

Od křemene k integrovanému obvodu

Lidé tohoto ?? . století, aniž si to uvědomují, žijí stále jako v pohádce. Jsou přesyceni zázraky, a tak zůstávají chladní tváří v tvář těm, které jim každodenně přináší pokrok. Všechno se jim zdá přirozené.

Ano, lidé tohoto 21. století



32GB, 300 Kč



Podivné na tom všem je to, že tyto překvapivé transformace spočívají na principech, které byly naprosto známy už našim předkům, kteří je, však možno říci, nedokázali využít ve svůj prospěch! Teplo, pára, elektřina jsou přece tak staré jako člověk!

Křemík – materiál pro polovodiče

1985 PC AT

- 64 kB RAM
- 20 MB HDD
- 10 MHz procesor
- 70 × průměrný měsíční plat



2013 PC

- 4 GB RAM
- 1000 GB HDD
- 3 GHz procesor
- 1/2 × průměrný měsíční plat



Proč křemík?

křemík nahradil germanium v polovině 50 let 20. stol.

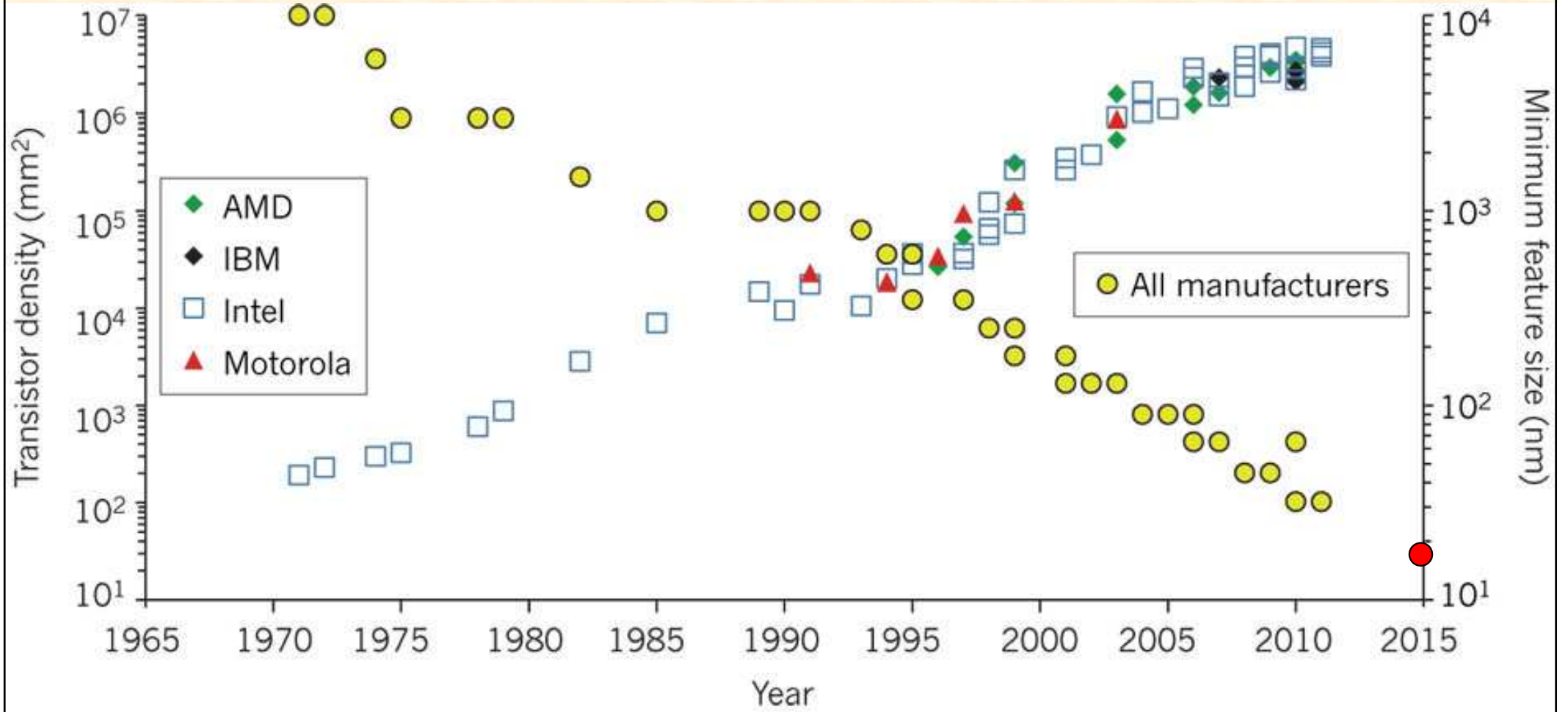
větší energiová mezera (Ge: 0,66eV, Si: 1,1eV)

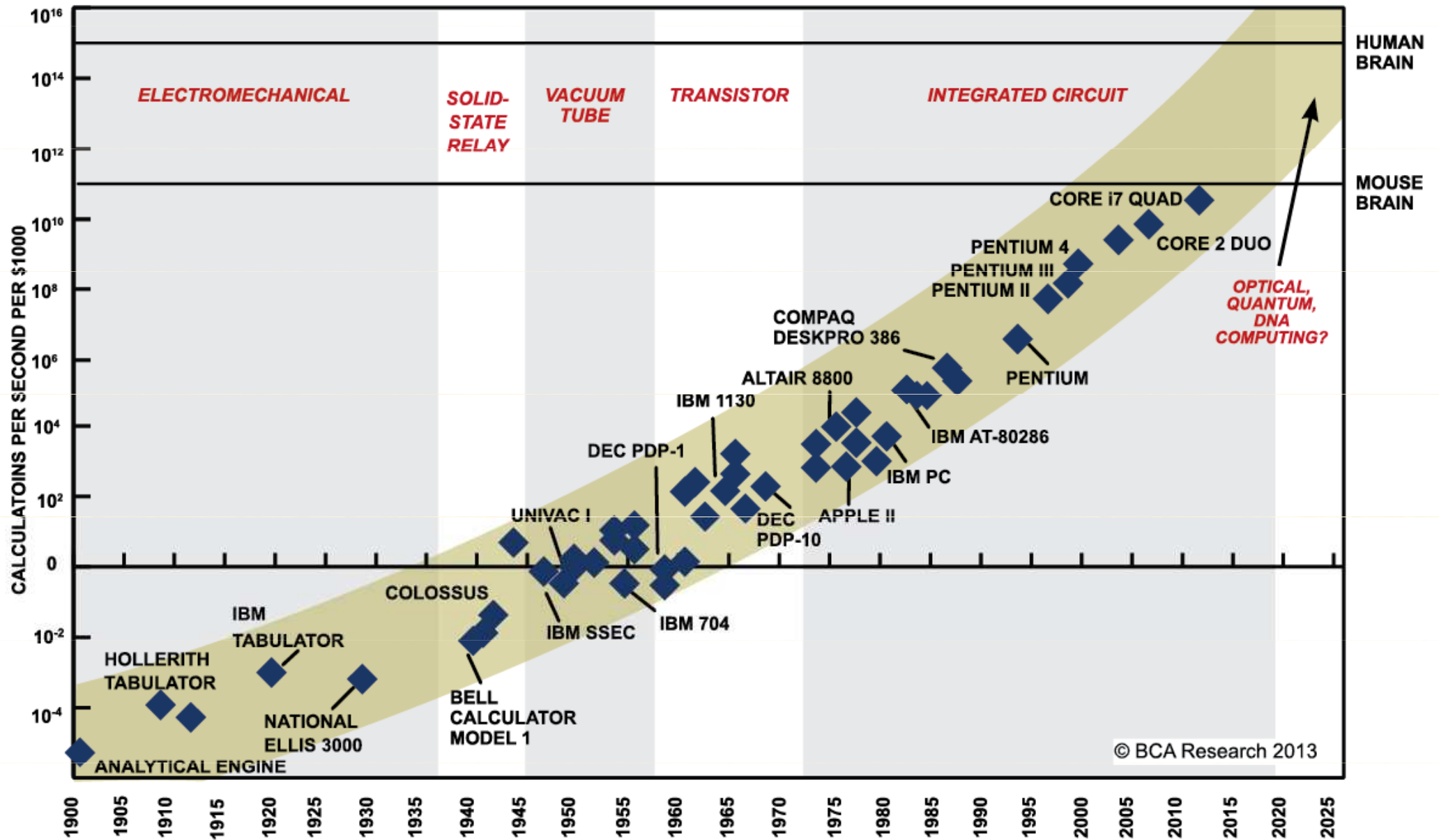
větší odolnost součástky při vyšších teplotách (Ge: 100°C, Si: 150°C)

větší měrný odpor (Ge: 47Ωcm, Si: 230 000 Ωcm), vysokonapěťové součástky

stabilní oxid (GeO₂ rozpustný ve vodě)

nižší cena (10% ceny Ge)





SOURCE: RAY KURZWEIL, "THE SINGULARITY IS NEAR: WHEN HUMANS TRANSCEND BIOLOGY", P.67, THE VIKING PRESS, 2006. DATAPPOINTS BETWEEN 2000 AND 2012 REPRESENT BCA ESTIMATES.

