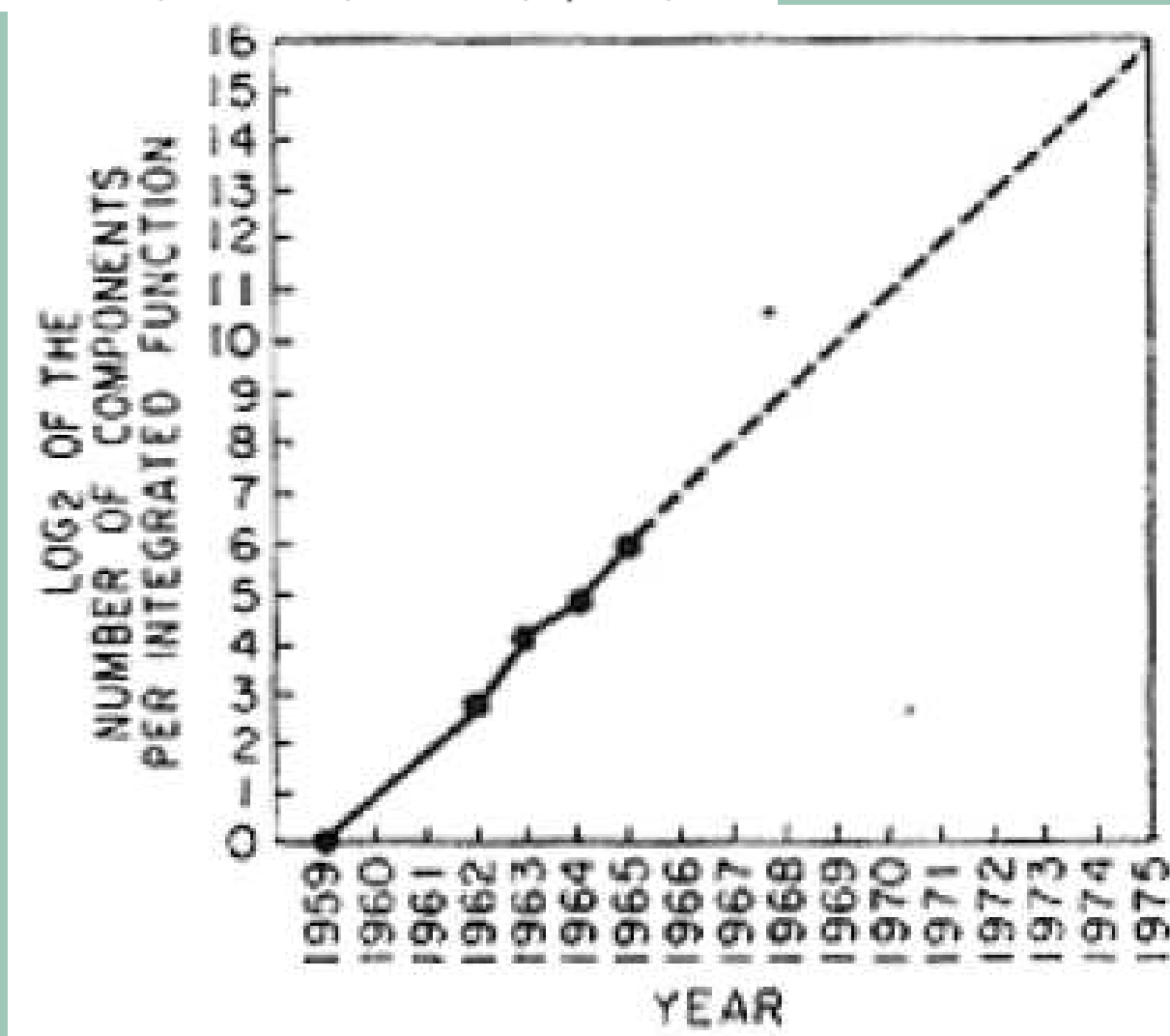
<ftp://download.intel.com/research/silicon/moorespaper.pdf>

Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965



# Moorův zákon v roce 1965

Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965



pozorování 1959-65:

$$2^6 = 64$$

dvojnásobek / rok

extrapolace do 1975:

$$2^{16} = 65536$$

extrapolace do 2006:  $2^{47}$

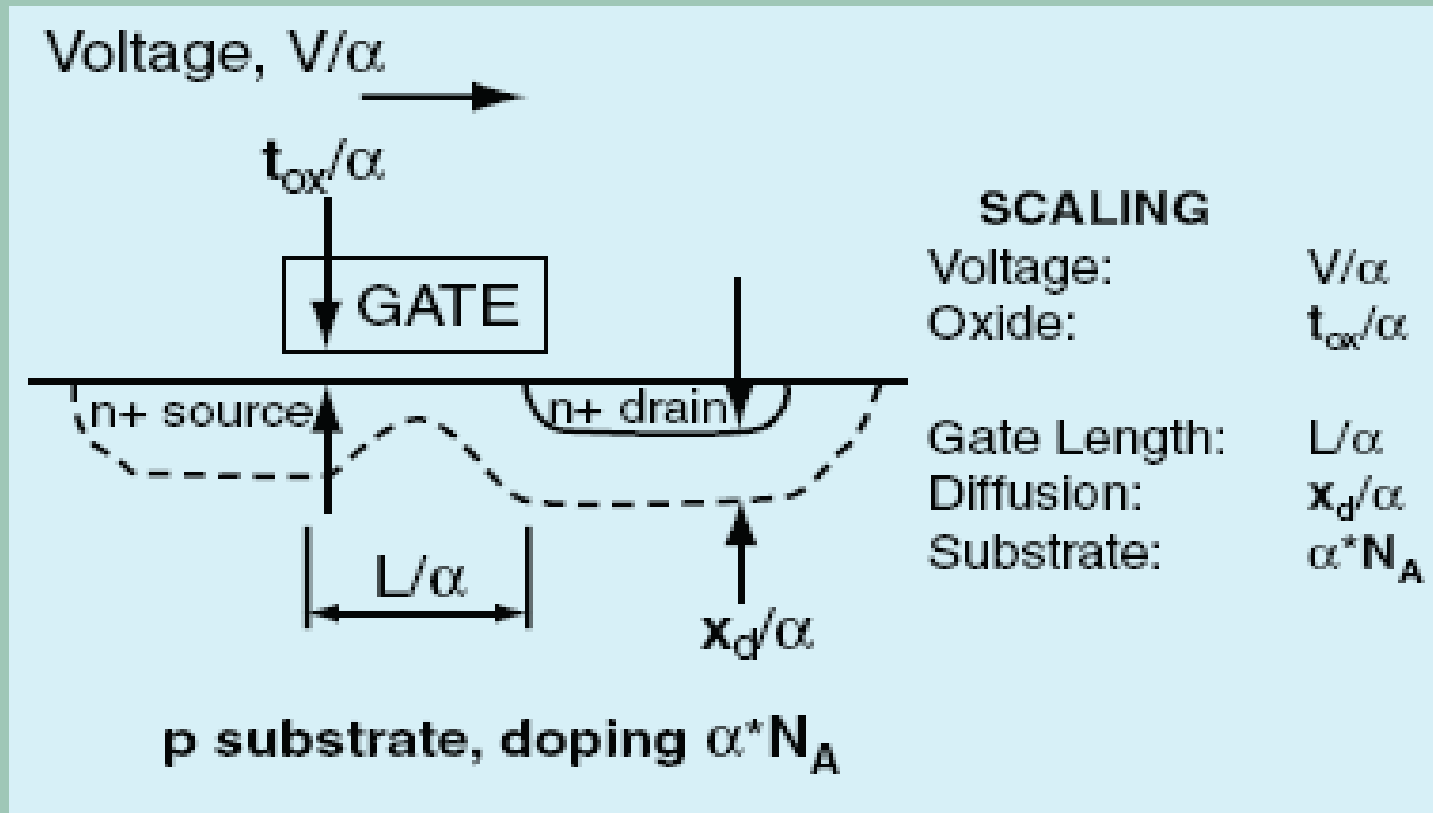
$$= 1.4 \times 10^{14} = 140000$$

miliard

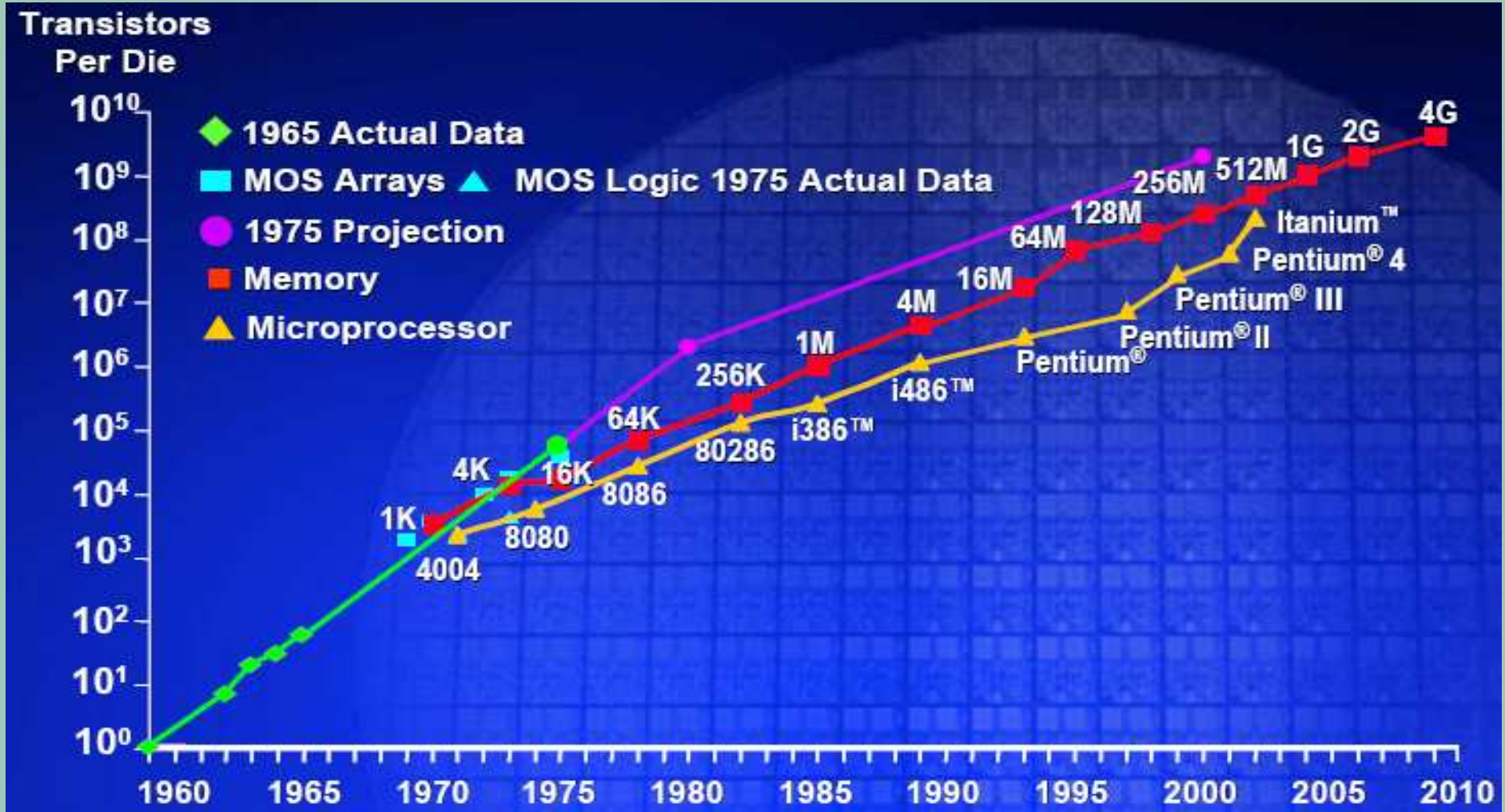
šachovnice (do 2023):

