

VODIVOST x REZISTIVITA

Ohmův zákon: $U = I.R = \rho.l.I / S$

- ⇒ napětí je přímo úměrné proudu, který vodičem prochází
- ⇒ drát délky ***l*** a průřezu ***S***, mezi jehož konci je napětí ***U***
- ⇒ ρ ... převrácená hodnota měrné ele. vodivosti = měrný ele. odpor [Ωm]
- ⇒ ***G*** ... $G = 1/R$ [S] 1 siemens je vodivost vodiče, jehož odpor je 1 Ω
- ⇒ γ ... $\gamma = 1/\rho$ [$S.m^{-1}$] měrná vodivost

Rezistivita (ρ) je závislá na teplotě a na koncentraci

Teplotní závislost

❖ KOVY (VODIČE)

$$\rho_K = \rho_o (1 + \alpha T)$$

ρ_o ... měrný elektrický odpor při teplotě 273 K

α ... teplotní součinitel elektrického odporu

$$\alpha > 0 \Rightarrow \rho \uparrow \text{ s } T \uparrow$$

$$\alpha < 0 \Rightarrow \rho \downarrow \text{ s } T \uparrow$$

Pro větší teplotní rozdíly se používá kvadratická závislost:

$$\rho_K = \rho_o (1 + aT + bT^2)$$

a, b ... konstanty vázané s α ($\alpha = a + 2bT$)

Závislost ρ na teplotě se využívá k měření teplot

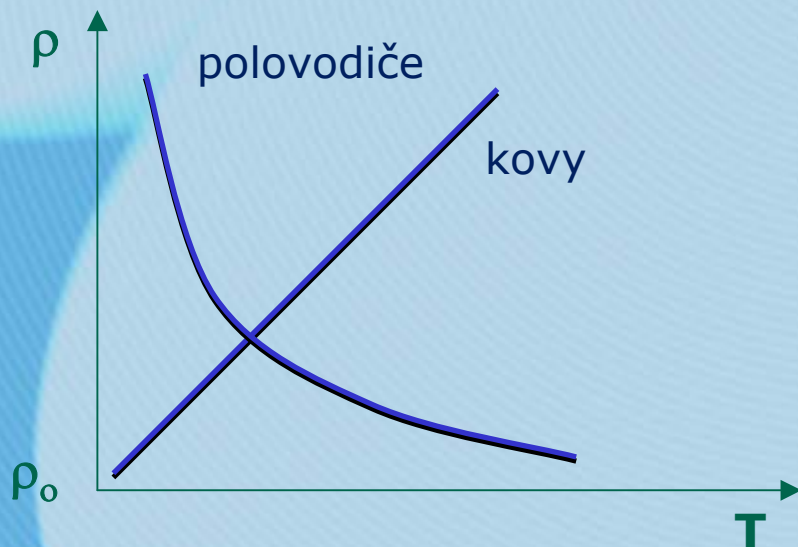
s $T \uparrow \rho \uparrow \Rightarrow$ **KOVY**

s $T \uparrow \rho \downarrow \Rightarrow$ **POLOVODIČE**

❖ POLOVODIČE

$$\rho_p = A_1 \exp (\Delta E_q / kT)$$

$$\rho_p = A_2 \exp (\Delta H / RT)$$



ΔE_q ... šířka zakázané zóny [eV]

$$k = 8.617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

ΔE_q pro Si = 1.12 eV
Ge = 0.69 eV

- Čím větší je teplota polovodiče, tím větší počet e^- bude ve vodivostním pásu. Kromě toho každý e^- , který přešel do vodivostního pásu uvolnil svou dráhu ve valenčním $\Rightarrow$ další e^- přeskakují na tyto uvolněné hladiny