Historie

- 1940 p-n přechod, Russel Ohl, Bellovy laboratoře
- 1947 tranzistor, W. Shockley, J. Bardeen, W. Brattain, Bellovy laboratoře
- 1951 monokrystal křemíku
- 1954 komerční křemíkový tranzistor
- 1954 první tranzistorové rádio
- 1958 integrovaný obvod (komerčně 1961)
- 1965 Moorův zákon (počet prvků na IC se zdvojnásobí každý rok)
- 1966 16 bitová paměť
- 1971 mikroprocesor
- 1991 16 Mbit DRAM

Moorův zákon (1965)

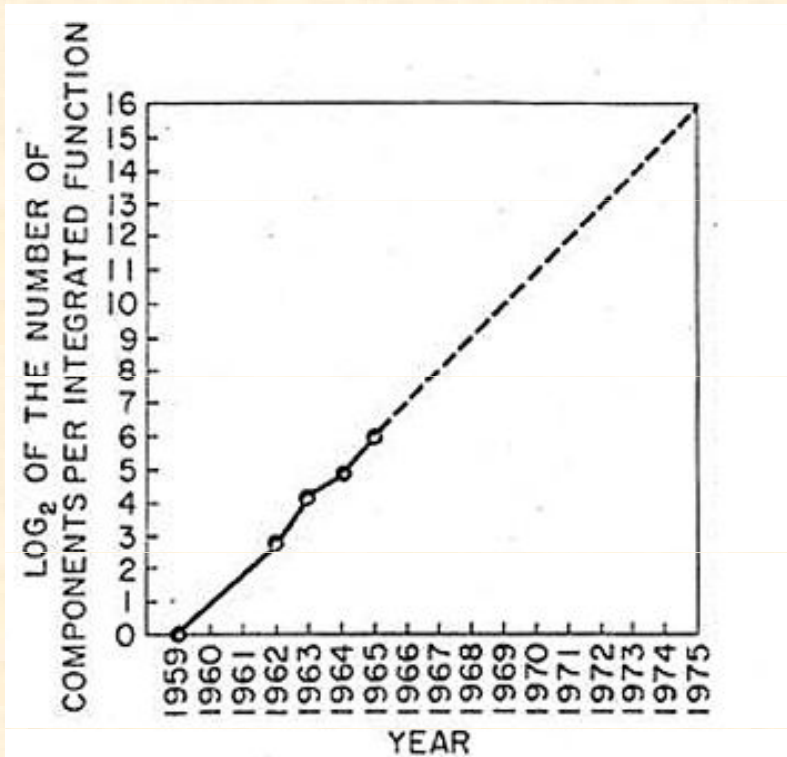
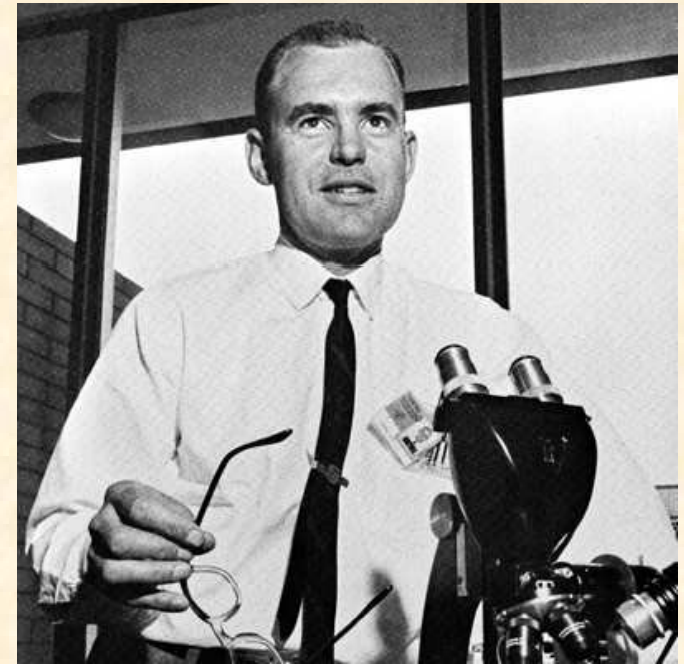
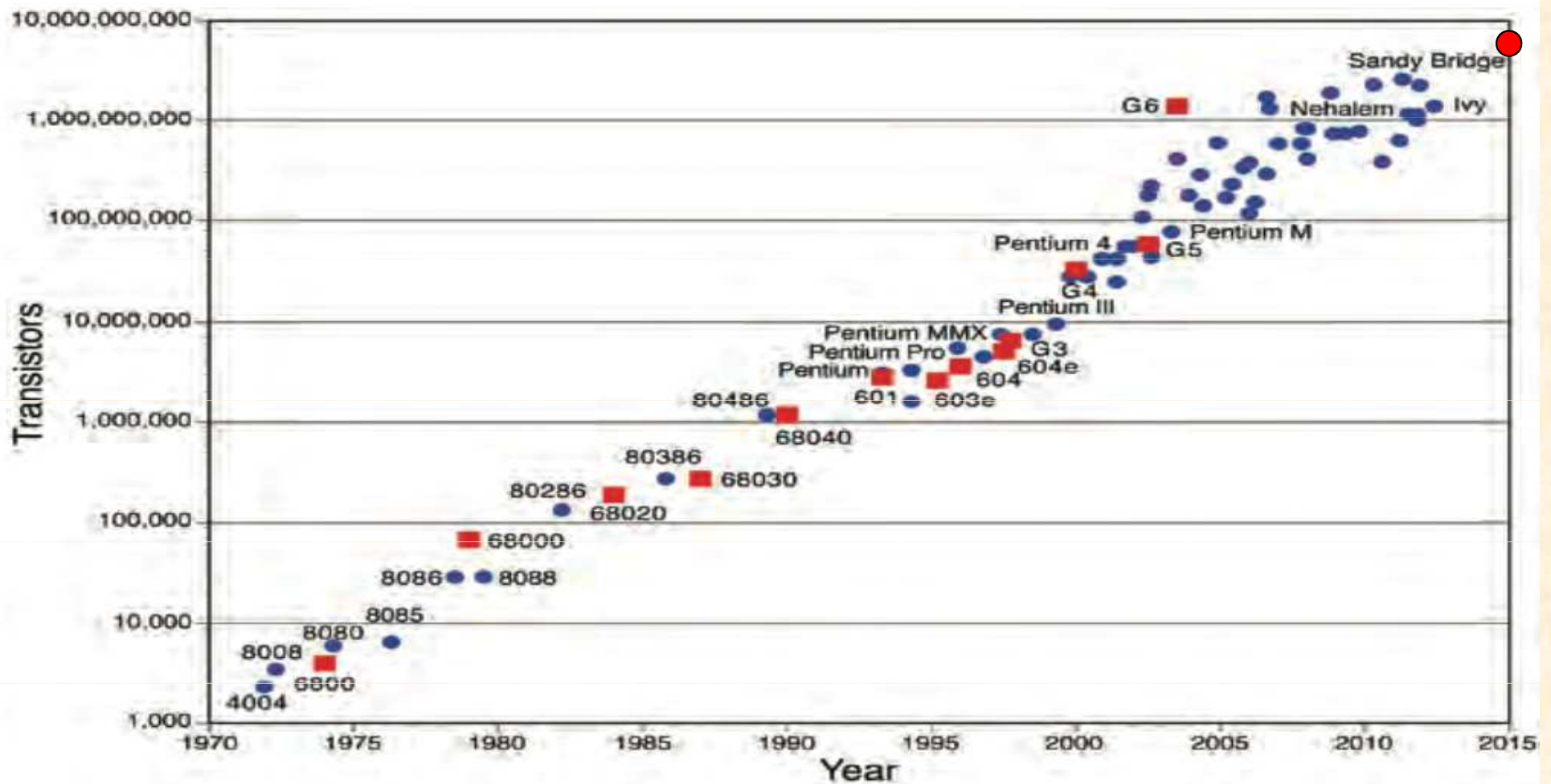


Fig. 2 Number of components per Integrated function for minimum cost per component extrapolated vs time.



Gordon Moore





or **FIGURE 1.** A plot of the increasing number of transistors per CPU confirms the accuracy of Moore's prediction. Note that the vertical axis is log scale.

$$x^{45} = 10^7 \quad x = 1,43$$

zdvojnásobení každé dva roky

Křemík:

- třetí nejrozšířenější prvek na Zemi (14,6%)
- druhý v zemské kůře (28%)

oxidy a křemičitany



růženín



ametyst



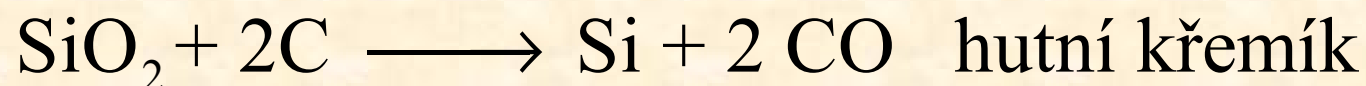
achát



křišťál

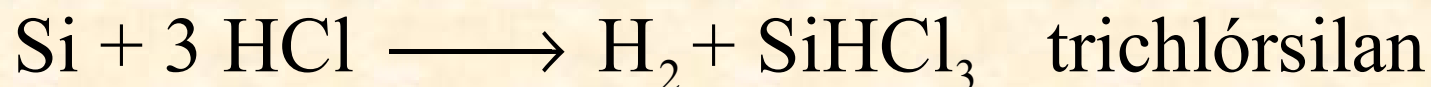
Výroba křemíku

Křemen (křemenný písek)



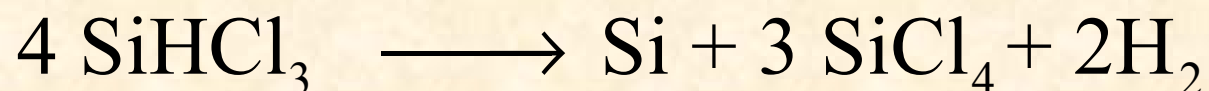
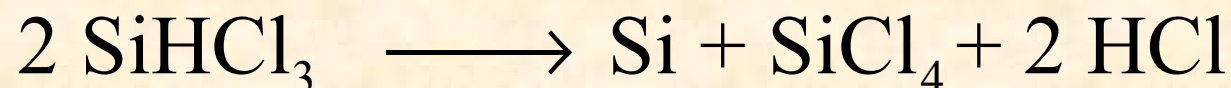
14 kWh/kg křemíku

Nutno vyčistit!



bod varu trichlórsilanu 30°C, čištění destilací

Návrat zpět



čistota 10^{-9}

Proč vysoká čistota?