$$2^{64} = 1.8 \times 10^{19}$$

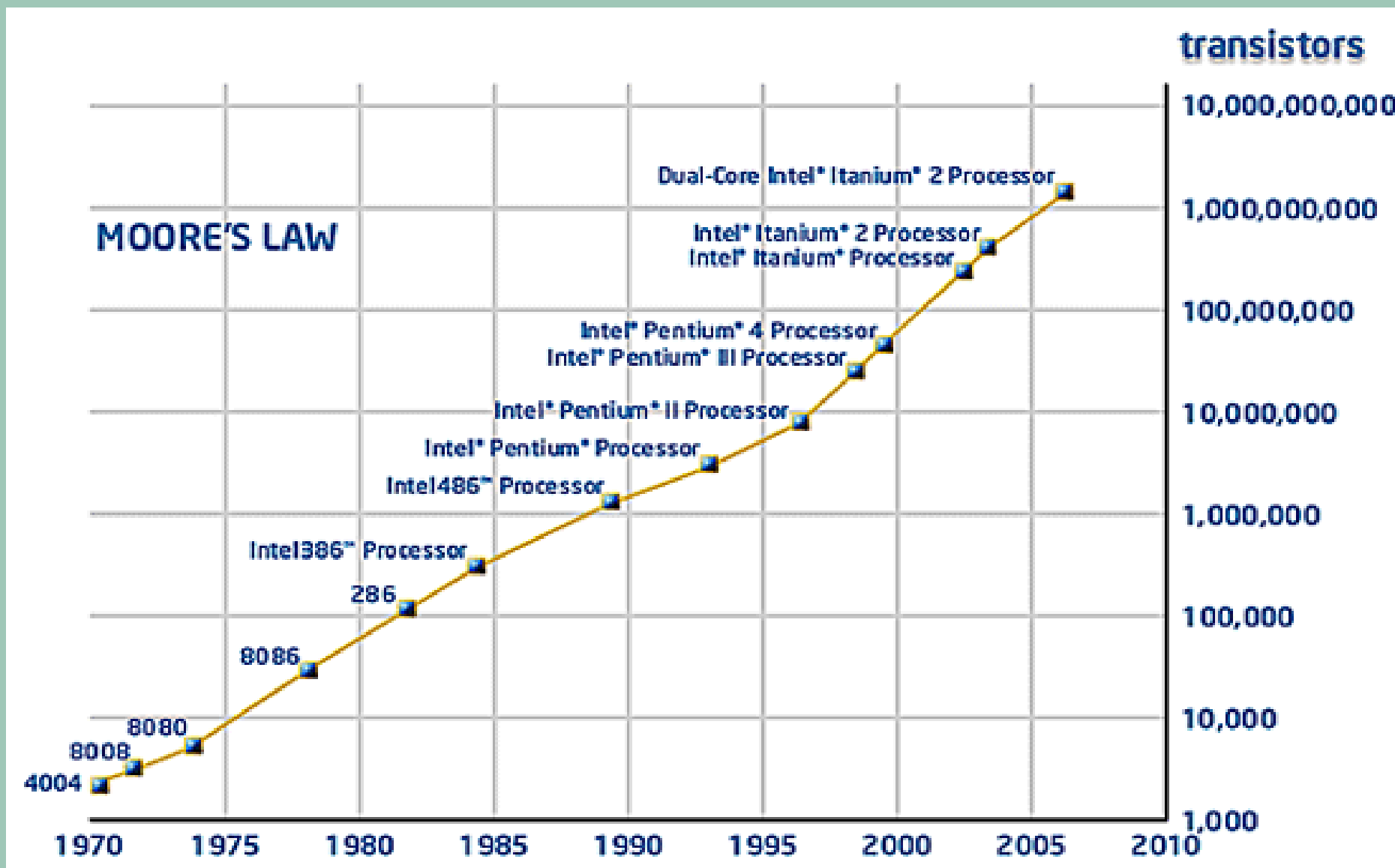
# MOSFET - "scaling"



# Moorův zákon po korekci 1975

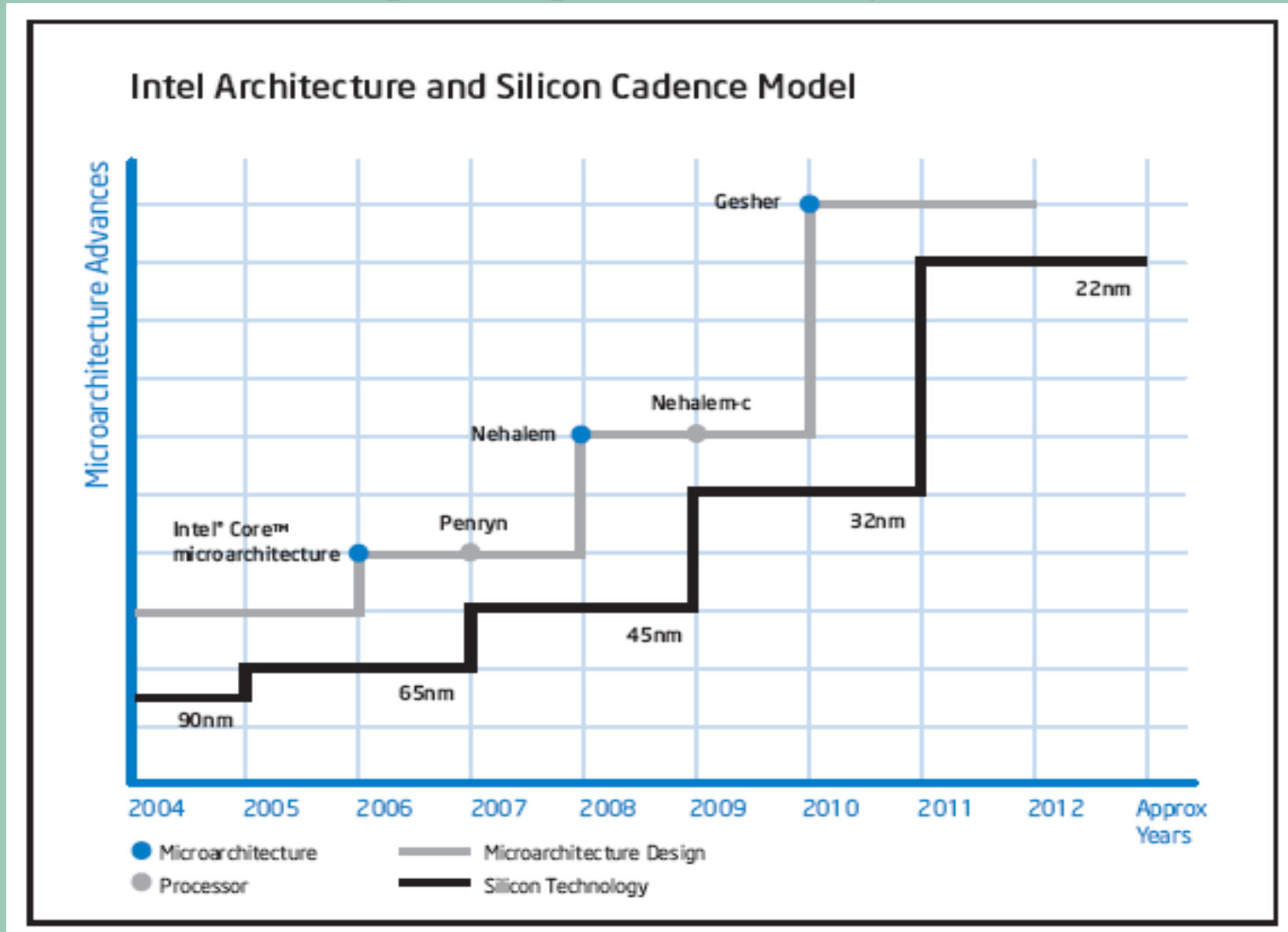


# Moorův zákon v roce 2006, procesory INTEL: dvojnásobek / 2 roky

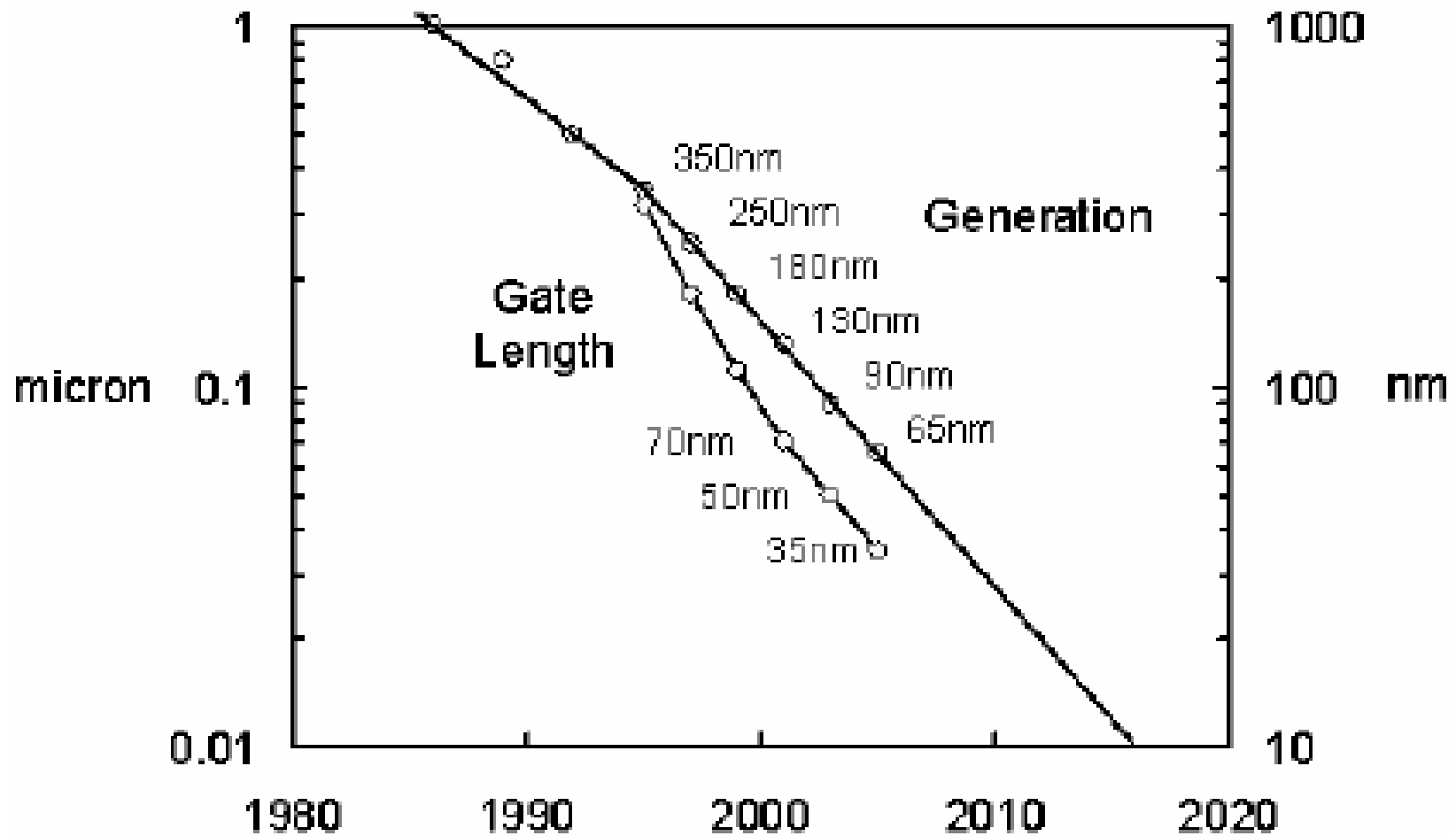




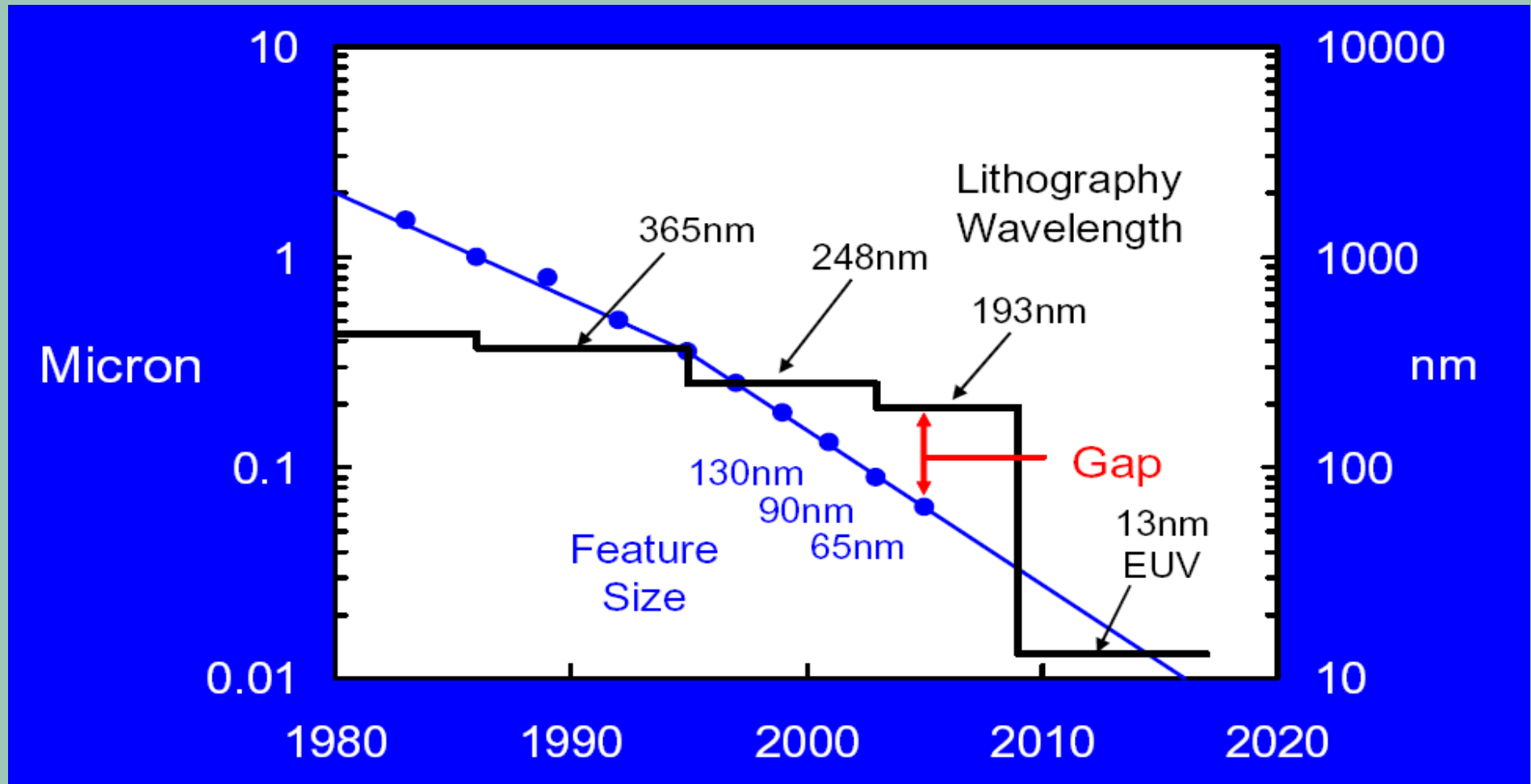
# Moorův zákon po roce 2006, procesory INTEL: perioda plánování 2 roky