Koncentrační závislost

$\Rightarrow$ vodivost závisí na čistotě látky

KOVY: $\rho = \rho_0 (1 + \beta c_B)$

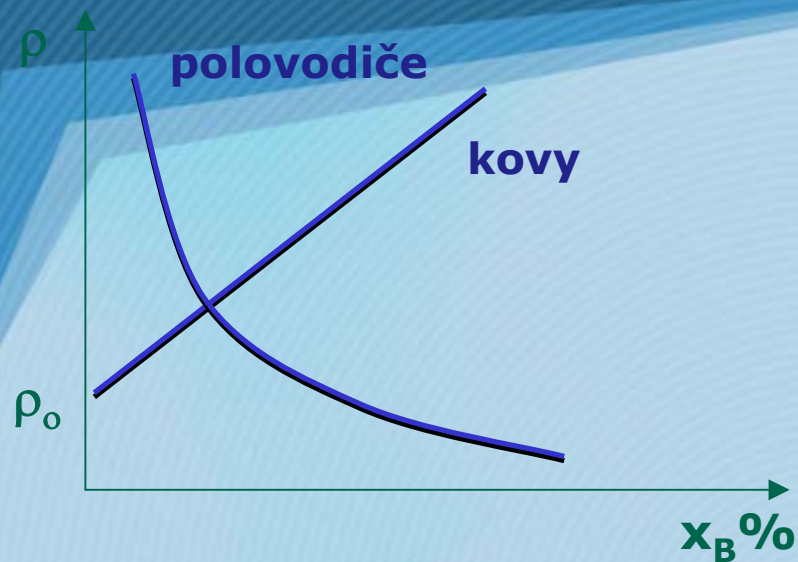
POLOVODIČE: $\rho = 1 / (N_{maj} \cdot e \cdot \mu_{maj})$

β ... konstanta materiálu, mění se v závislosti na koncentraci prvku;
zjišťuje se měřením ρ

N_{maj} ... počet majoritních nosičů náboje (e^- nebo díry) $10^{12} - 10^{13} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$

μ_{maj} ... pohyblivost majoritních nosičů náboje $[\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$

e ... náboj elektronu $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$



Kompenzovanost

- Souvisí s rekombinací náboje (e- obsadí díry a elektricky nepůsobí, přesto tam fyzicky je).

$$K = N_{\min} / N_{\max}$$

$$N_{Dn} = N_{D0} / v_D^n$$

N_{Dn} ... počet donorů po n-tém procesu tavení (přechodu zóny)

N_{D0} ... výchozí koncentrace všech donorů

v_D ... ochuzovací koeficient (≥ 1) zahrnuje rozdělovací koeficient i vypařování

n ... počet průchodů procesu ZT

PŘÍKLAD

Určete výchozí koncentraci akceptorů N_A a donorů N_D pro ingot křemíku, u kterého byla po 1. zonálním tavení ve vakuu naměřena rezistivita $\rho_1 = 300 \Omega\text{cm}$, po 2. zonálním tavení $\rho_2 = 530 \Omega\text{cm}$. Typ vodivosti N. Koeficient ochuzení donoru $v_D = 1.7$, koncentrace akceptorů se nemění.

$$\rho = 1 / (N_{\text{maj}} \cdot e \cdot \mu_{\text{maj}})$$

$$N_{\text{maj}} = N_{D0}/v_D^n - N_A/v_A^n$$

$$N_{\text{maj}} = N_D - N_A$$

Polovodiče

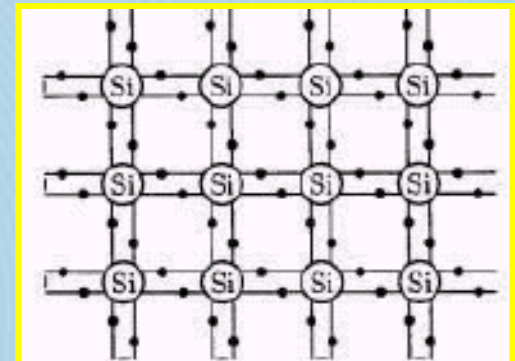
- Polovodiče jsou látky, jejichž měrný odpor se pohybuje za normální teploty v rozmezí řádů 10^{-2} - $10^9 \Omega\text{m}$. Při nízkých teplotách jsou prakticky nevodivé a chovají se tedy jako izolanty. Mezi jejich základní vlastnosti patří:
 - s rostoucí teplotou jejich odpor exponenciálně klesá a roste vodivost
 - mají vodivost buď vlastní nebo nevlastní
 - jsou to především materiály ze IV. A skupiny PSP: Si, Ge (ve valenční vrstvě mají 4 elektrony)