Koncentrace vlastních
nositelů náboje v křemíku
(300 K)

$$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Koncentrace atomů Si

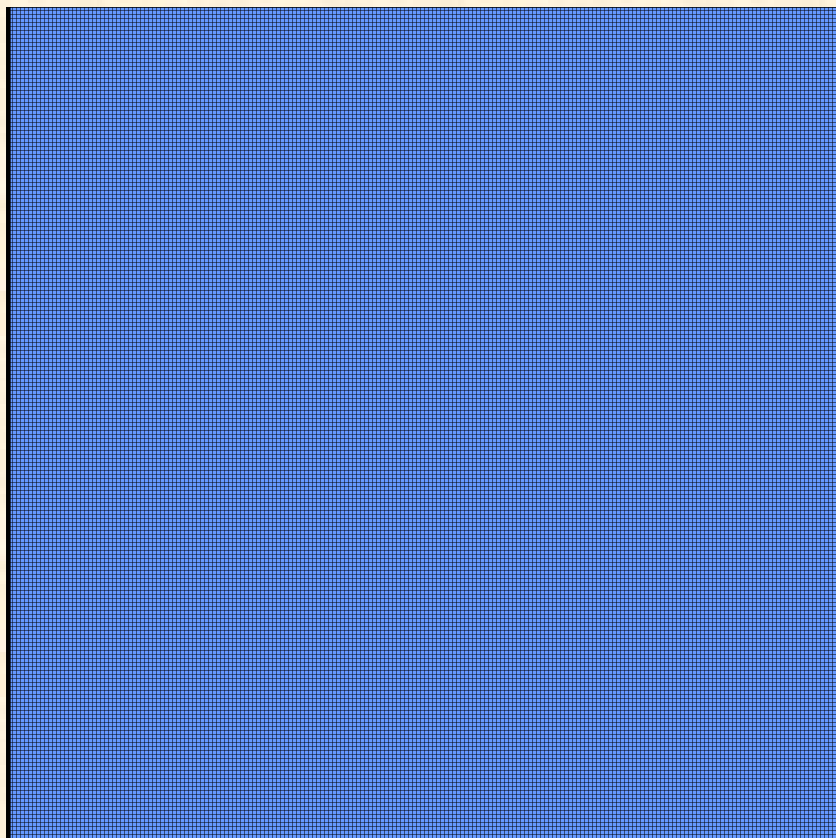
$$n_{Si} = 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

V mědi každý atom „poskytne“ jeden vodivostní elektron.

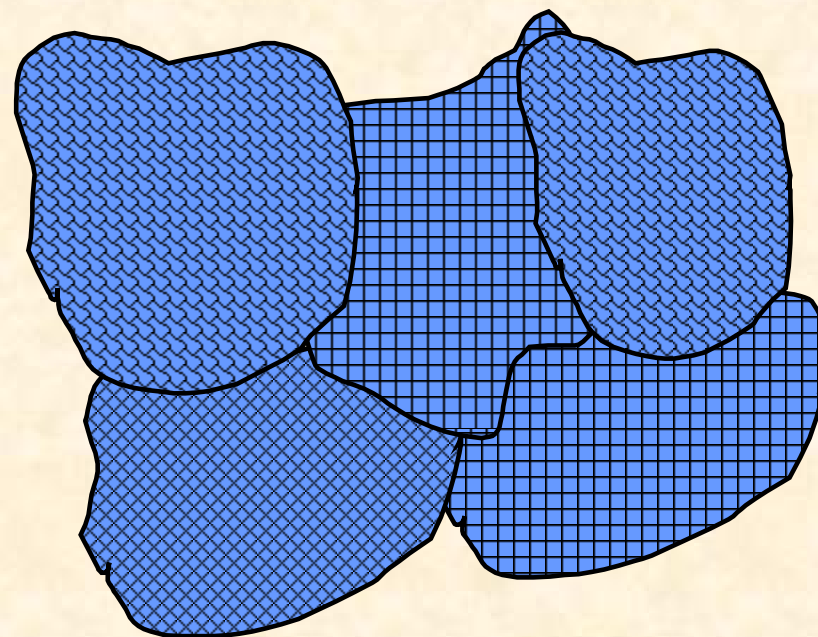
**I velmi malé množství příměsí může velmi změnit
vlastnosti polovodiče.**

Pro polovodičové součástky je nutný monokrystal.

monokrystal



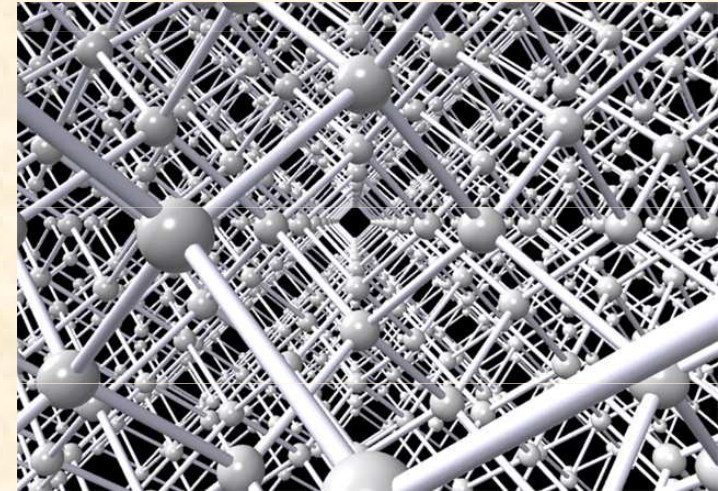
polykrystal



Proč monokrystal?

krystal – anizotropní materiál

monokrystal – dobře definované vlastnosti

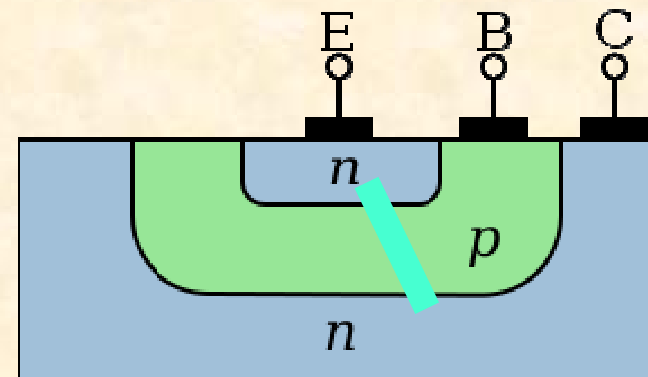


Problémy polykrystalu:

V procesu výroby součástky

- rychlejší difúze podél hranic zrn a dislokačních čar
- směrová závislost hloubky vniku při iontové implantaci

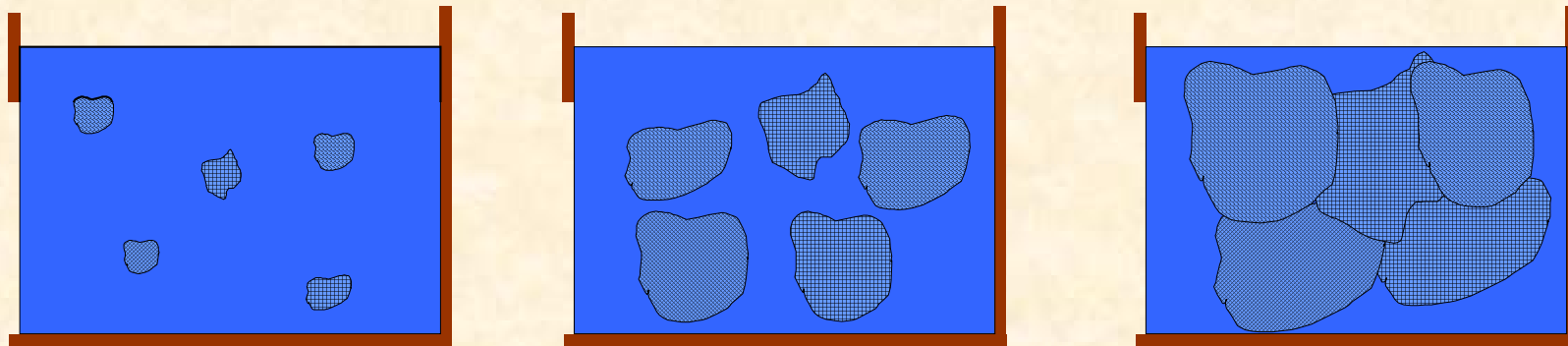
Příklad : bipolární tranzistor:



Jak vyrobit monokrystal velkého rozměru?

Spontánně látka většinou tuhne v polykrystalické formě.