# Rozměry tranzistoru v různých generacích technologie (Peng Bai et al., Intel)



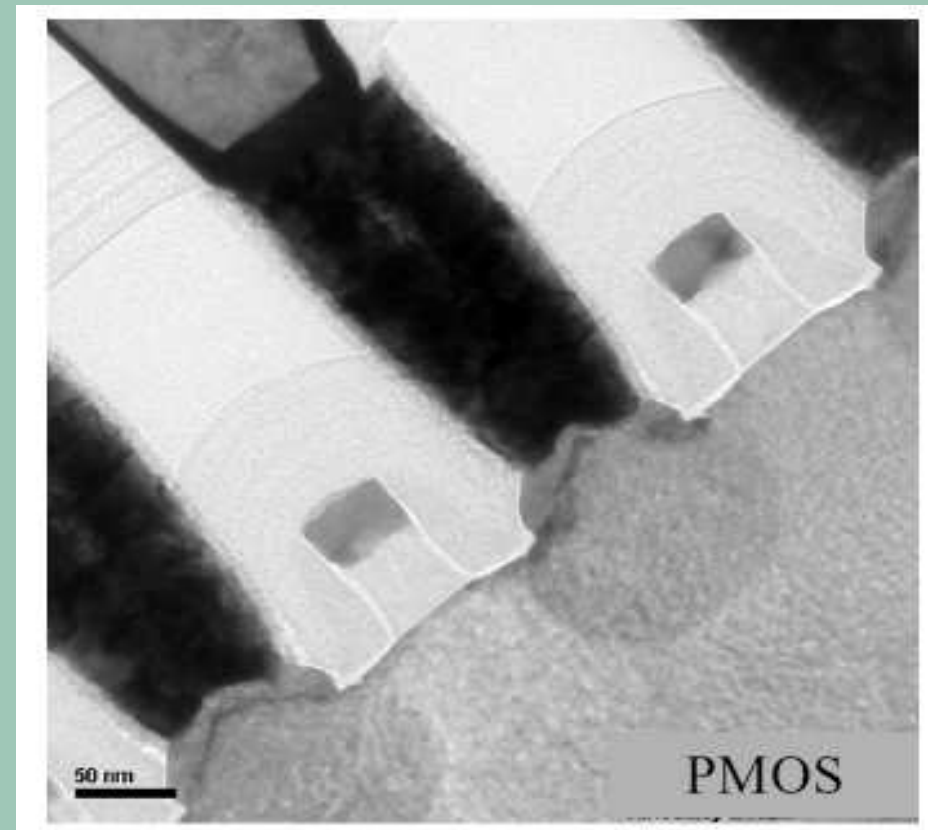
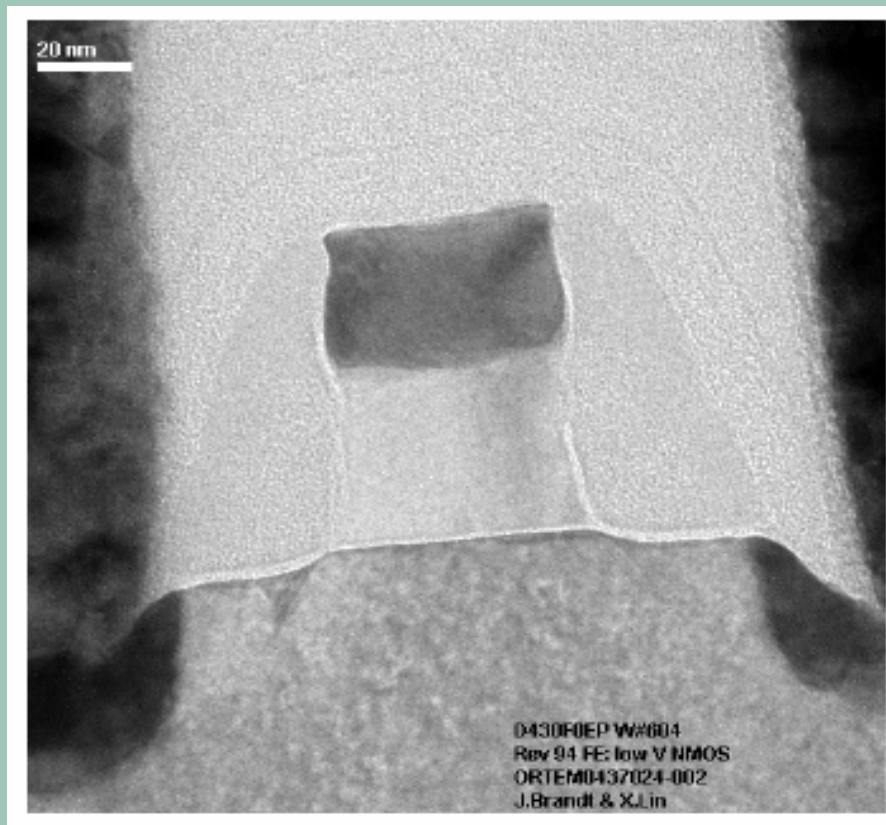
Tranzistor s hradlem 35 nm (Peng Bai et al., Intel)  
optická projekční litografie s vlnovou délkou 193 nm



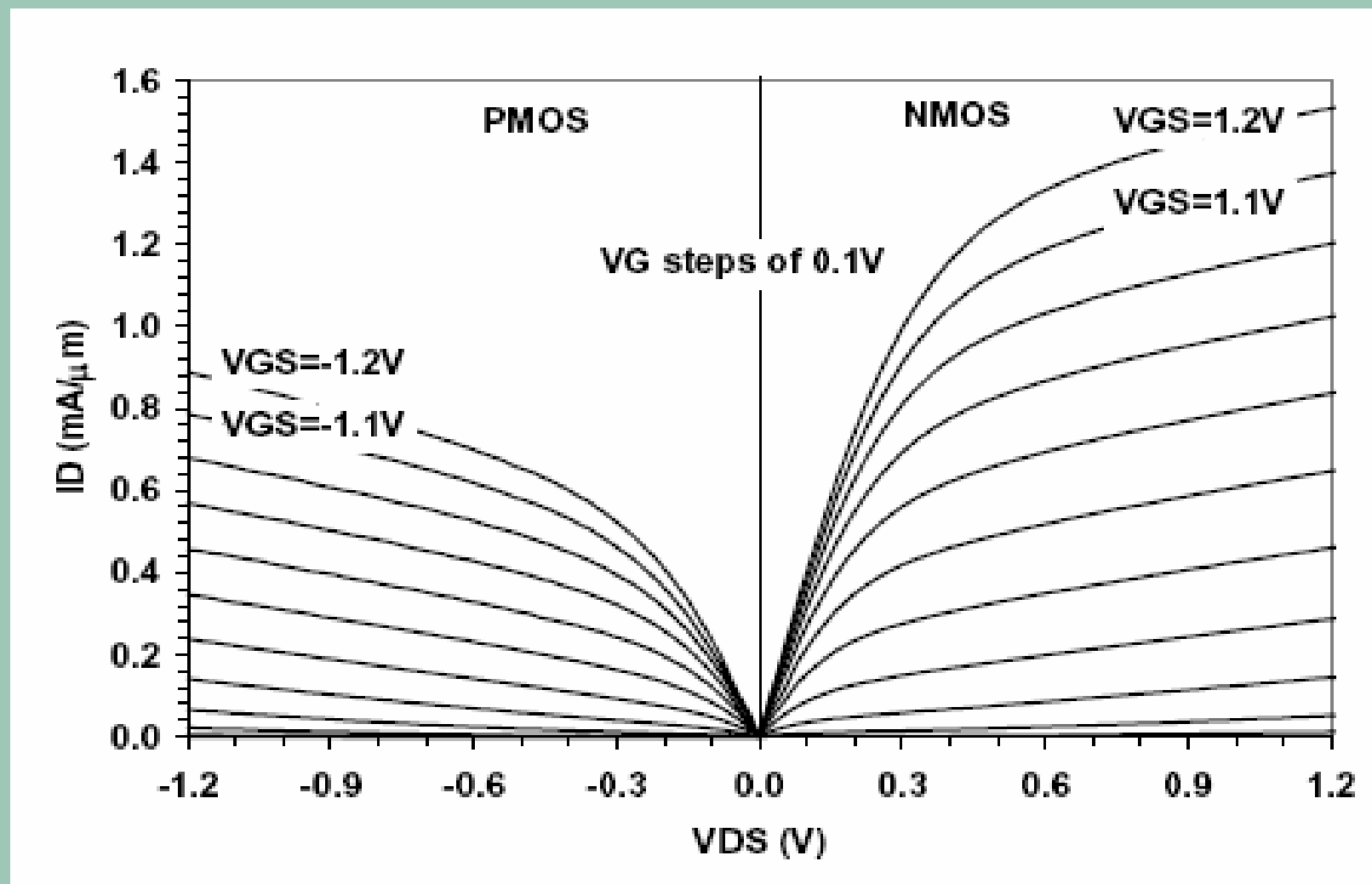
Tranzistor s hradlem 35 nm (Peng Bai et al., Intel)  
tloušťka oxidu 1.2 nm

NMOS

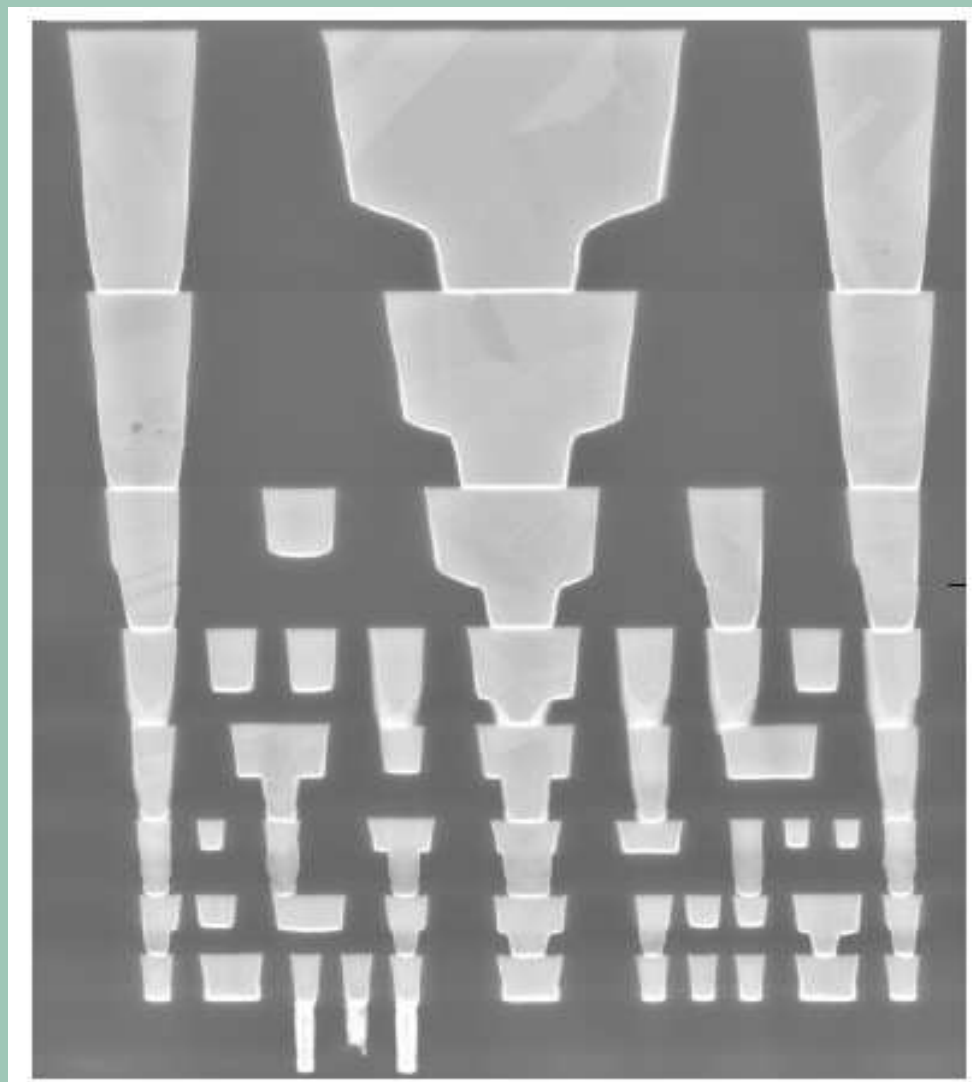
PMOS



Tranzistor s hradlem 35 nm (Peng Bai et al., Intel)  
spínání proudu napětím hradla