Rozdělení polovodičů:

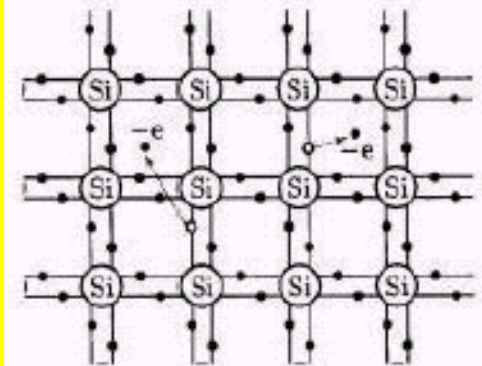
- a) vlastní (Si, Ge, Te, Se)
- b) příměsové (viz dále)

Model struktury Si

- obdobné pro Ge i polovodičové sloučeniny
- kovalentní vazba, $Z=4$ (4 sousední atomy), diamantová mřížka
- el. konfigurace: $[\text{Ne}] ; 3s^2, 3p^2$ (val. vrstva s^2p^2)



5-89 Model struktury křemíku



5-90 Vznik páru elektron — díra

Model struktury Si

- ⇒ při vzniku vazeb mezi atomy Si není dodržen Pauliho vylučovací princip, proto dochází k hybridizaci vazeb (na konfiguraci val. vrstvy sp^3), tyto elektrony se spojí s dalšími 4 elektrony - v okolí atomu Si bude 8 val. elektronů



- ⇒ **struktura bude však navenek neutrální, bez dalšího zásahu se chová jako izolant. Vodivost lze zajistit dodáním energie nebo mikrolegováním příměsí.**

Vlastní vodivost

⇒ při vyšší teplotě mohou kmity atomů mřížky polovodiče vyvolat porušení vazeb mezi atomy. Poruší-li se některá vazba, vzniknou volné elektrony a současně s nimi díry. Jde o generaci páru díra - volný elektron. Díra je v podstatě vyjádření pro absenci elektronu ve vazbě mezi atomy. Má kladný náboj - z přebytku kladného náboje jádra proti obalu. Zánik páru díra - volný elektron se jmenuje rekombinace.

VZNIK POLOVODIČŮ TYPU N NEBO P VLIVEM:

tepelná excitace, poruchy mřížky - vlivem zvýšení teploty, přítomných strukturních poruch

odchylka od stechiometrie - v případě polovodičových sloučenin:

typ $A^{III}B^V$, např. GaP, GaAs, InSb, InAs

typ $A^{II}B^{VI}$, např. HgS, HgSe, CdS, CdSe, ZnSe

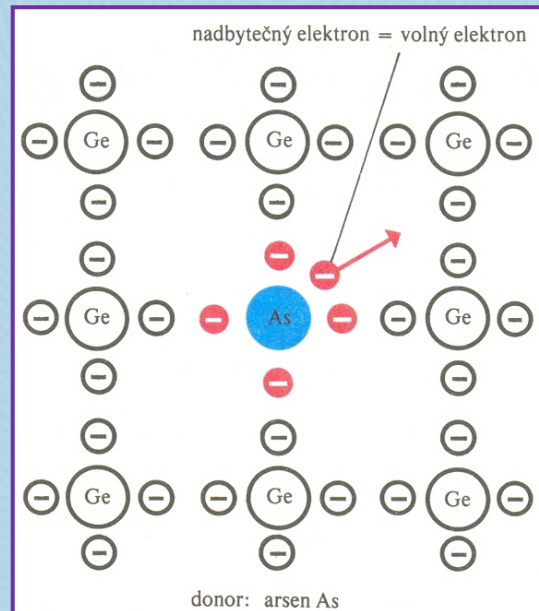
Př.: Ga:As = 50:50 odchylka od složení jednoho nebo druhého prvku vybudí vodivost typu N nebo P