Proč?



Celý krystal musí vyrůst z jediného zárodku!

Používané metody

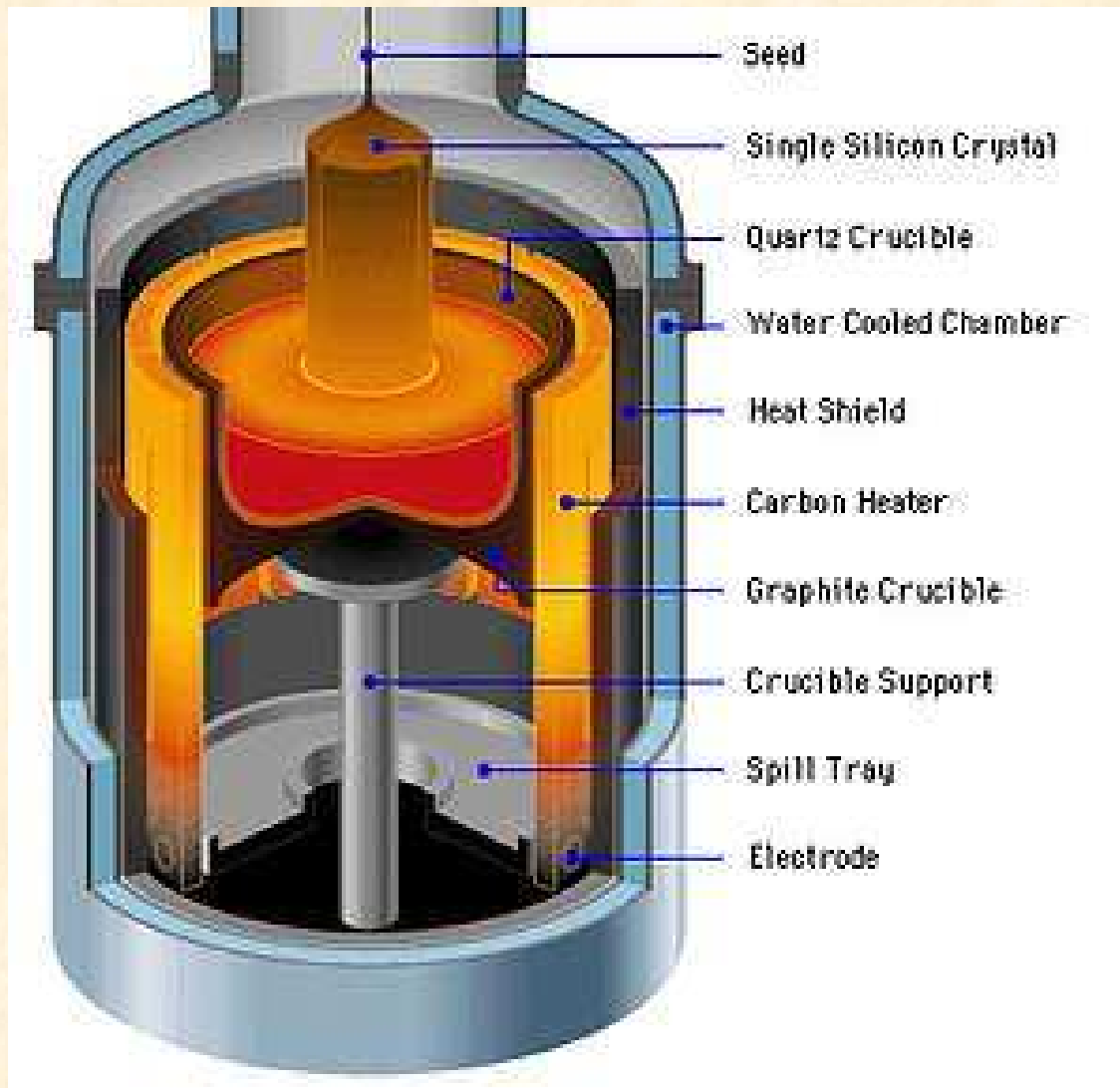
Czochralského metoda

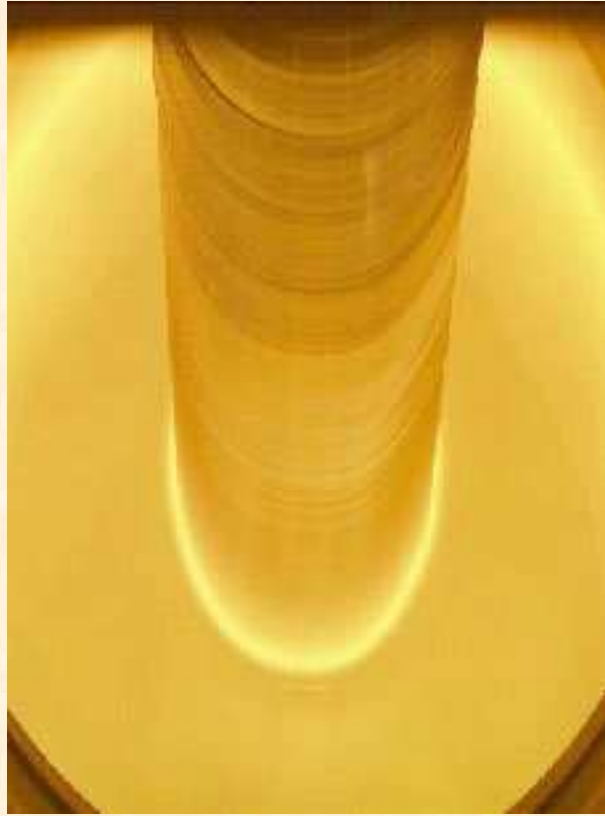
metoda zonální tavy

Czochralského metoda



Jan Czochralski





Alternativní metoda výroby monokrystalu

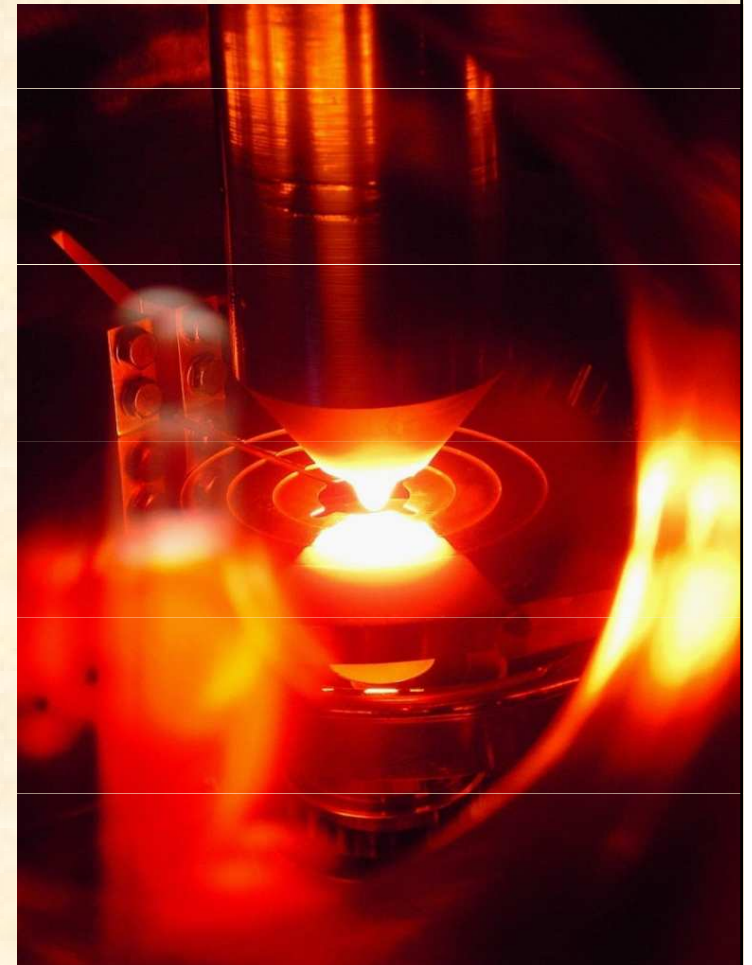
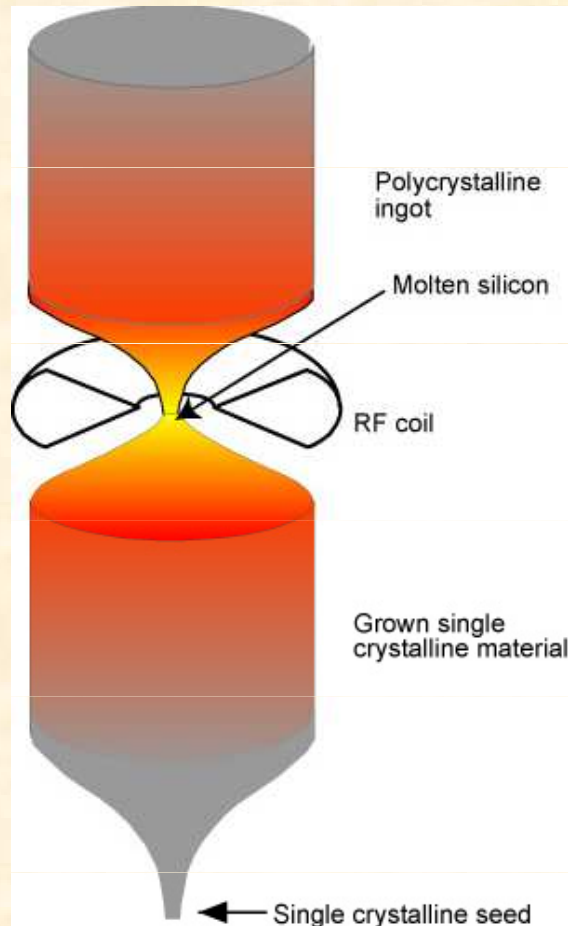
Metoda zonální tavby