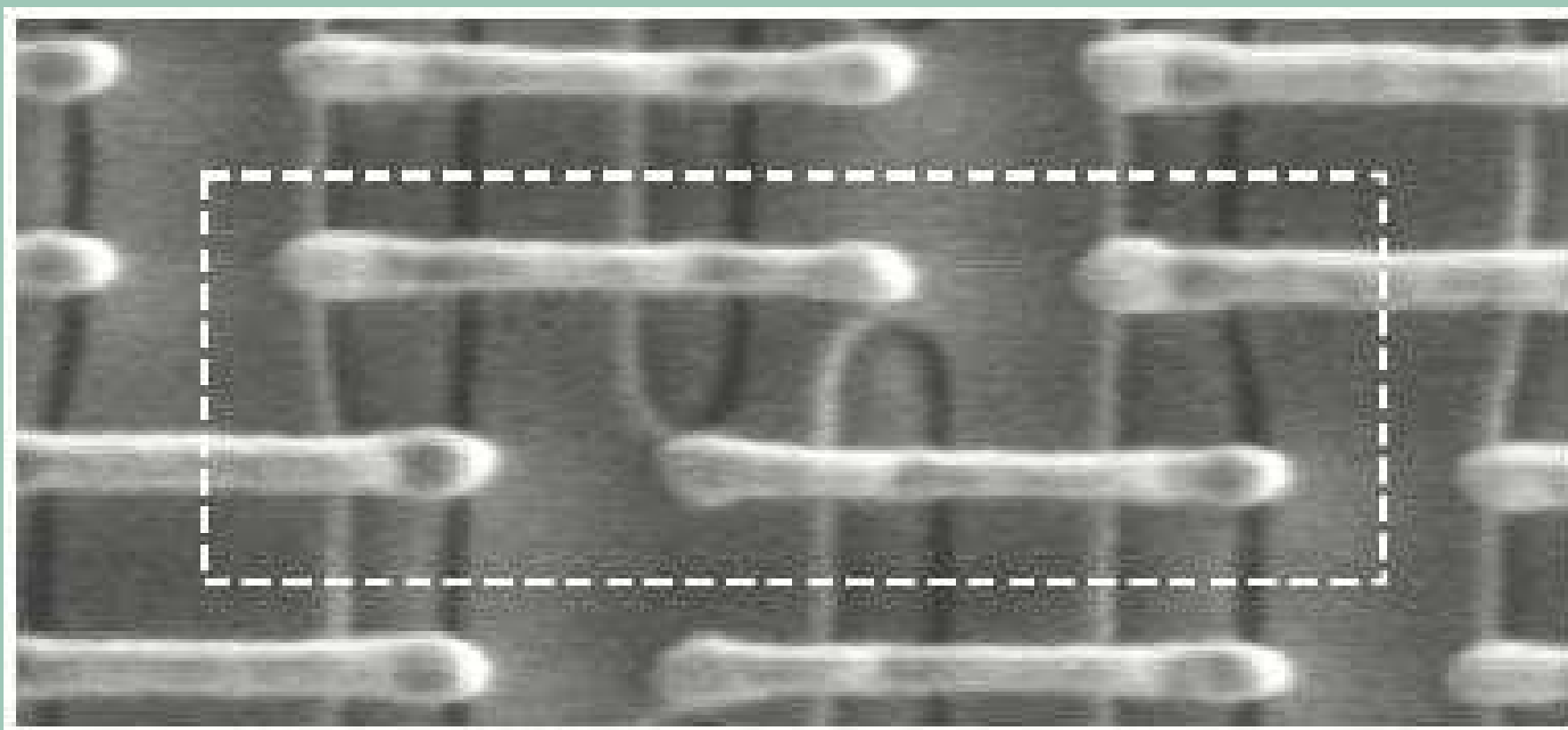


Tranzistor s hradlem 35 nm (Peng Bai et al., Intel)  
8 vrstev propojek (Cu)

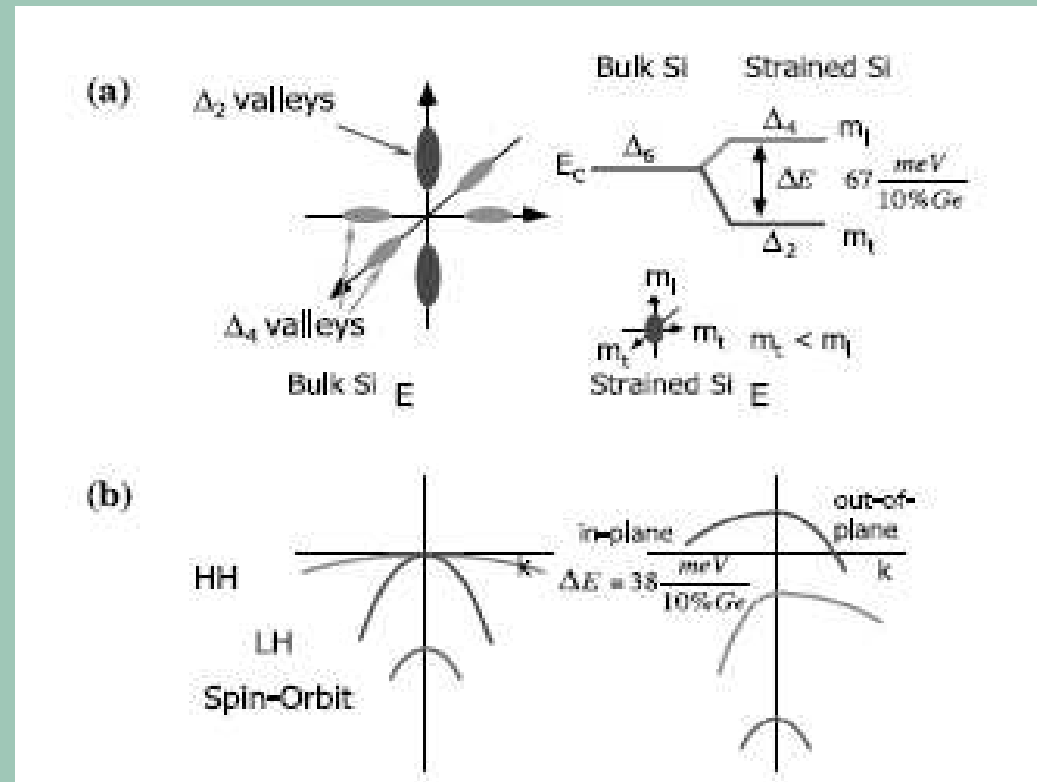
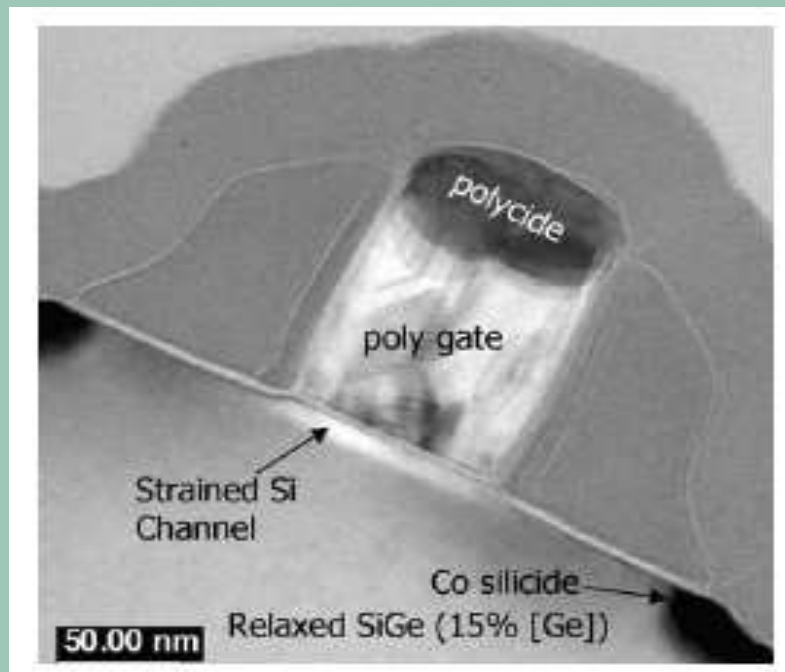
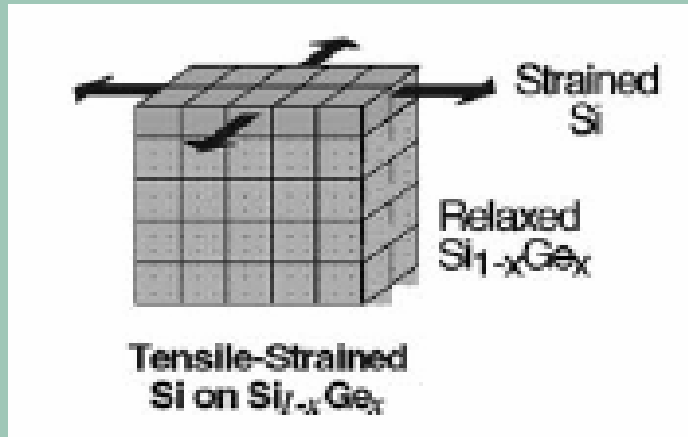


Tranzistor s hradlem 35 nm (Peng Bai et al., Intel)  
paměťová buňka SRAM  $0.57 \mu\text{m}^2$ , shora na úrovni poly-Si