Příměsová vodivost

(vznik polovodičů typu N nebo P vlivem přidání příměsi)

Si – P^V (Ge – As^V)

- fosfor má pro plnou vazbu e⁻ navíc (5 val. e⁻), tedy působí jako donor; tento e⁻ je slabě vázán na své místo, působením i slabého pole se může dát e⁻ do pohybu proti směru tohoto pole → polovodič s vyšší koncentrací e⁻ → vodivost negativní → typ N.

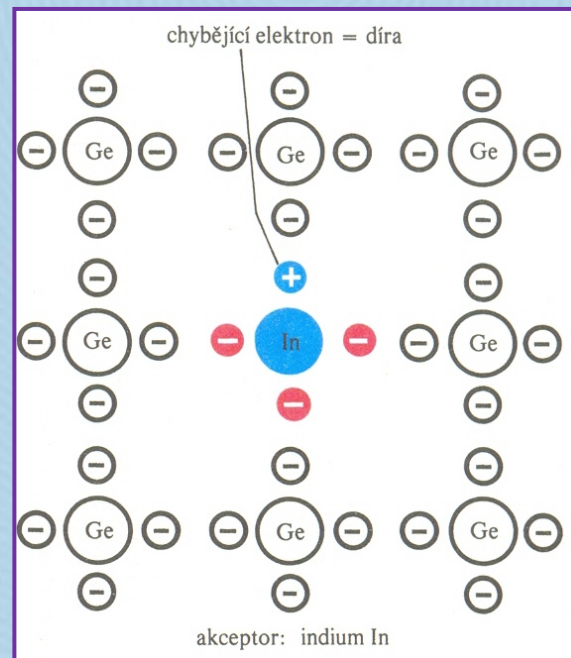


Příměsová vodivost

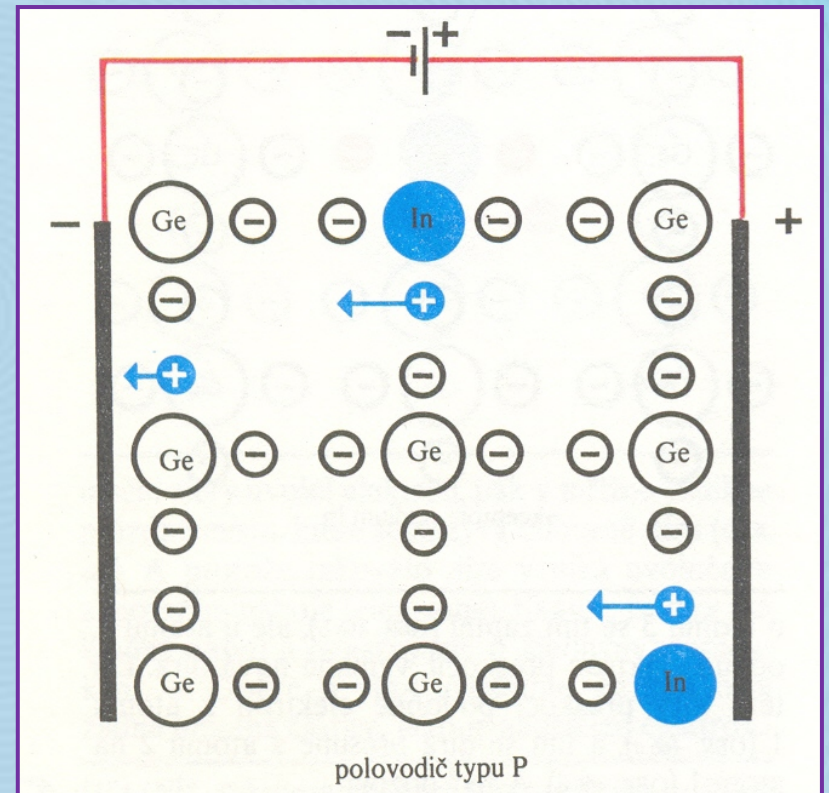
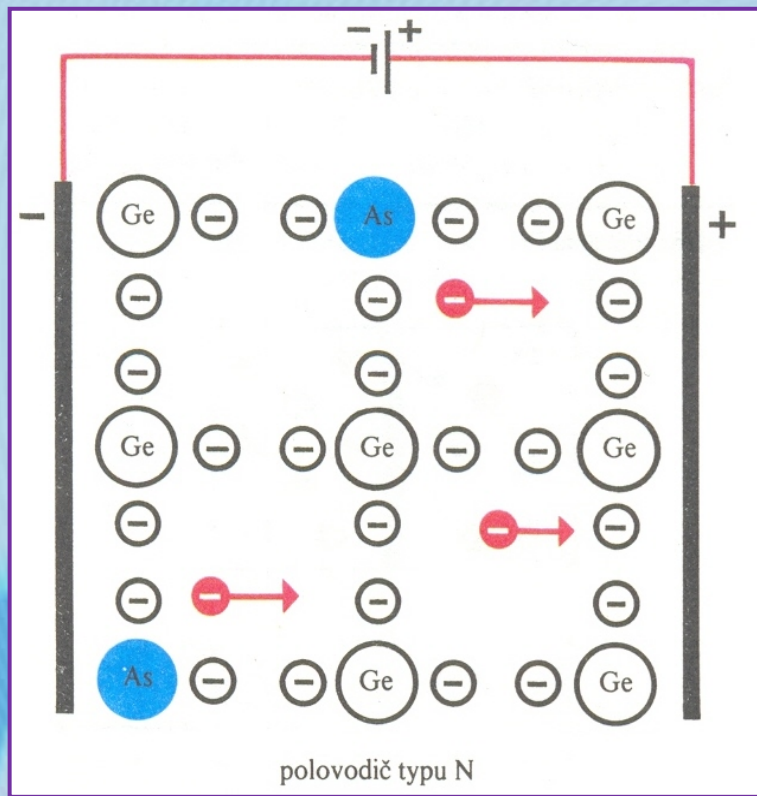
(vznik polovodičů typu N nebo P vlivem přidání příměsi)

Si –Al^{III} (Ge –In^{III})

- hliník potřebuje pro plnou vazbu e⁻ navíc (3 val. e⁻), stačí jen malá změna energie, aby e⁻ od některého sousedního iontu Si přešel na prázdné místo. Tím se uvolní místo, kde původní e⁻ byl, na toto místo se dostane další e⁻, a tak to vypadá, jako by se pohybovala díra. Al tedy působí jako akceptor → polovodič s nižší koncentrací e⁻ → vodivost pozitivní → typ P.



Vedení proudu



Rozdělení příměsí

1) *elektricky neutrální*

- a) všechny interstitické prvky – H, N, B, C v intersticiálních polohách
- b) izovalentní prvky – např. Ge v Si, In nebo Sb v GaAs – prvky ze stejné skupiny jako základní nahrazovaný prvek
- c) inertní plyny – He, Ar,...

2) *donorové* → **vodivost typu N**

= prvek o 1 sloupec v PSP vpravo od základního prvku (P pro Si, Si nebo Se pro GaAs atd.)

3) *akceptorové* → **vodivost typu P**

= prvek o 1 sloupec v PSP vlevo od základního prvku (Al pro Si, Zn nebo Ge pro GaAs atd.)

4) *amfoterní*

= prvky, které mohou působit za určitých podmínek ve sloučenině jako akceptor nebo jako donor (pro prvkové polovodiče tyto prvky neexistují).