William Gardner Pfann (1952)

Povrchové napětí tekutého křemíku (při teplotě tání)

$$\sigma = 840 \text{ mN/m}$$

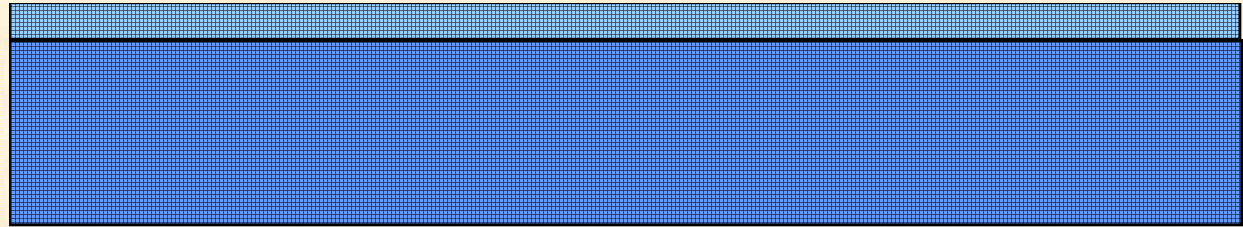
voda: $\sigma = 73 \text{ mN/m}$



Monokrystalický ingot dělen na desky

- řezání
- broušení hran
- lapování
- leptání
- chemicko mechanické leštění
- chemické čištění
- mechanické čištění

Epitaxní vrstva

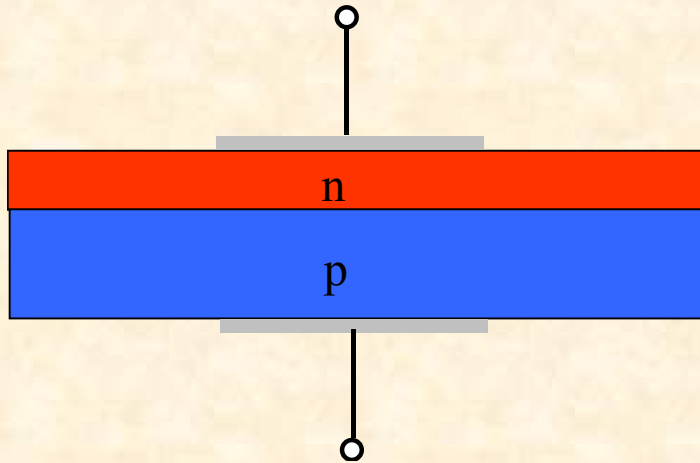


Proč?

- slabě legovaná vrstva na silně legovaném substrátu
- lepší zabezpečení požadované koncentrace příměsí
- vyšší čistota (C, O)

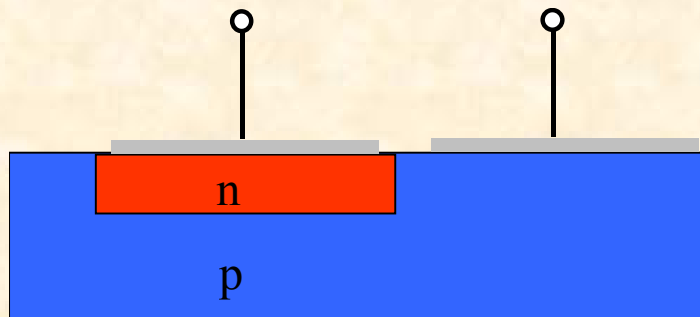
Nevýhoda: vyšší cena desky

Struktura “skrz” desku



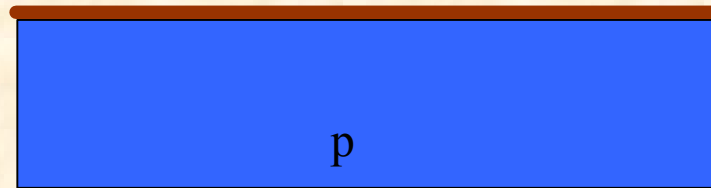
- velké diskrétní součástky, výkonové prvky
- solární články

Planární struktura

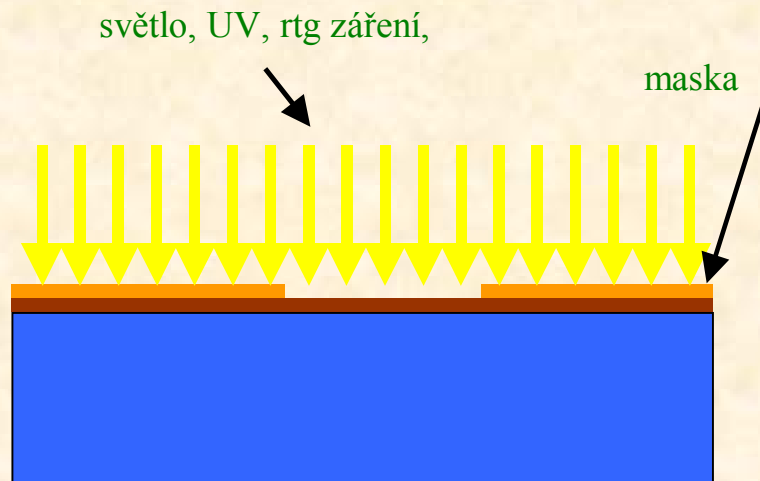


- integrované obvody

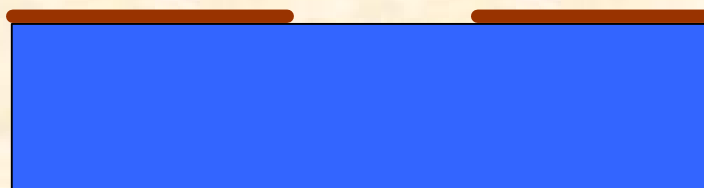
Vytvoření laterální struktury pomocí masky, optická litografie



Pokrytí desky fotorezistem



„Osvětlení“ přes masku

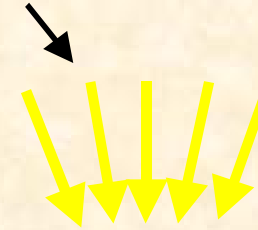


Vyvolání fotorezistu
(pozitivní rezist)

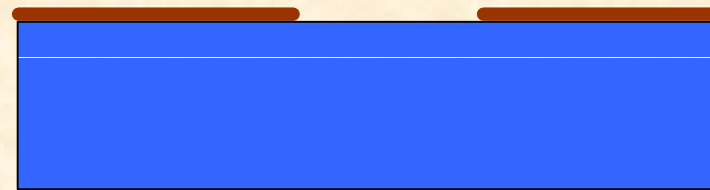
Nevýhoda negativního rezistu – bobtnání neodleptávané části (swelling) – zmenšení rozlišení možné struktury

Vytvoření laterální struktury bez masky, elektronová litografie

fokuzovaný elektronový
svazek, 10-50keV



Meze rozlišení není dána difrakcí
($\lambda \approx 10^{-11}$ m), ale vadami
elektronové optiky a rozptylem
elektronů v rezistu

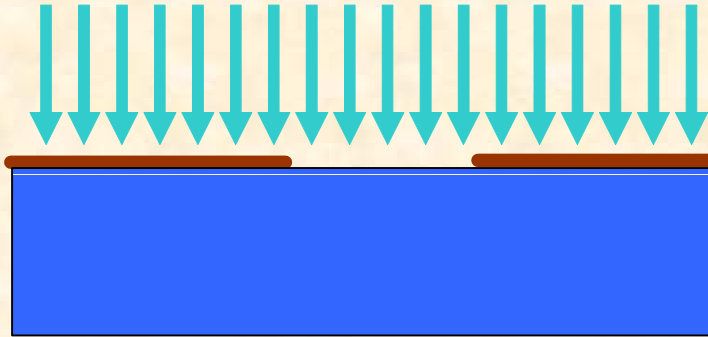


Analogie:

Optická litografie – Xerox

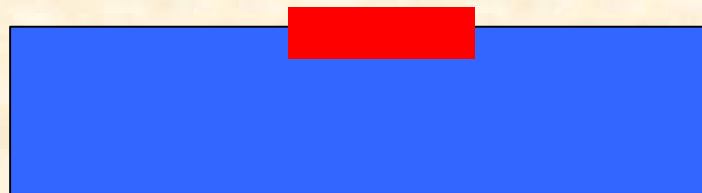
elektronová litografie – laserová tiskárna

Procesy na selektivně odleptané masce:



Technologický proces:

- difúze
- implantace
- oxidace
- naprašování, napařování



Odstranění rezistu, vznik laterální struktury

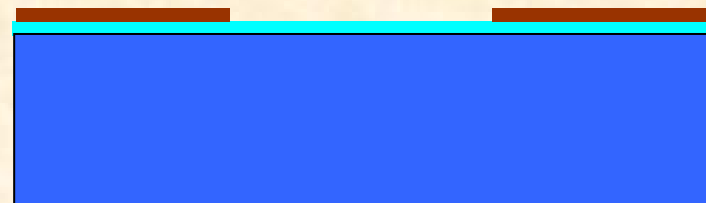
Difúze:

Difúze příměsí z vnějšího zdroje

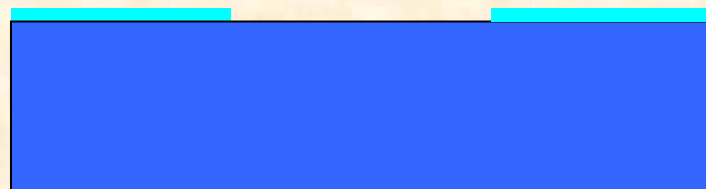
Bariérou proti difúzi není rezist sám, ale oxid SiO_2



oxidace



litografie fotorezistu



odleptání obnaženého
oxidu (HF)



difúze do okna

odleptání zbylého oxidu

Difúzní rovnice v 1D

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}$$

kde D je difúzní koeficient.

teplotní závislost D : $D(T) = D_0 e^{-\frac{E}{kT}}$

kde E je aktivační energie

k Boltzmannova konstanta

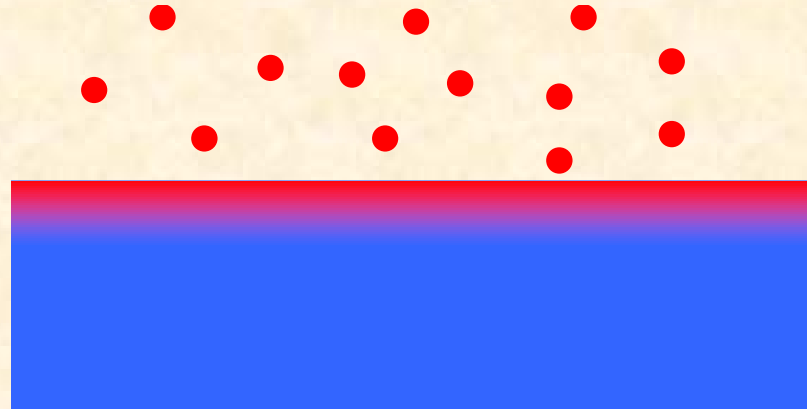
[cm²/s]

	Si (1000°C)	Si (800°C)	SiO ₂ (1000°C)	SiO ₂ (800°C)
B	$1,5 \cdot 10^{-14}$	$4,4 \cdot 10^{-17}$	$4,6 \cdot 10^{-18}$	$1,5 \cdot 10^{-20}$
P	$1,2 \cdot 10^{-14}$	$2,5 \cdot 10^{-17}$	$2,1 \cdot 10^{-17}$	$3,3 \cdot 10^{-20}$
As	$1,3 \cdot 10^{-15}$	$1,3 \cdot 10^{-18}$	$1,6 \cdot 10^{-17}$	$6,1 \cdot 10^{-21}$

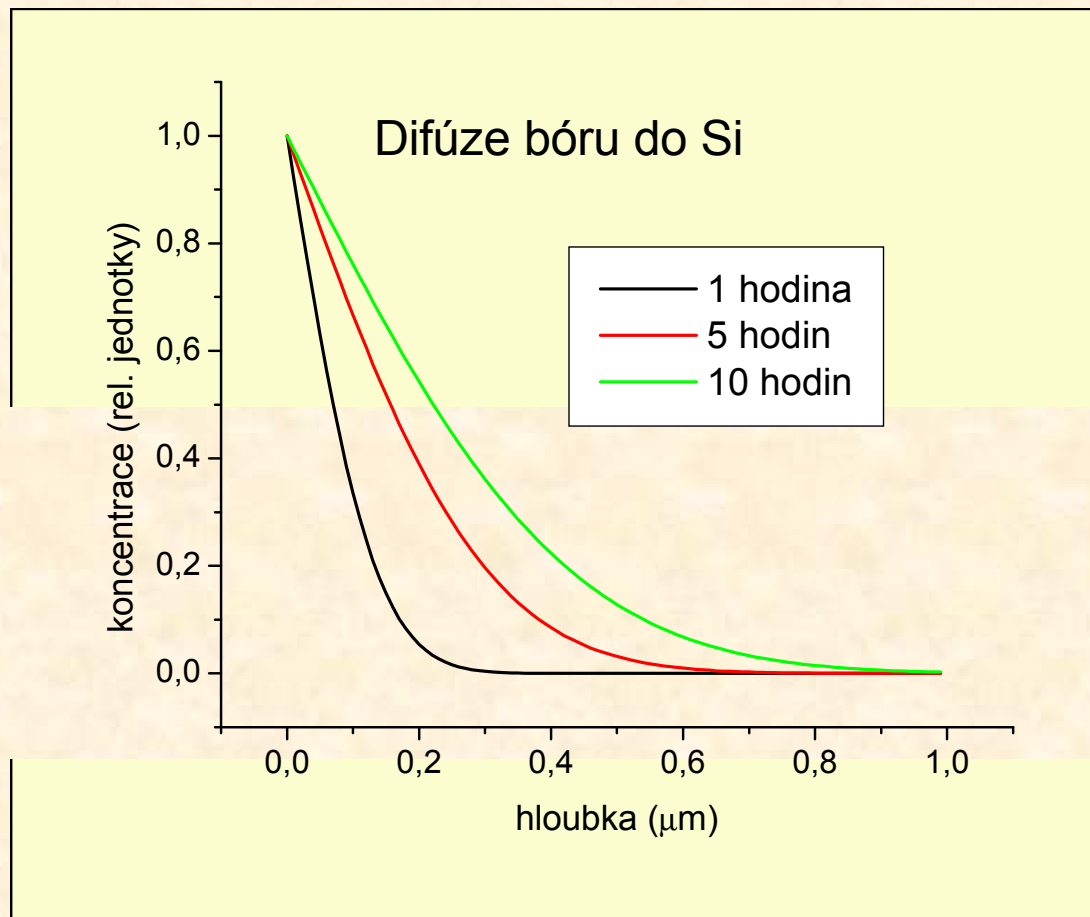
Difúze z par

AsH₃ arsin

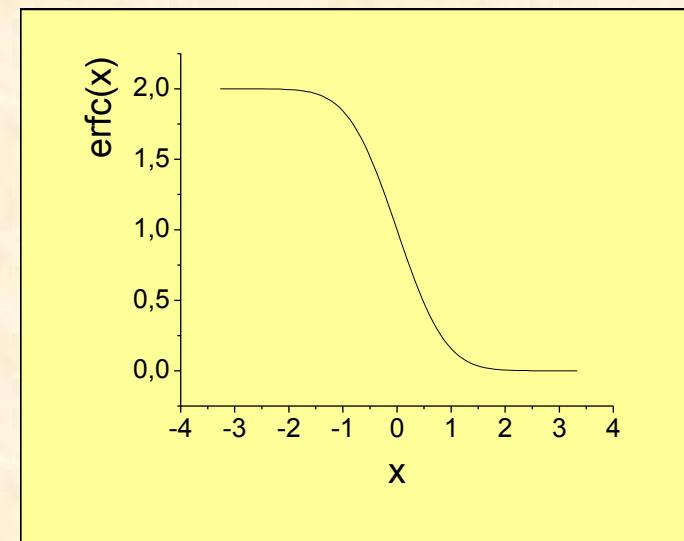
PH₃ fosfin



Difúze z neomezeného zdroje



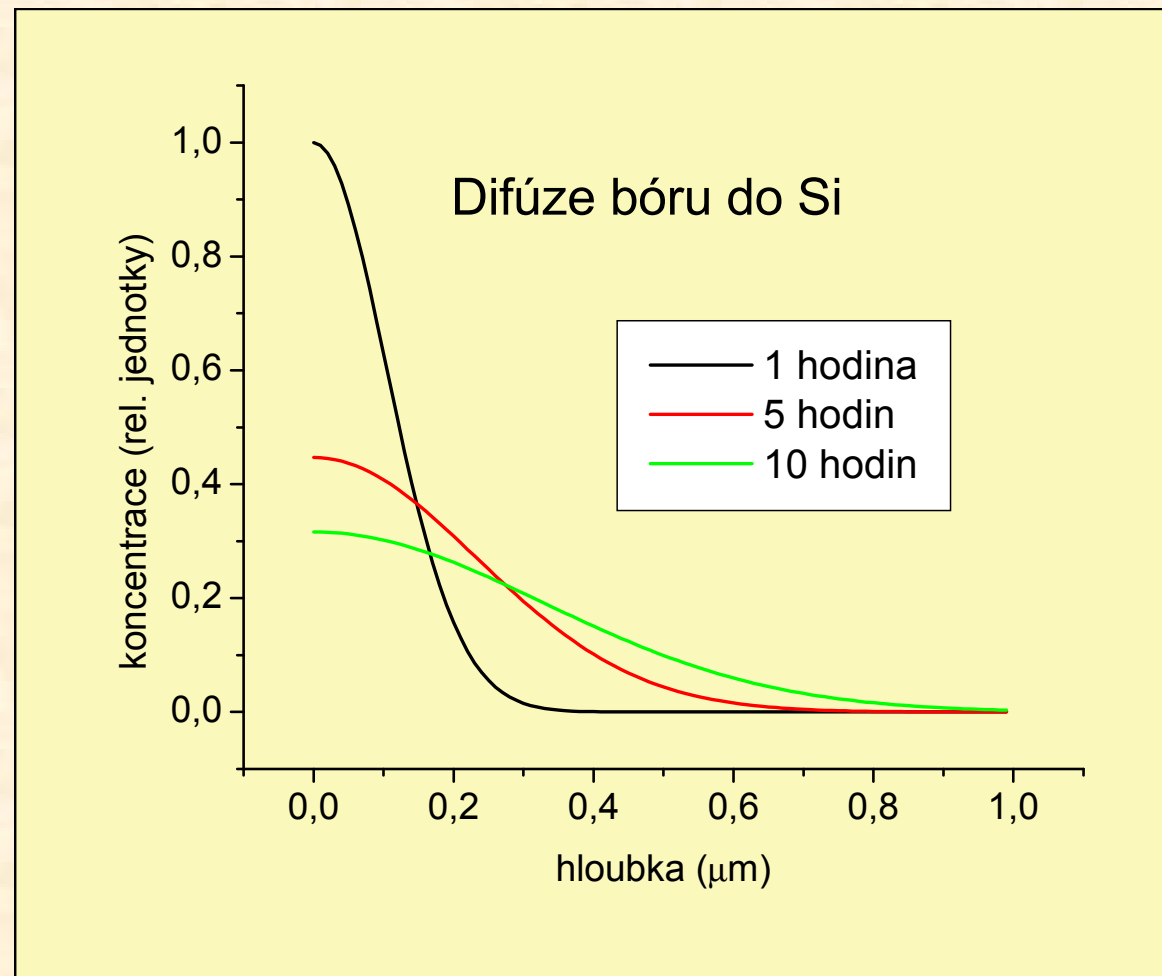
$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right]$$