na  $1 \text{ cm}^2$  se vejde  $17.5 \times 10^9$  takových buněk



# Zrychlení funkce: napětí/deformace ve struktuře SiGe/Si

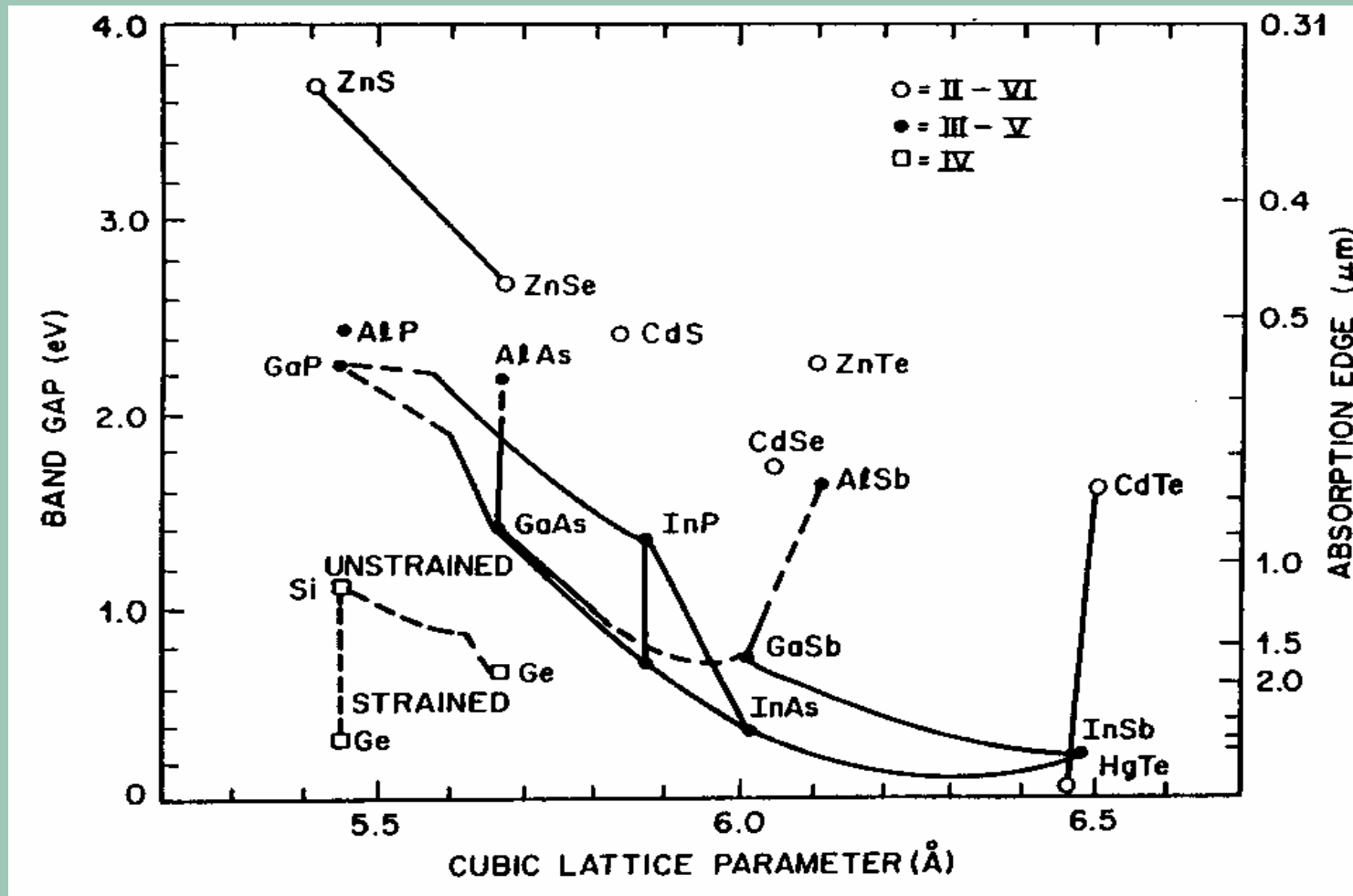




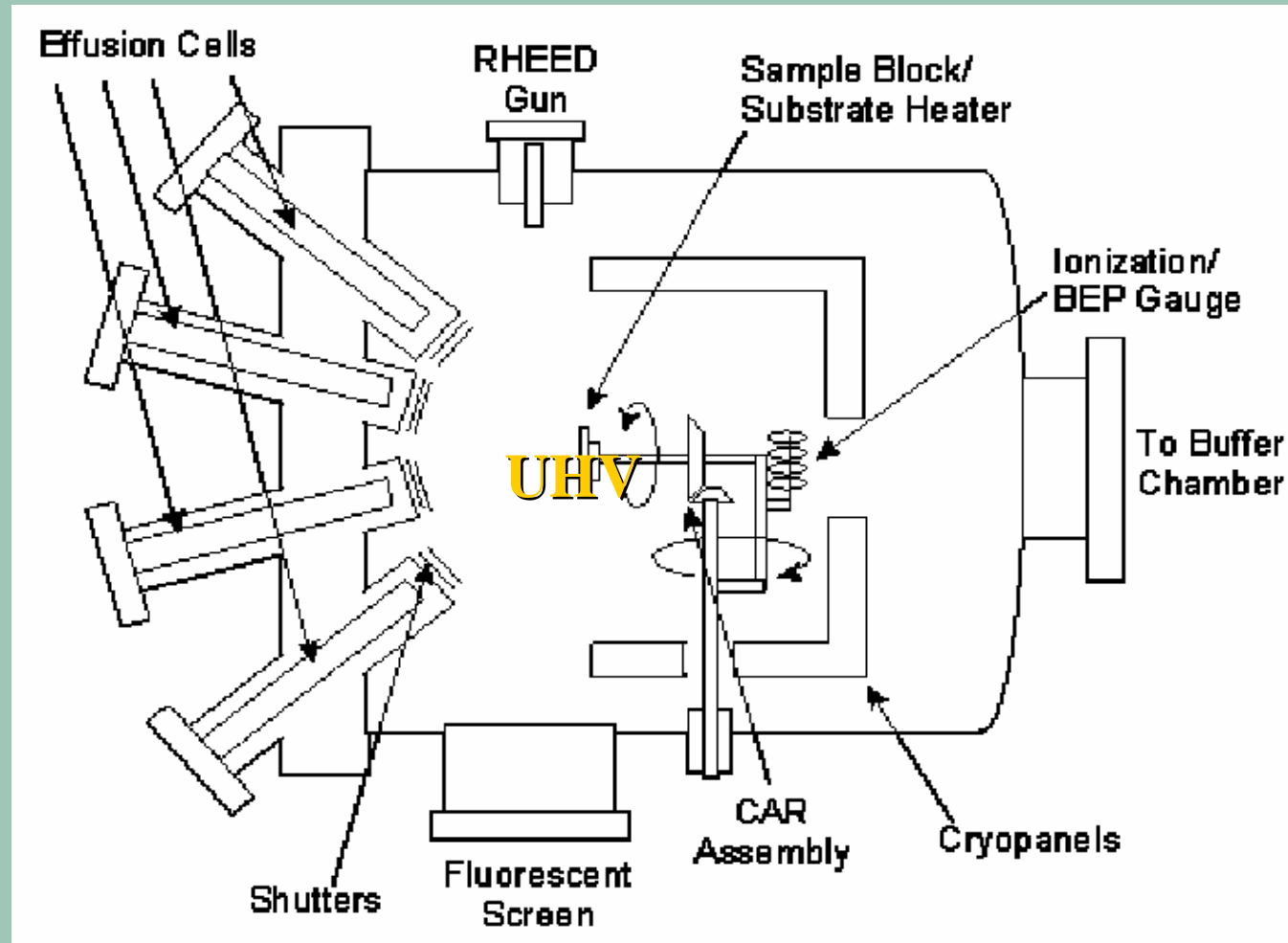
## Dveře do nanosvěta připravené k otevření kolem roku 1970:

Objemové polovodičové krystaly: nastavení energií elektronů výběrem materiálů a sléváním, transport náboje dopingem

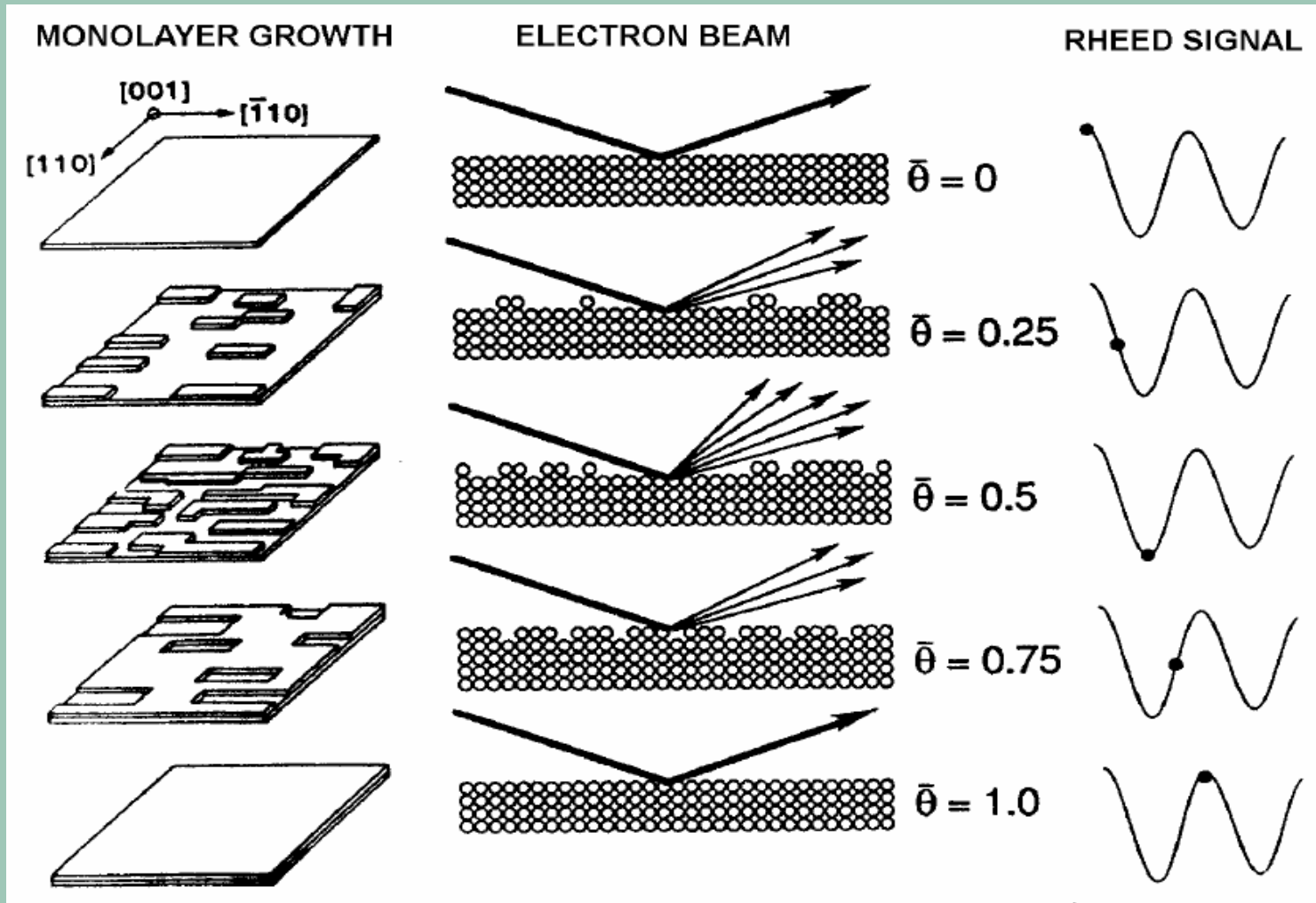
Kvantový popis mnohačasticových systémů s krystalovou symetrií



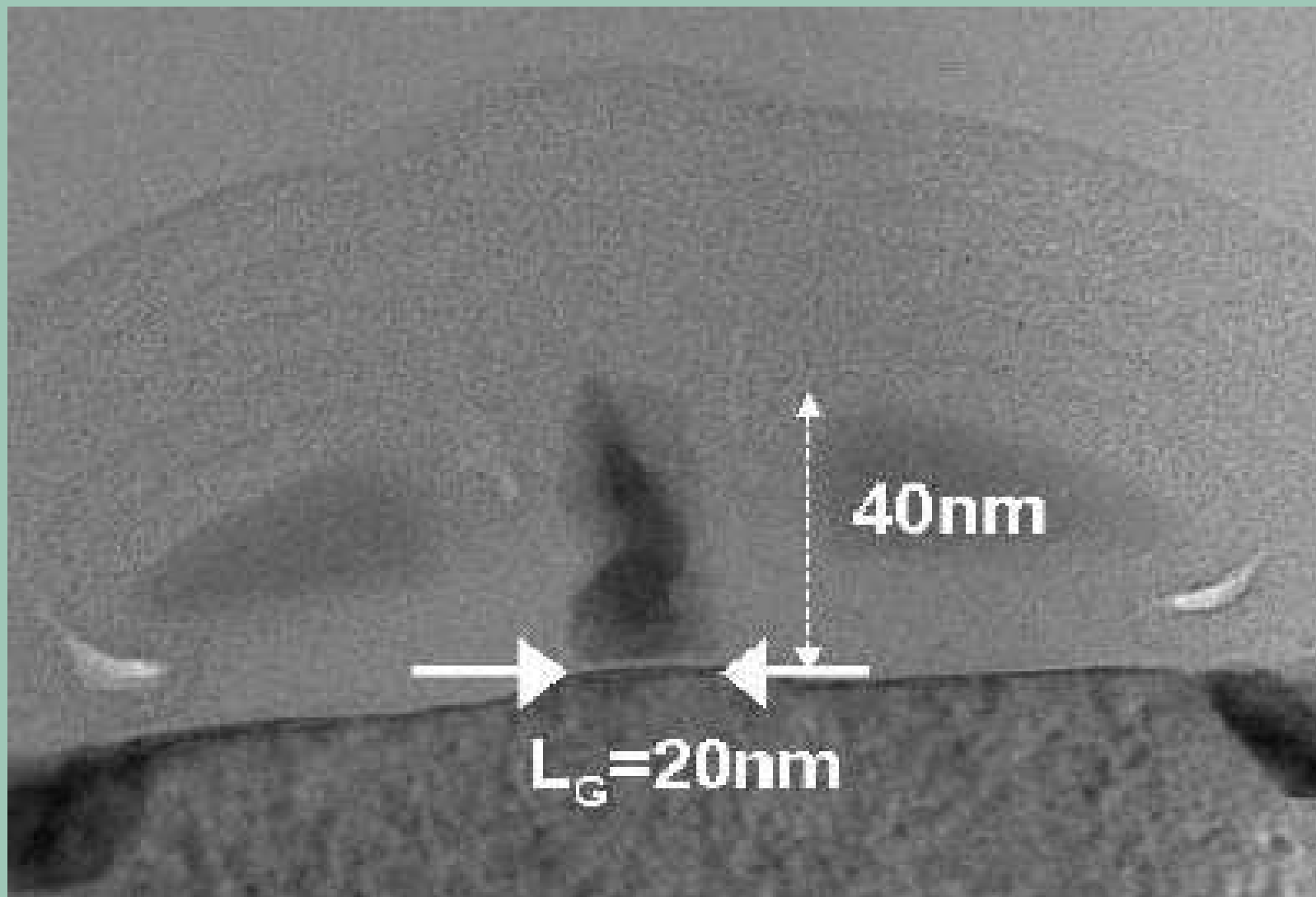
„Ideální“ technologie pro růst heterostruktur:  
epitaxe z molekulárních svazků (MBE)



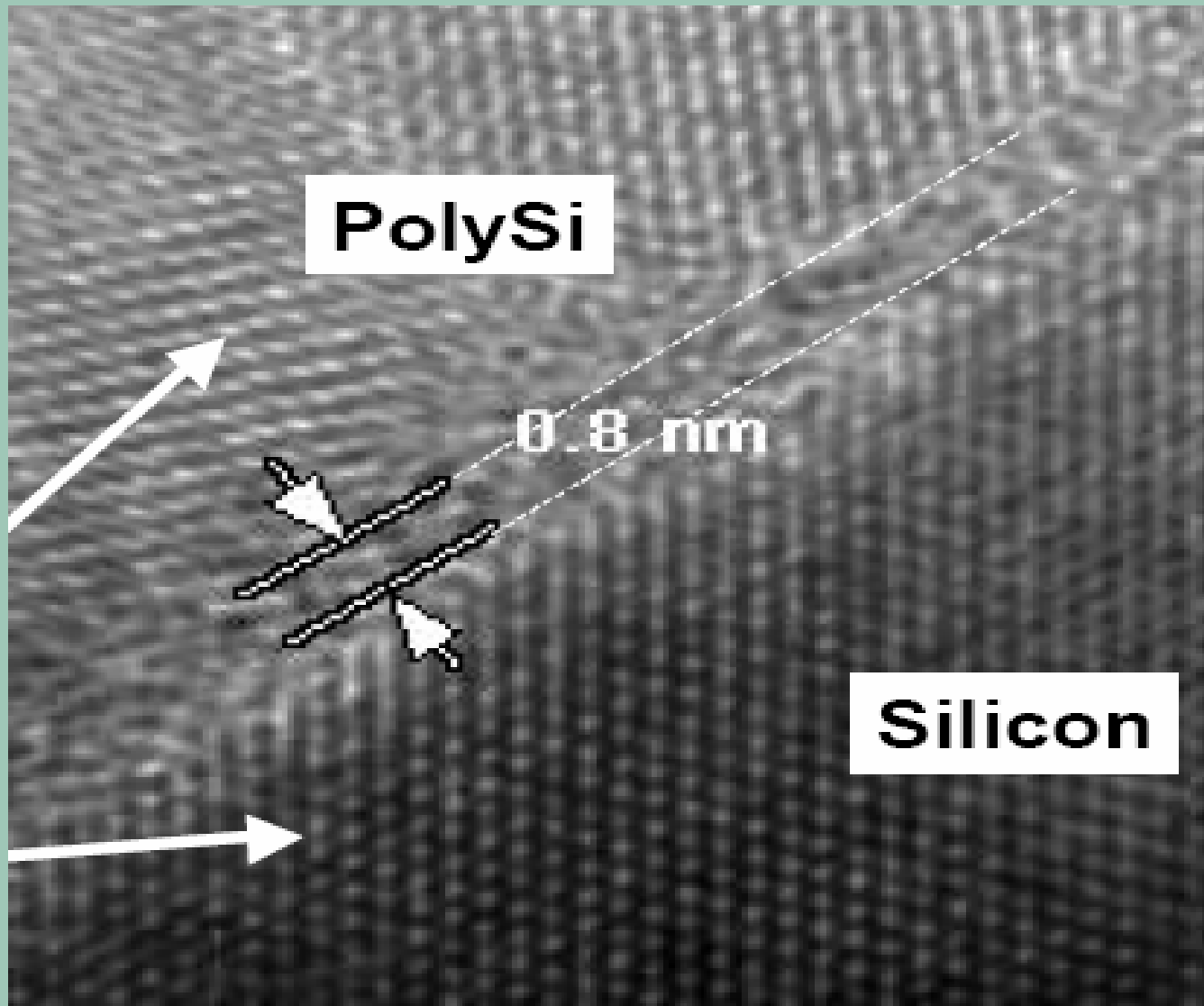
# Počítání monovrstev v reaktoru MBE pomocí difrakce elektronů (RHEED)



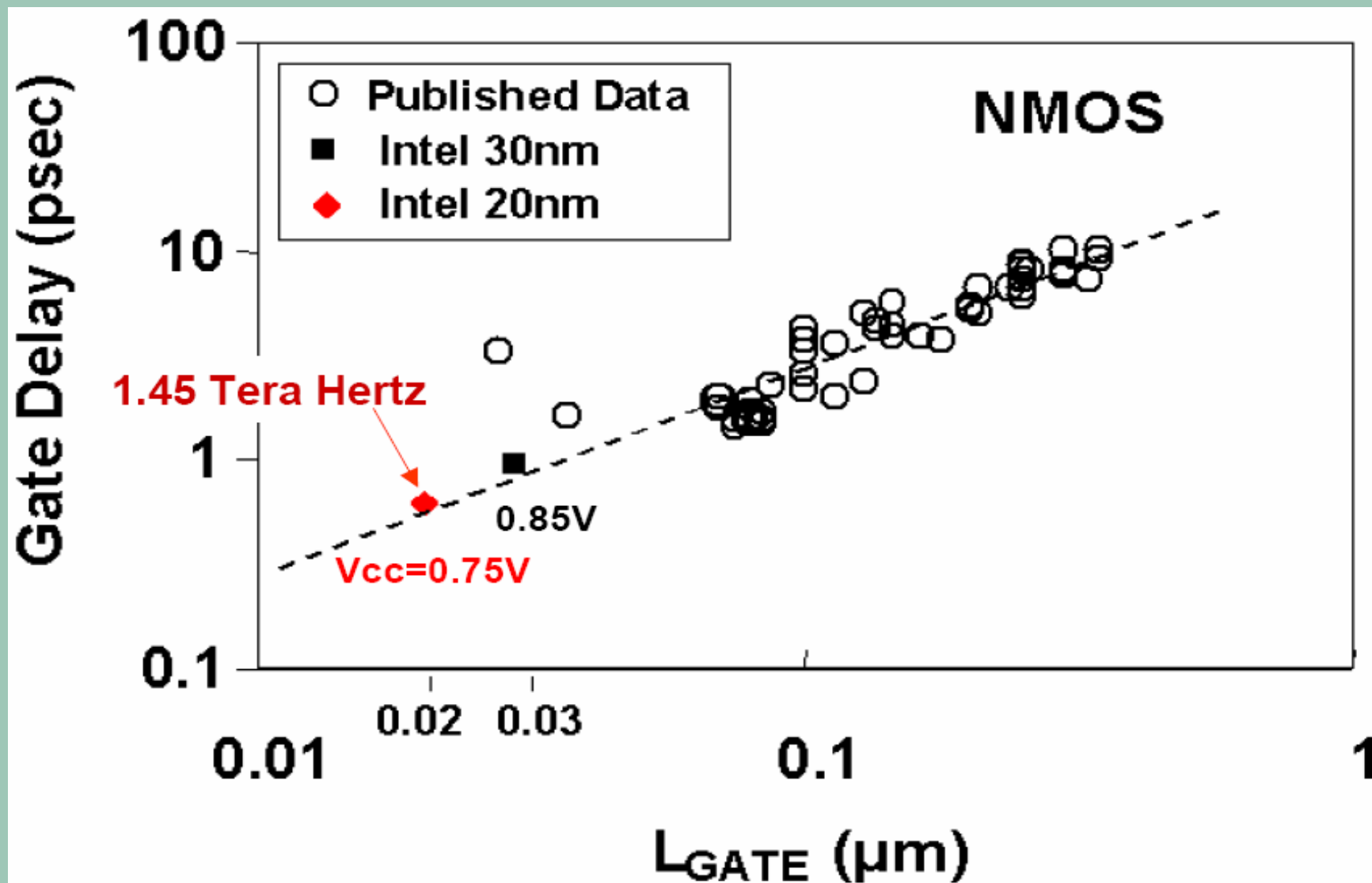
Intel: nejmenší tranzistor v Si, délka hradla 20 nm



Intel: “20 nm” tranzistor, tloušťka oxidu 0.8 nm



“20 nm” tranzistor, rychlost spínání (dosažitelná frekvence)



## Fundamentální omezení :

- tunelování elektronů izolační vrstvou hradla
- tunelování elektronů mezi S, D, substrátem
- výkon disipovaný v klidovém stavu tranzistoru
- fluktuace počtu atomů dopantů
- spolehlivé odlišení stavů, tepelný pohyb

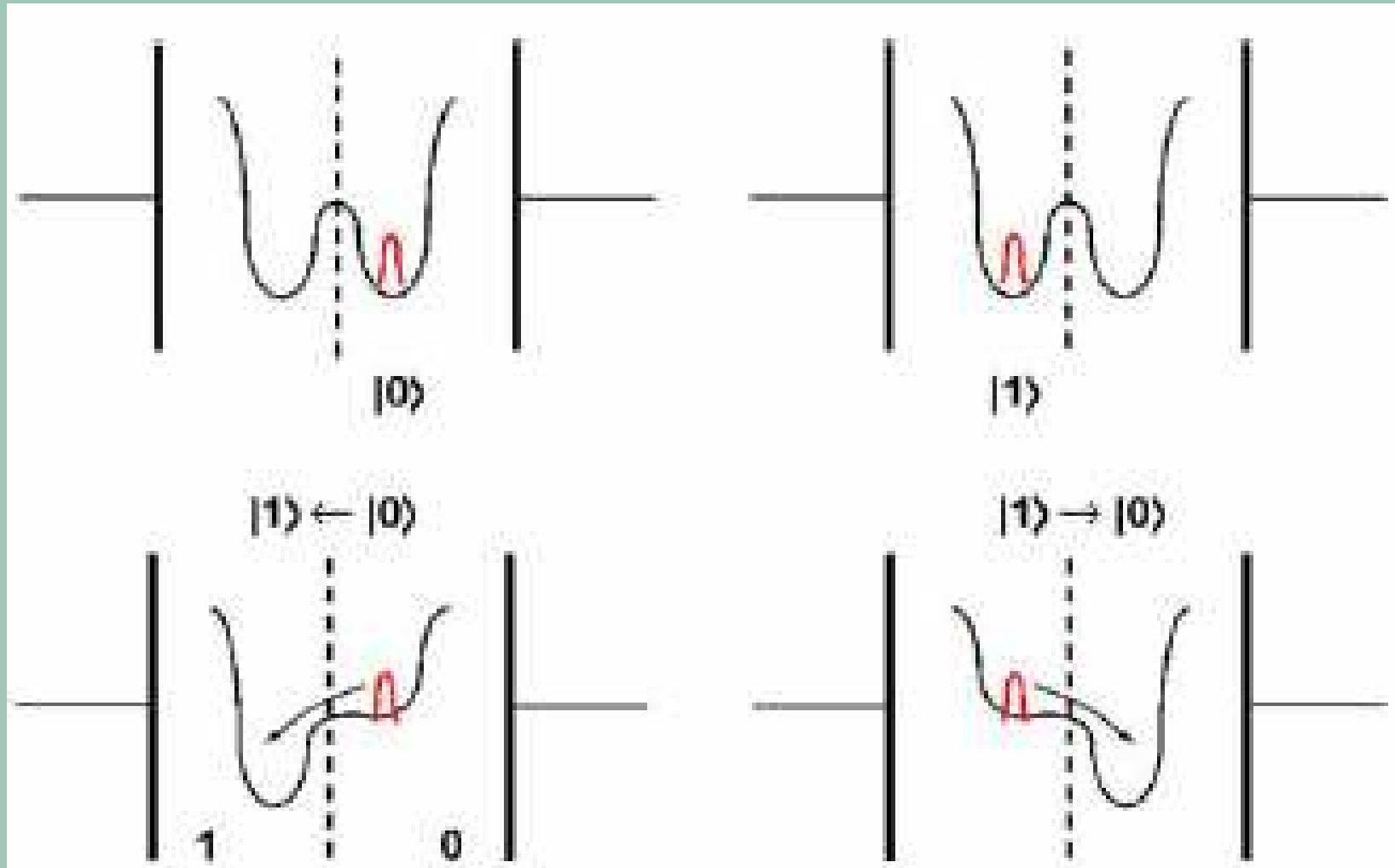
## 15 nm délky hradla je hranice(?):

na 1 cm<sup>2</sup> se vejde asi 10<sup>12</sup> tranzistorů

- Moorův zákon v platnosti ještě asi 15 let

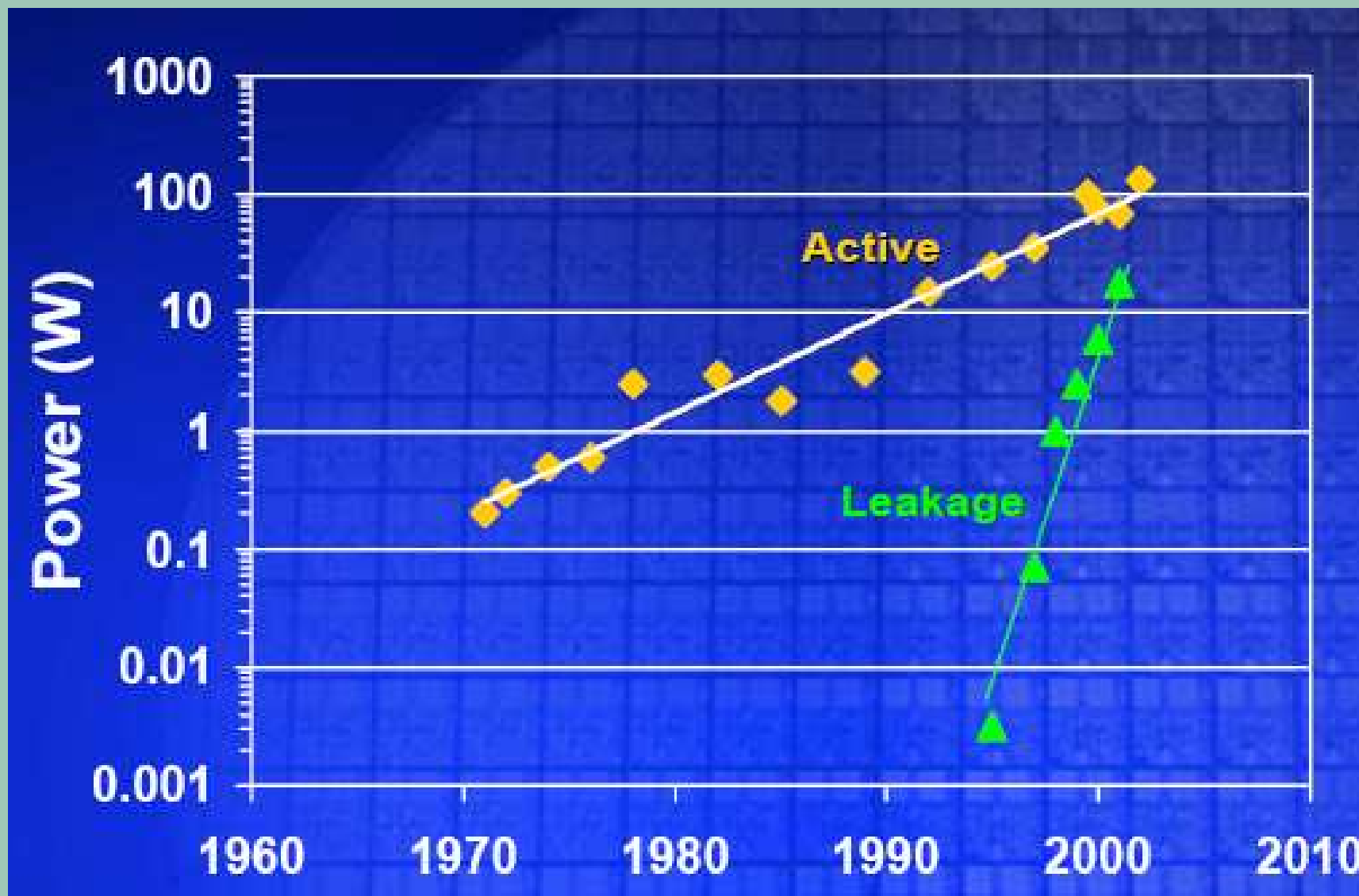
# Možnost programování a čtení paměťové buňky