5) S vysokou úrovní vodivosti

= prvky, které poskytují min. 2 e^- nebo díry najednou, platí pro prvky, které jsou o 2 pozice nalevo nebo napravo od základního prvku, tranzitivní prvky, které mají neúplně obsazené sféry elektrony. Vlivem lokálně zvýšené koncentraci e^- dochází při zátěži k lokálnímu přehřívání a poškození materiálu.

Výjimka: mikrolegování Fe, Cr a Mn u polovodičových sloučenin $A^{III}B^V$, kdy tyto prvky kompenzují nepříznivý účinek škodlivých příměsí, jako např. O – za vzniku sloučenin (Fe_xO_y).

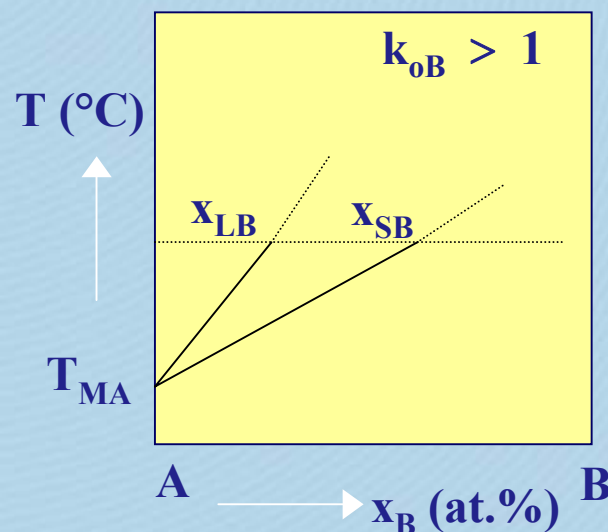
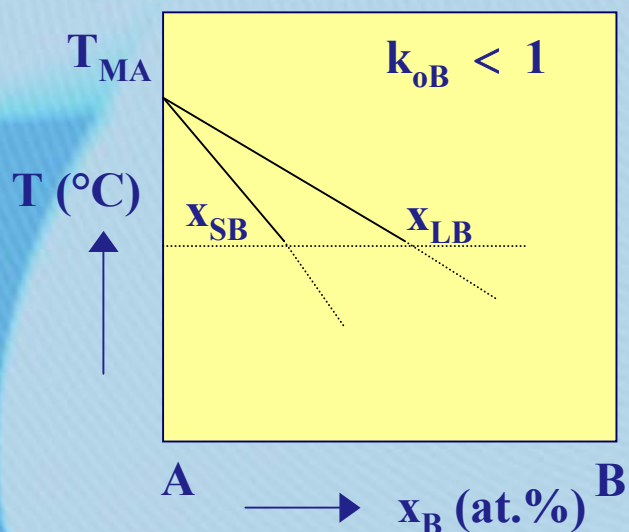
Metody získávání velmi čistých kovů

⇒ Základním materiálovým parametrem, který je mírou rozdělování příměsí a nečistot při krystalizačních procesech je rovnovážný rozdělovací koeficient. Je definován jako izotermní poměr koncentrace příměsového prvku v tuhé a tekuté fázi v základní látce:

$$k_o = \frac{x_{SB}}{x_{LB}}$$

x_{SB} ... molární zlomek příměsi B v tuhé fázi

x_{LB} ... molární zlomek příměsi B v tekuté fázi



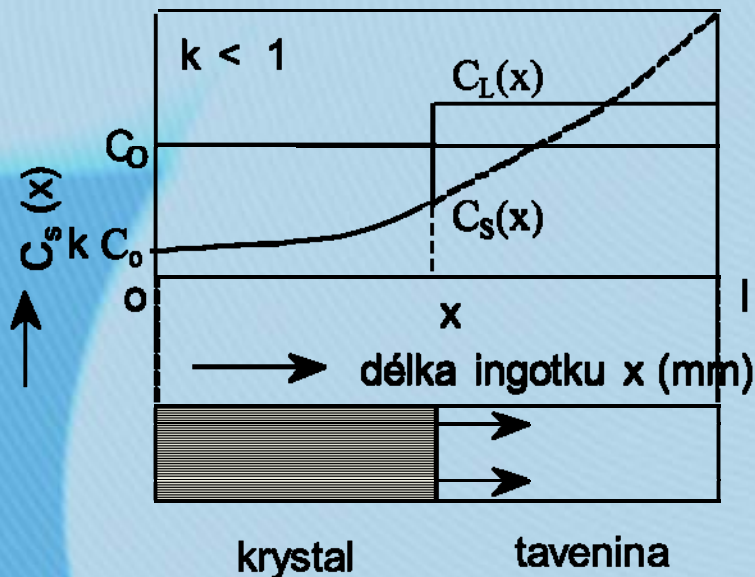
Směrová krystalizace

⇒ Roztaveným ingotkem rafinovaného materiálu o délce l_0 a výchozí koncentraci příměsi C_0 se posouvá pomalou rychlostí fázové rozhraní krystal-tavenina.

⇒ Přitom dochází na tuhoucím rozhraní k přerozdělování příměsí a nečistot přítomných v základní látce.

Vztah mezi rozdělovacím koeficientem, množstvím utuhlé látky a koncentrací příměsí :

$$C_1(x) = C_0 k (1 - g)^{k-1}$$

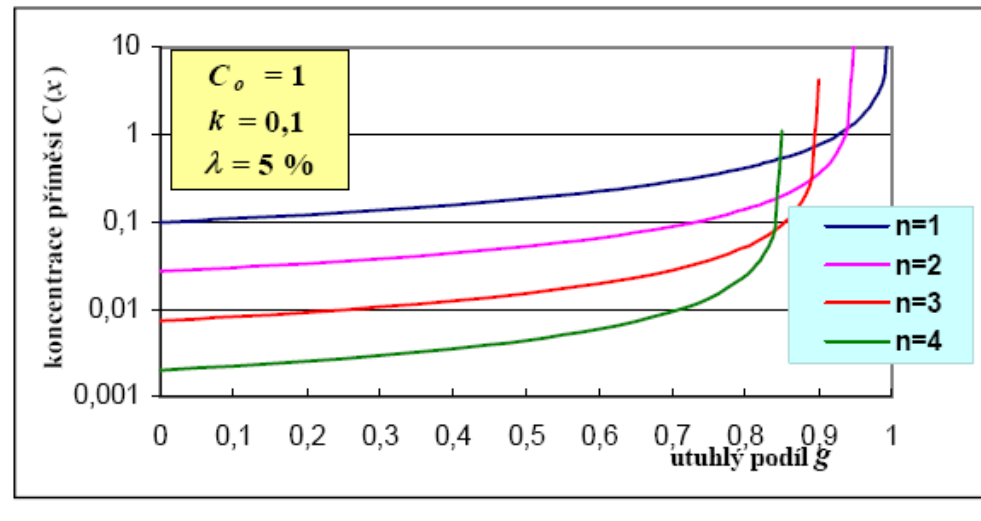
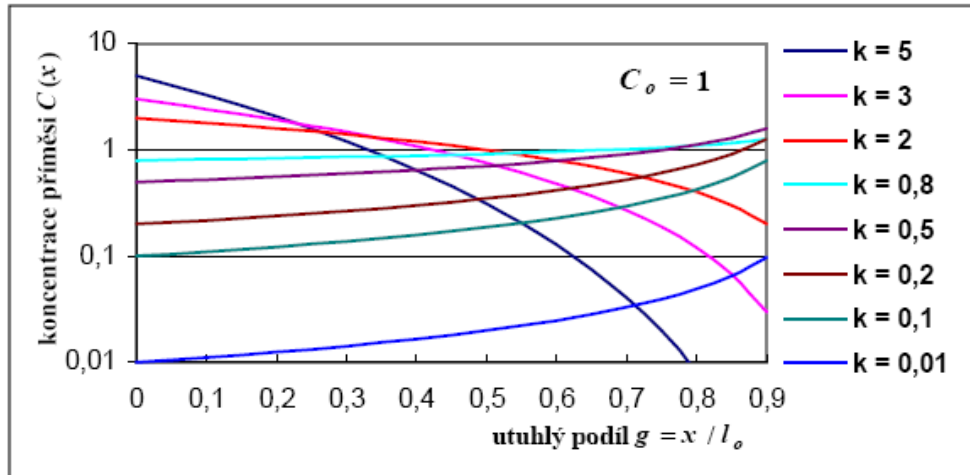