Difúze z tenké vrstvy (silikáty)



Difúze z omezeného zdroje



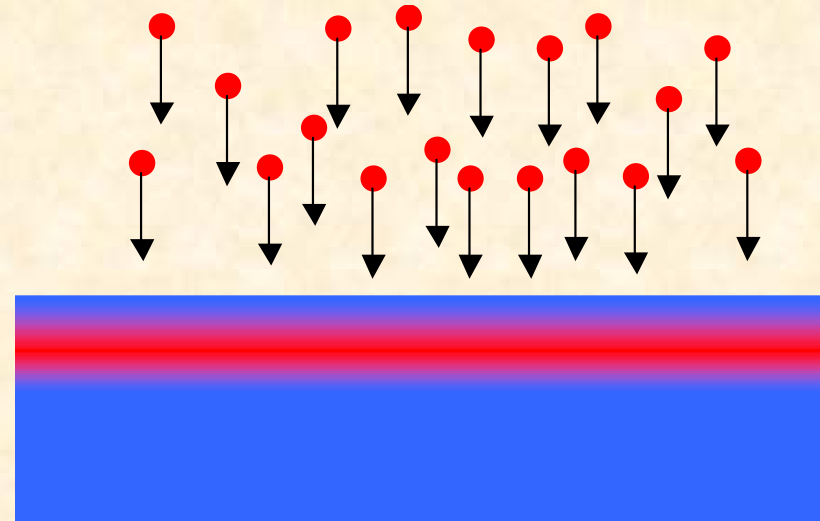
$$C(x, t) = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

Iontová implantace

přímé vstřelení příměsí do substrátu bez difúze

Energie iontů 3 – 500 keV

hloubka vniku 0,01 – 1 μm



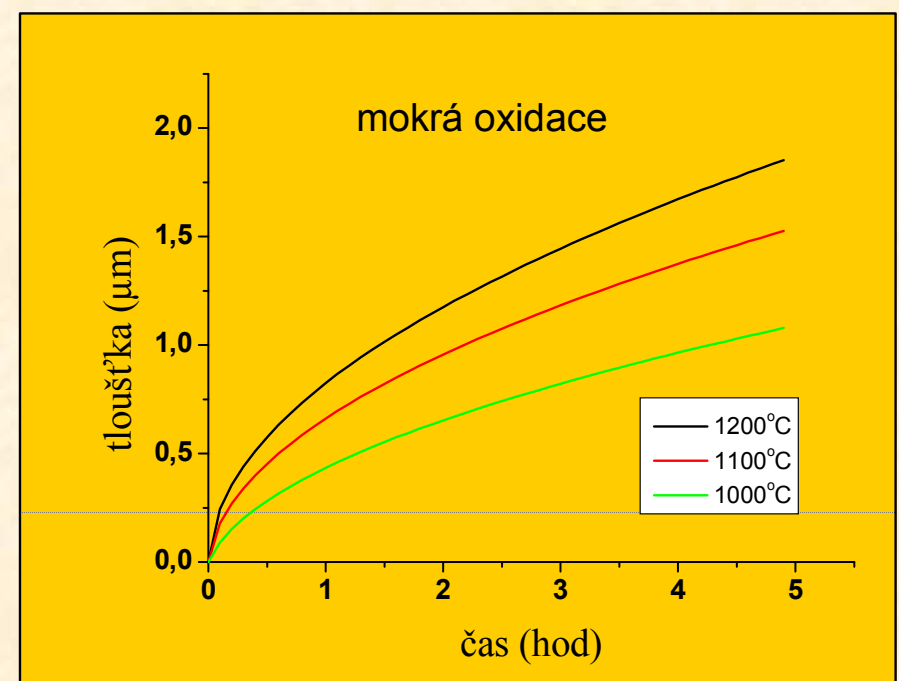
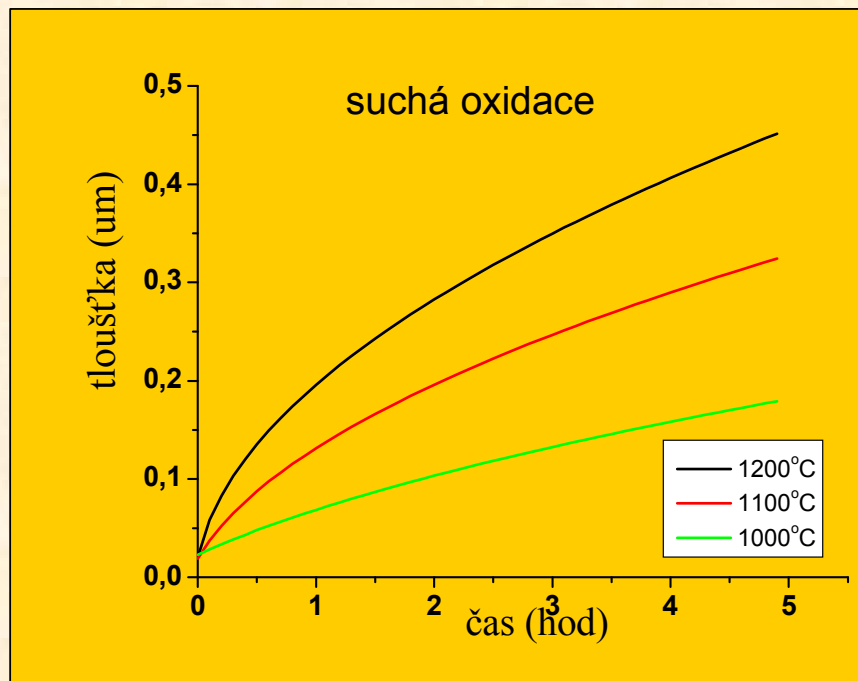
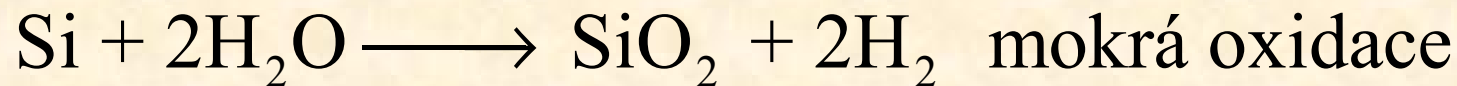
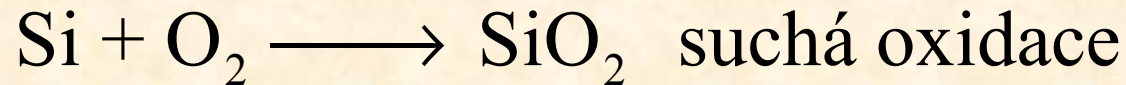
Kanálování

Rekonstrukce poškozené mřížky následným žíháním

Oxidace

Povrch křemíku na vzduchu samovolně oxiduje –
nativní oxid

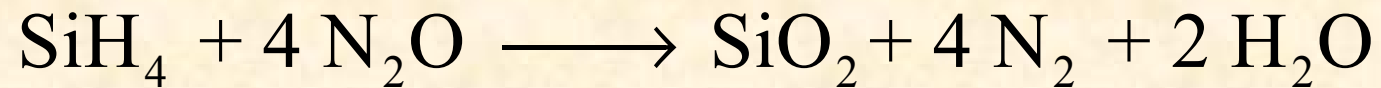
Oxidace se urychlí zvýšením teploty – termický oxid



Plazmochemická depozice

- Růst vrstev
- výboj v plynu (plazma)
 - nízká teplota substrátu (100 - 400°C)

Depozice oxidu:



Depozice nitridu:



Naprašování

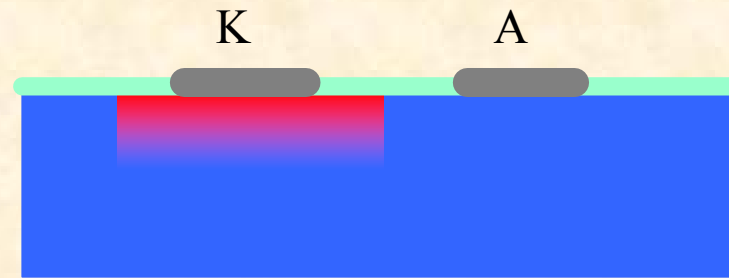
Rozprašování terče ionty

Depozice iontů na substrát

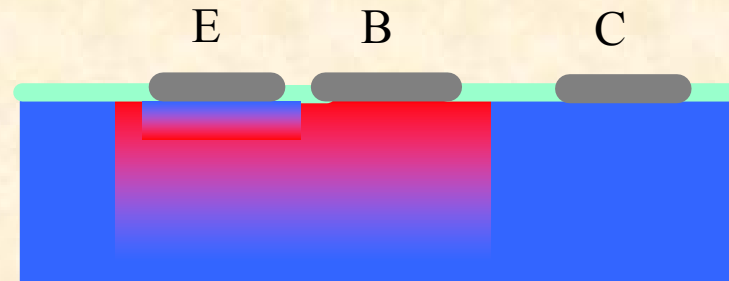
Elektronické prvky:



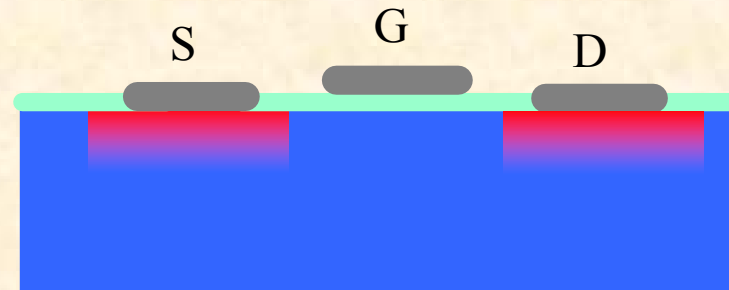
dioda:



bipolární
tranzistor pnp:



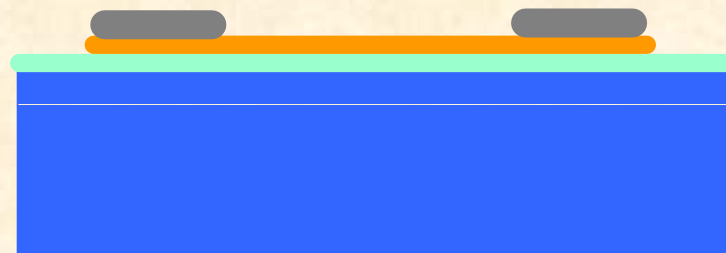
tranzistor
nMOS:



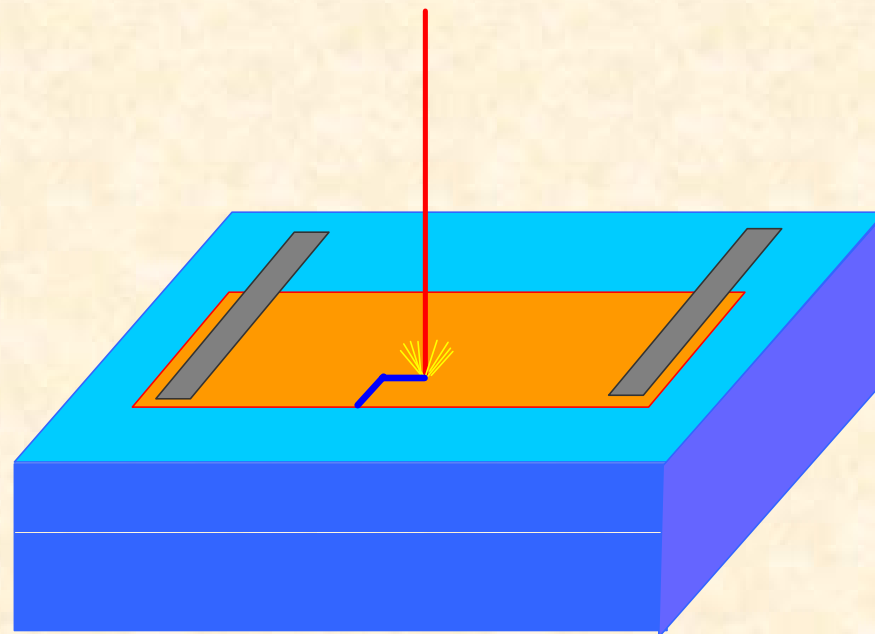
polovodičový
odpor:



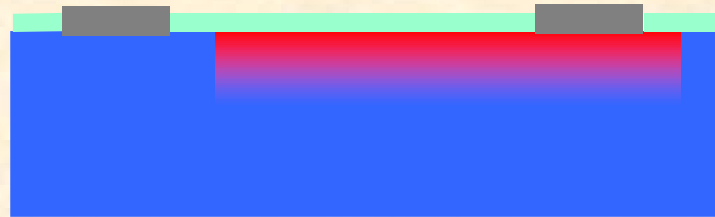
tenkovrstvý
odpor:



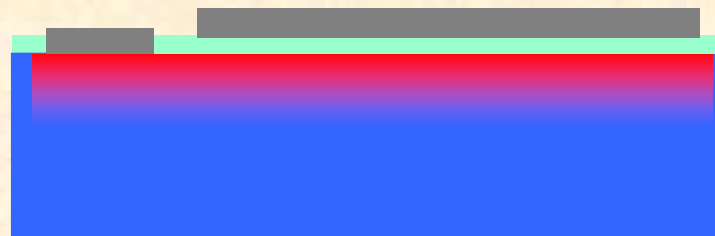
ladění odporu –
laserové trimování



polovodičový
kondenzátor:



tenkovrstvý
kondenzátor:

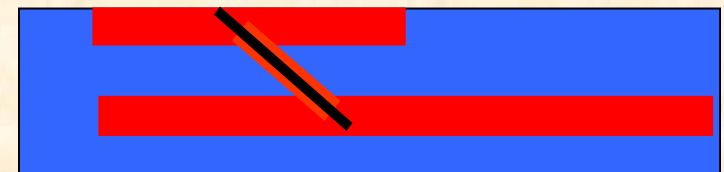
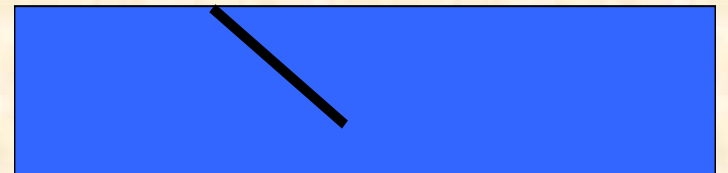


Strukturní defekty

škodí i prospívají

Jak mohou škodit?

- při provozu: rekombinační centra
- při výrobě: dislokace



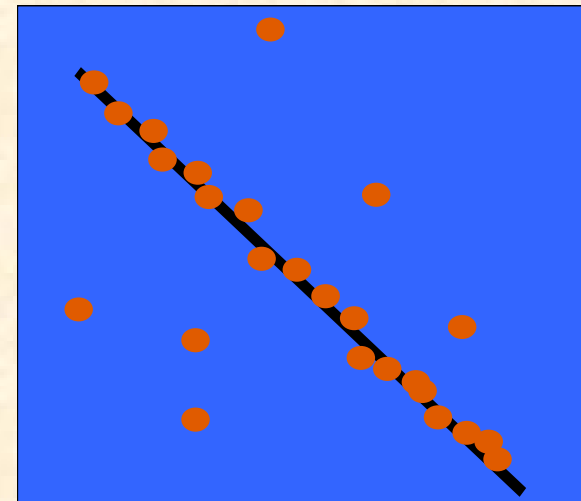
Jak mohou prospívat?

Getrace

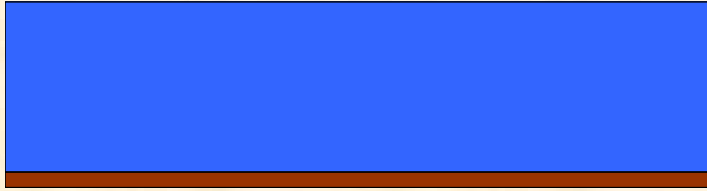
velmi škodí rychle difundující kovy –
Cu, Ni

zachytávají se na strukturních
defektech - dekorace

- vytvoříme defekty mimo aktivní strukturu
- ty vyčistí prostor aktivní struktury

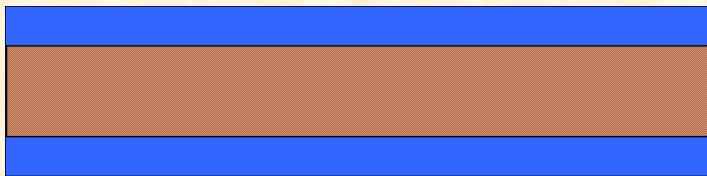


Vnější getrace



- poškrábání zadní strany
- vrstva Poly Si

Vnitřní getrace

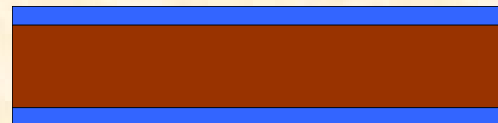


kyslíkové precipitáty
a související defekty

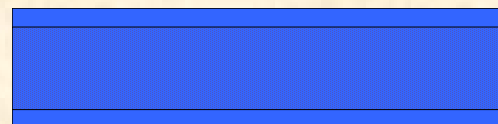
žíhací sekvence:



nežíhaná deska



1200°C vydifundování



750°C nukleace



1050°C růst precipitátů