Přechod z „Giga“ do „Tera“ zřejmě možný



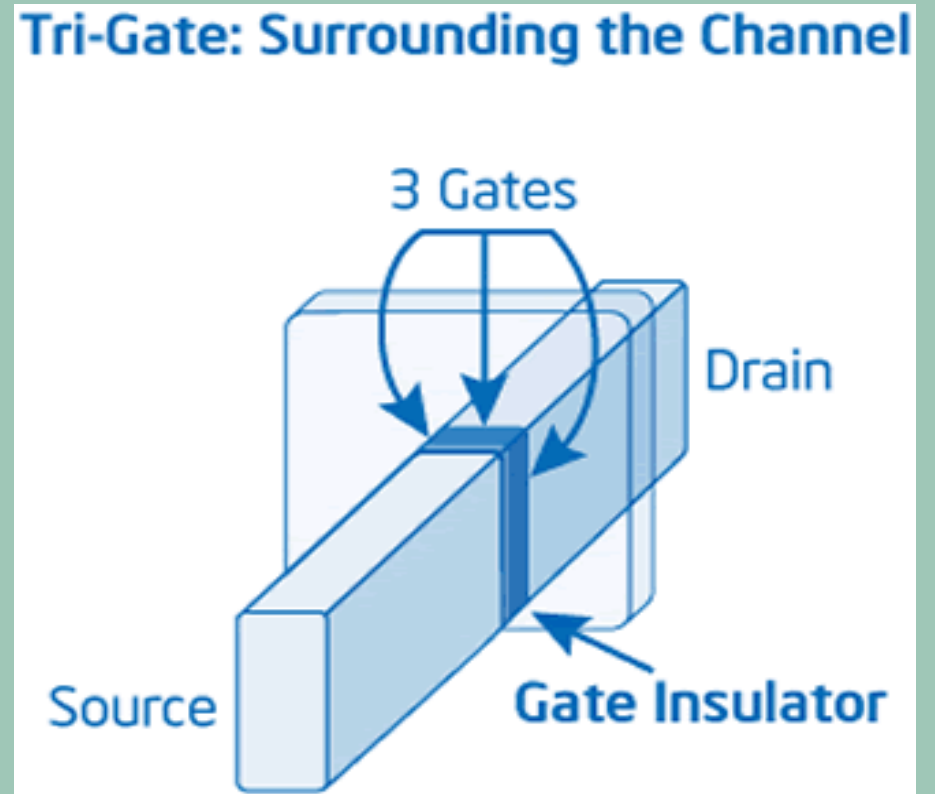
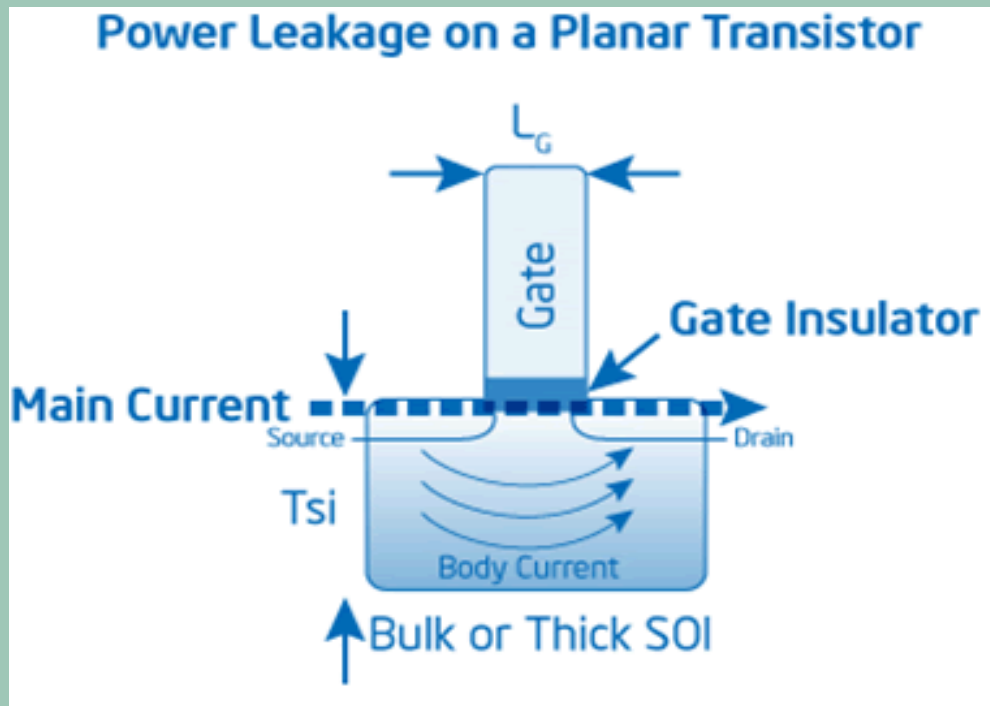


## Výkon spotřebovaný procesorem

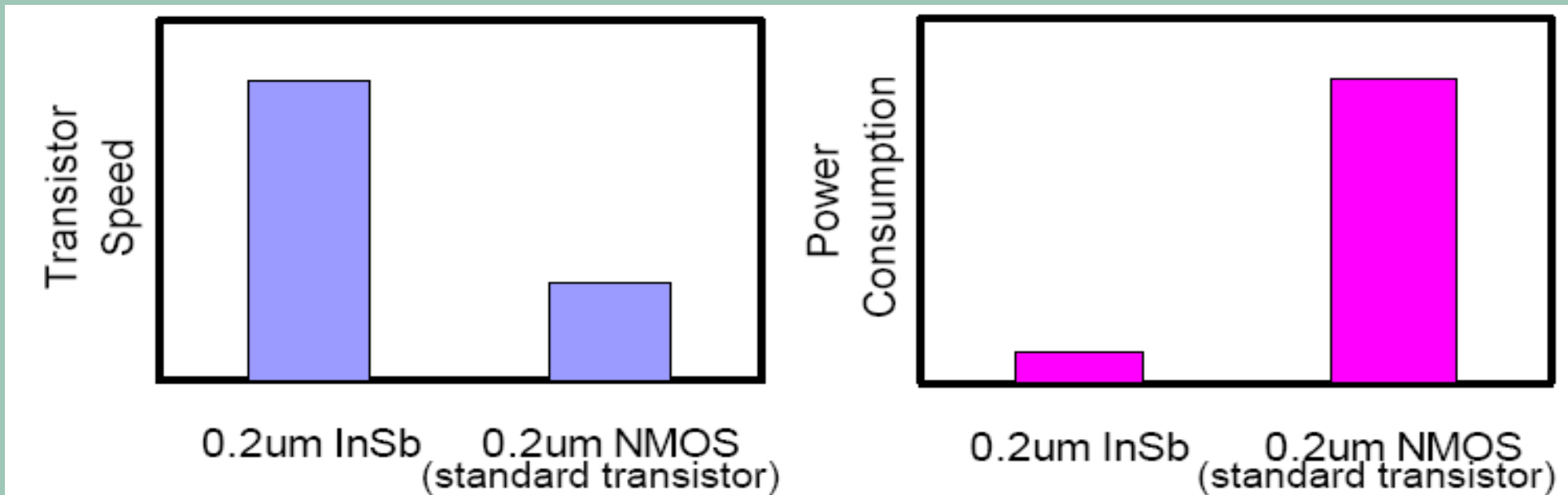
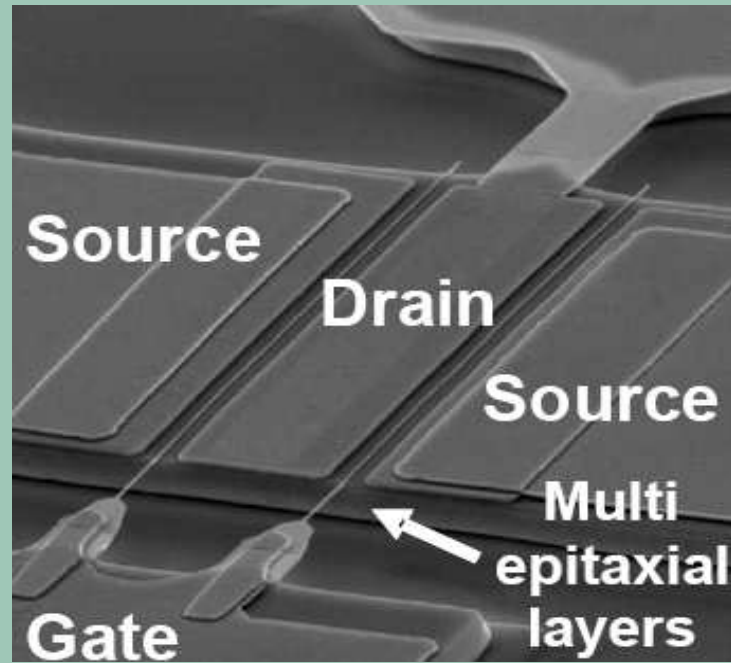


# Zásadní modifikace struktury MOSFET - “Tri-Gate” (INTEL)

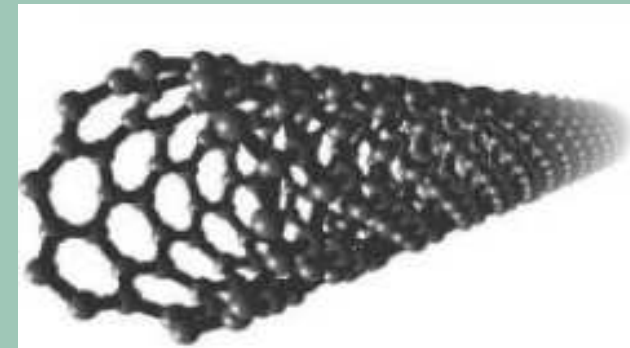
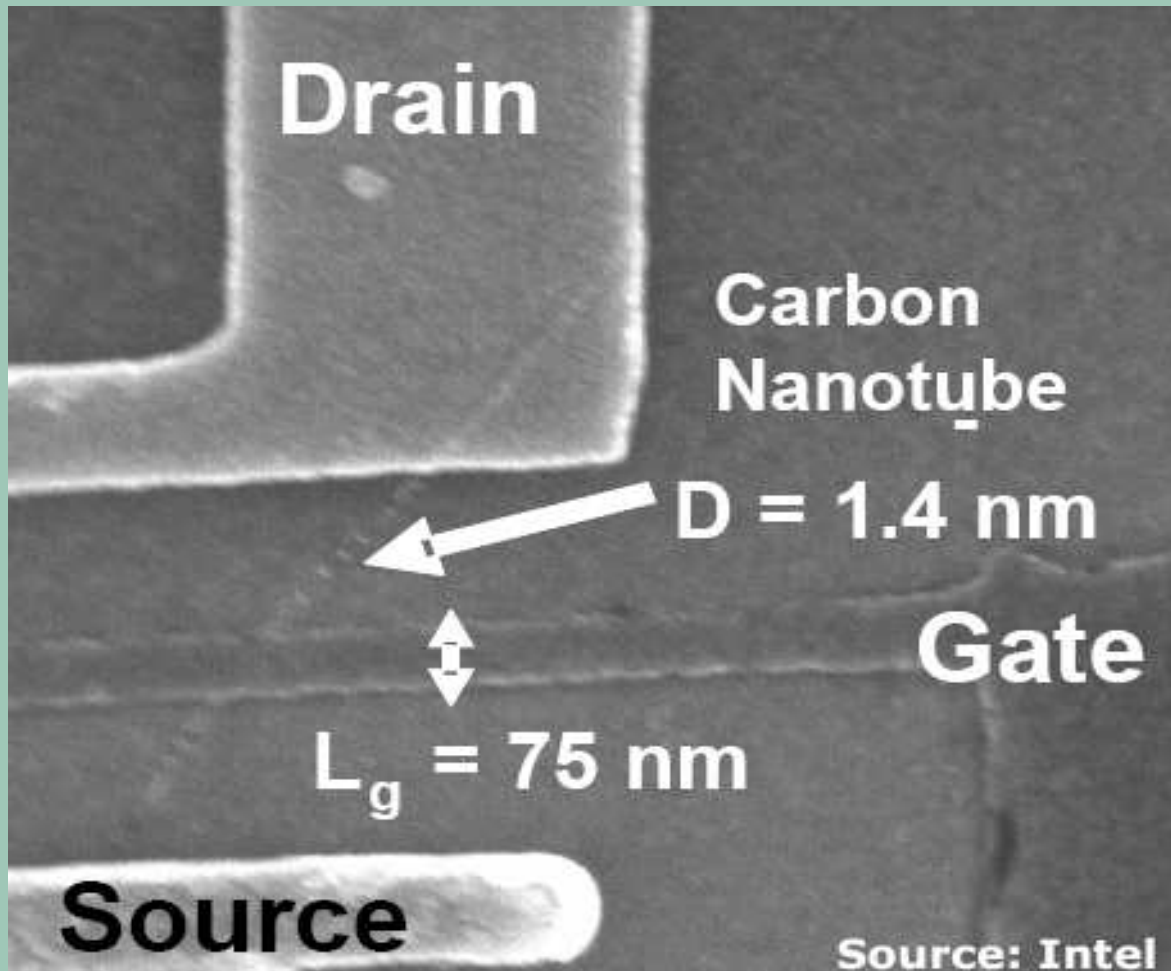
2D vs. 3D



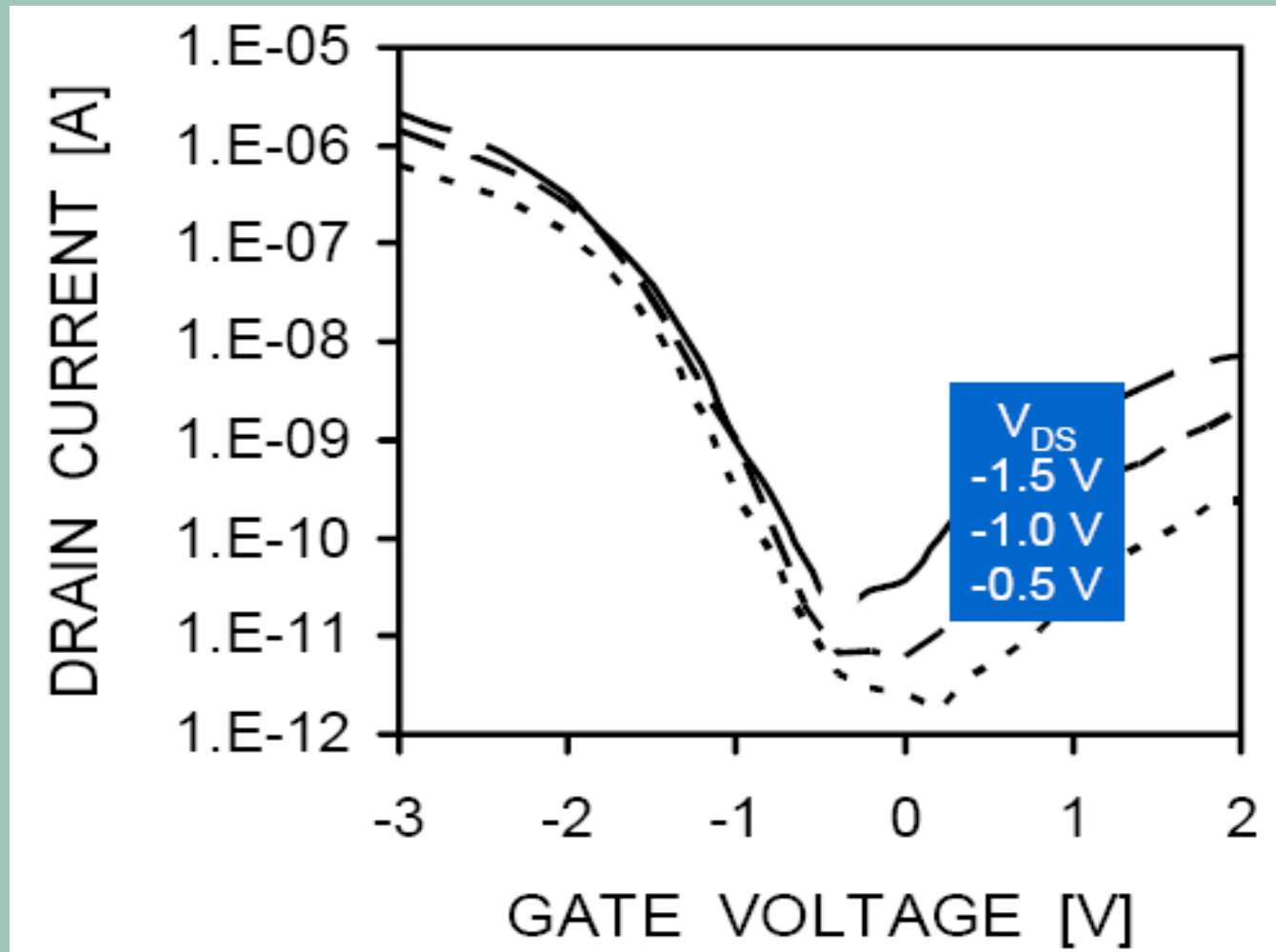
# MOSFET: InSb vs. Si



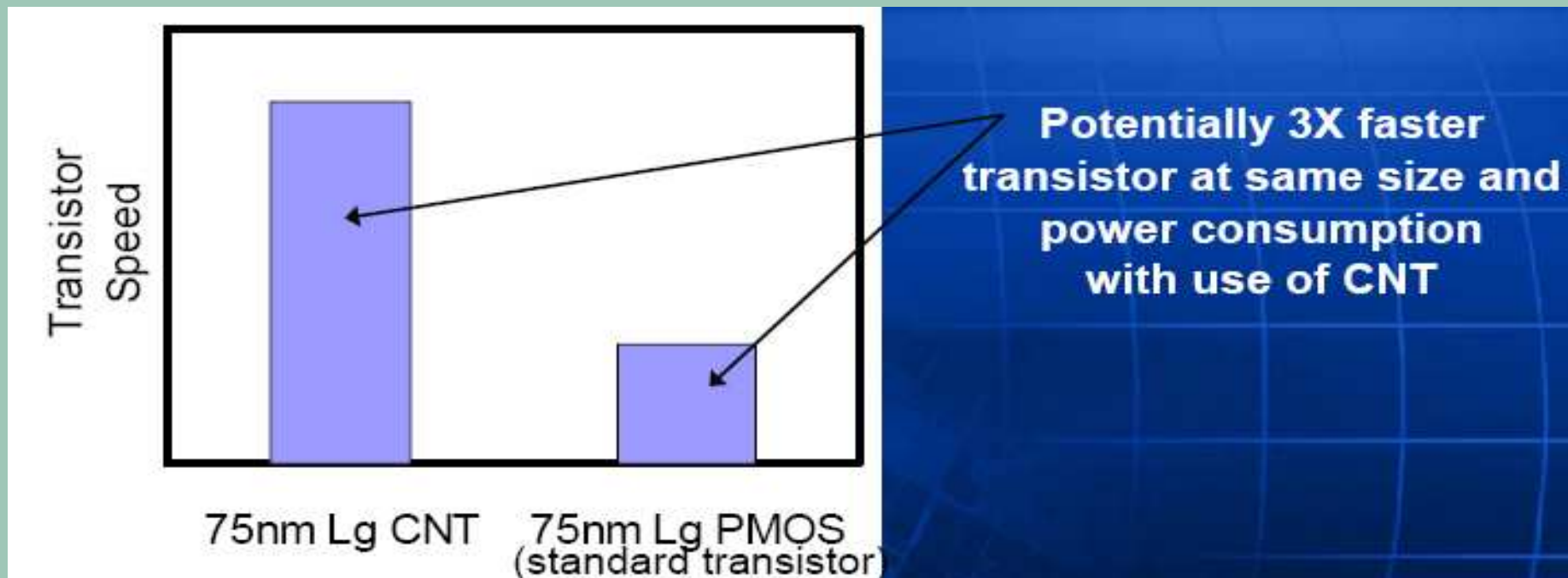
# Uhlíkové nanotrubky



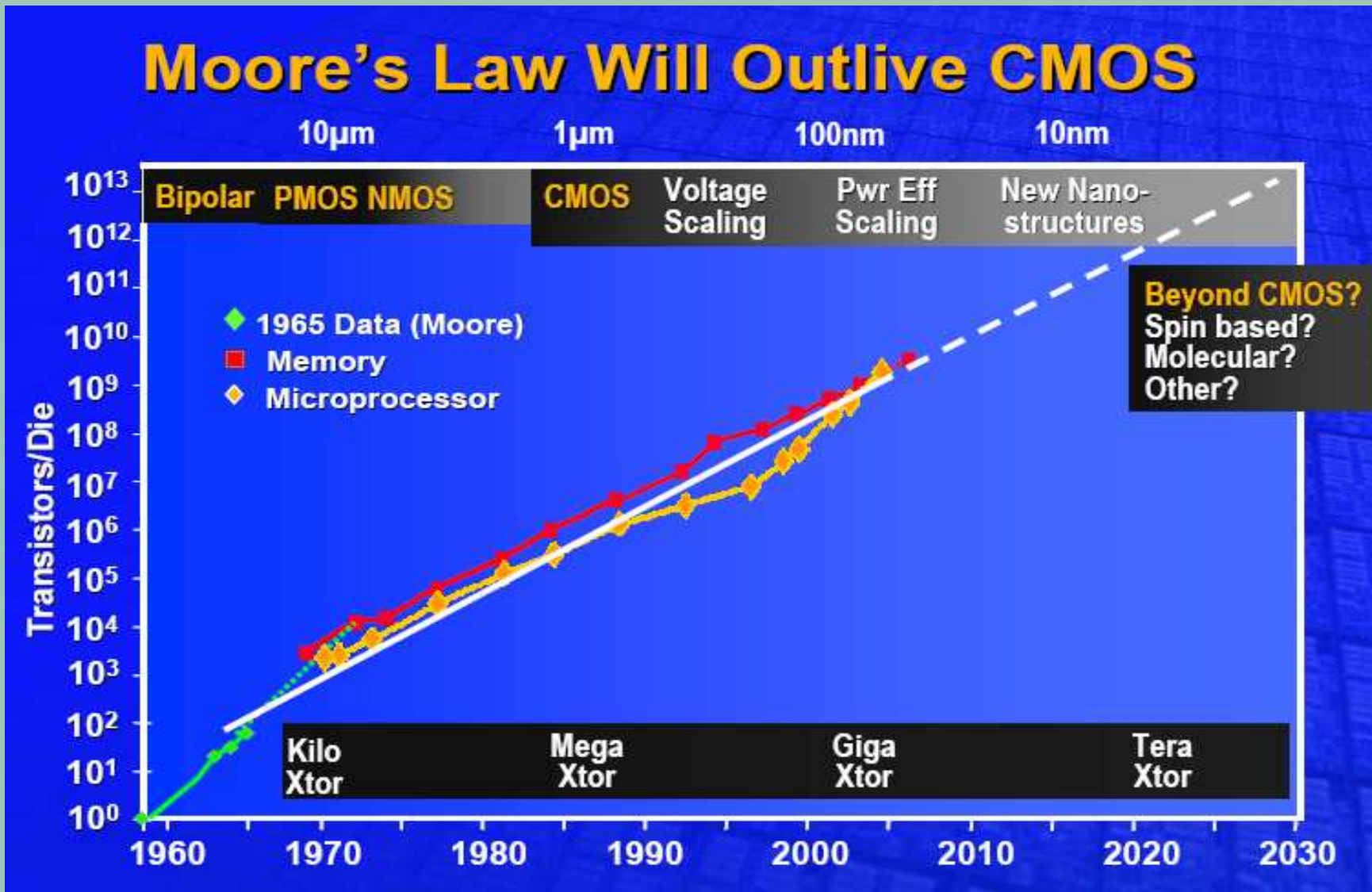
Uhlíkové nanotrubky: velmi dobré spínací charakteristiky



Uhlíkové nanotrubky:  
značný potenciál, ale ...



# Názor v Intelu: Moorův zákon přežije CMOS



## Závěrem

Současná mikroelektronika zachází spolehlivě s obrovským počtem (řád  $10^9$ , „giga“; posun směrem k řádu  $10^{12}$ , „tera“) velmi malých (desítky a jednotky nanometrů) objektů, s extrémně rychlými přesuny náboje.

Velmi zajímavá základní fyzika a chemie. Zároveň mimořádné aplikace, v současnosti je reálná vyhlídka na zhruba 15 let pokračování dosavadního trendu polovodičových technologií.

Potom: „Tam dole je hodně místa“ (Feynman).