kde $C_1(x)$ – koncentrace příměsí v krystal
 C_0 – výchozí koncentrace příměsí v celém objemu tavenin

k – rozdělovací koeficient prvku B v základní látce

g – poměrná část utuhlého ingotku ($g = x / l_0$)

Ukázka profilů po rafinaci pomocí SK



Zonální tavení

- ⇒ při zonálním tavení je v ingotku o délce l_0 natavena pouze jeho definovaná část, tj. úzká zóna o šířce b . Roztavená zóna s koncentrací příměsí v tavenině C_L , která postupuje ingotkem, má dvě rozhraní mezi taveninou a tuhými fázemi:
- frontu natavování – $(x+b)$, kde je původní tuhá fáze o koncentraci C_0 do zóny natavována
 - frontu tuhnutí – v místě (x) , kde v zóně roztavený a konvekcemi v tavenině homogenizovaný materiál o koncentraci C_L opět tuhne, avšak s novou koncentrací $C_1(x)$.

Pro první průchod zóny ingotkem lze popsat rovnicí:

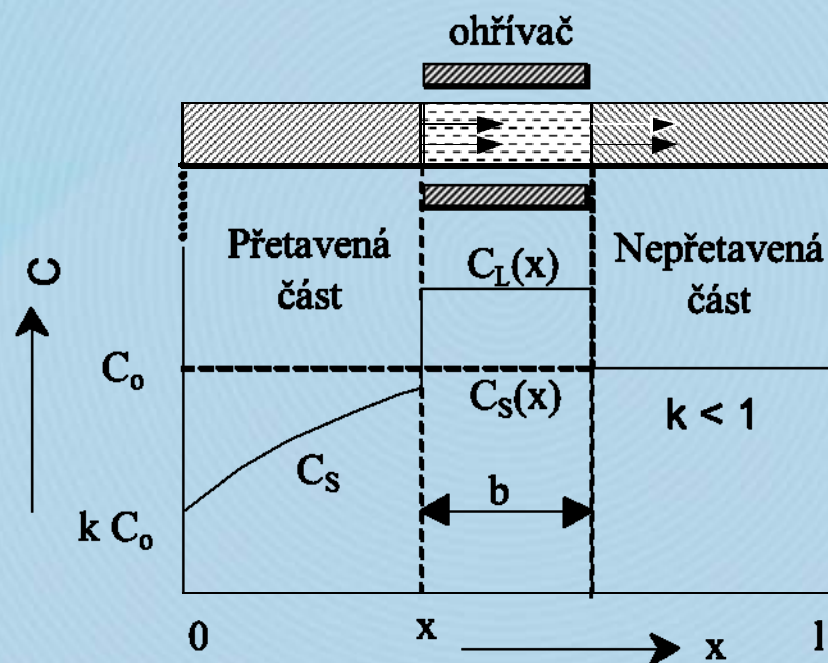
$$C_1(x) = C_0 \left[1 - (1 - k) \exp\left(\frac{-kx}{b}\right) \right]$$

C_0 - původní koncentrace dané příměši v celém objemu ingotku

b - šířka zóny

$C_1(x)$ - nová koncentrace příměši v utuhlé části ingotku v místě x po jednom průchodu

Princip zonálního tavení



Ukázka profilů po rafinaci pomocí ZT

