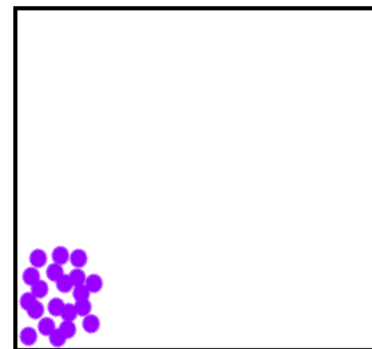


# Sodobni materiali

## Difuzija v trdnem



# Difuzija v trdnem

## ***Difuzija v trdnem je...***

- transport atomov skozi snov
- Mehanizem na osnovi katerega se dogajajo pomembne procesi v materialih
  - ***Površinsko utrjevanje*** jekel
  - ***Dopiranje*** polprevodnikov
  - ***Oksidacija*** kovin
  - ***Reakcija v trdnem stanju***
  - ***Sintranje*** — Proces, pri katerem iz prahu stisnjen objekt pridobi gostoto in trdnost med termično obdelavo

# Procesi na osnovi difuzije

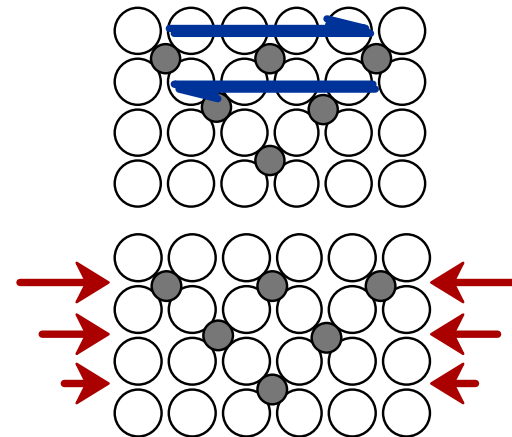
## ***Površinsko utrjevanje:***

- intersticijska difuzija ogljika v površinske sloje jekla
- primer je površinsko utrjevanje zobnikov



## ***Posledica površinskega utrjevanje :***

- površino je težko deformirati  
C atomi otežijo zdrs kristalnih ravnin
- površino je težko prelomiti  
zaradi C atomov je površina pod stisno napetostjo

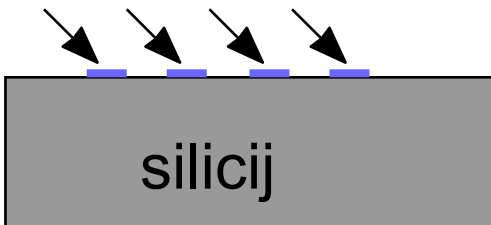


# Procesi na osnovi difuzije

Primer: **Dopiranje** silicija s P za n-tip polprevodnika

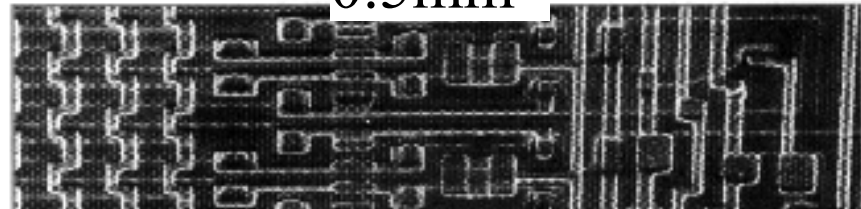
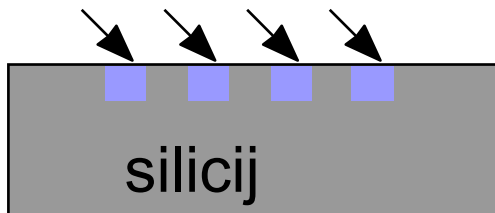
Proces:

1. Nanos sloja s P na površino polprevodnika.

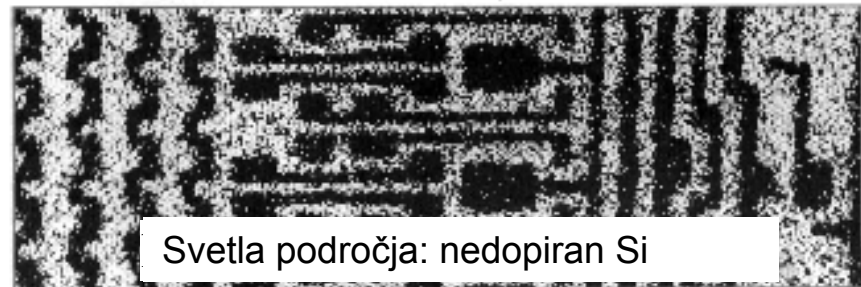


2. Toplotna obdelava

3. Rezultat: dopirana področja Si postanejo n-tip polprevodnika



Povečana slika računalniškega procesorja



Svetla področja: nedopiran Si



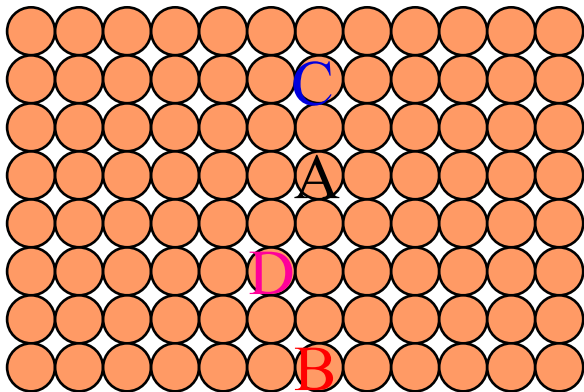
Svetla področja: P-dopiran Si

# Način difuzije v trdnem

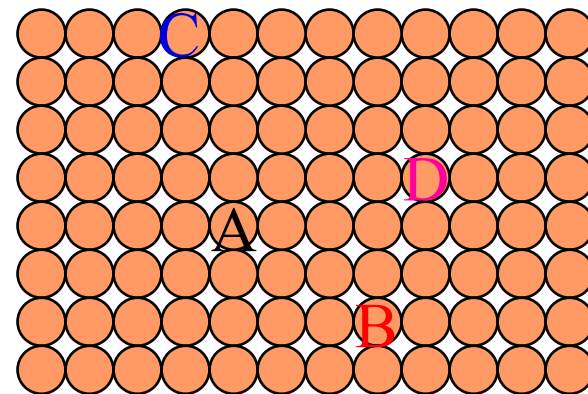
- **Lastna difuzija** — gibanje atomov skozi njihovo lastno mrežo (trdnih elektrolitih, kisikovi senzorjih, sintranje)
- **Interdifuzija** (difuzije raznovrstnih atomov) — *npr.*, gibanje Ni skozi kristal Cu (dopiranje, utrjevanje, kemijska reakcija)

## Primer lastne difuzije:

Če označimo atome A,B,C,D



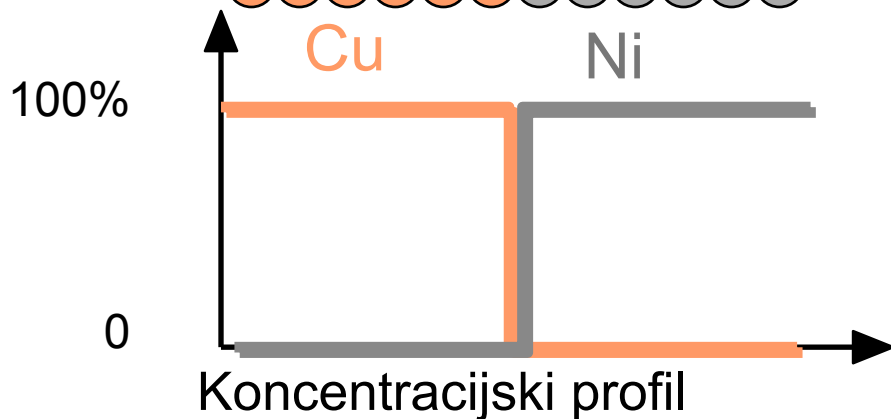
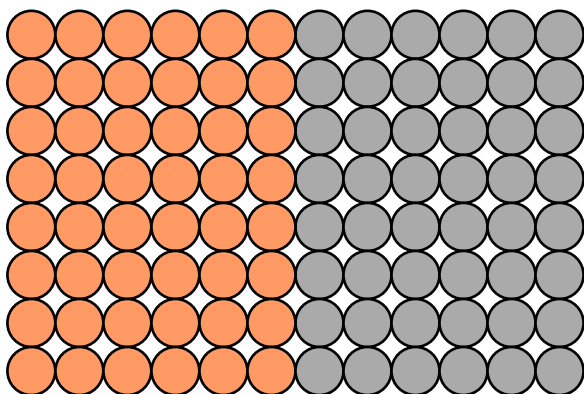
so po določenem času na drugih mestih



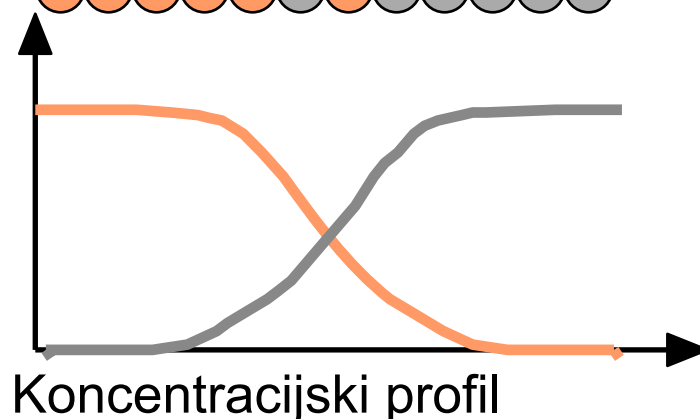
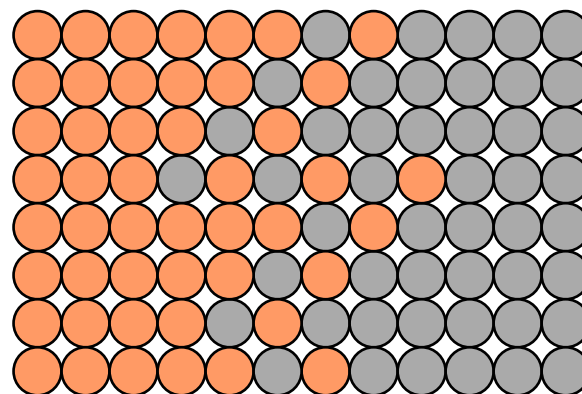
# Način difuzije v trdnem

*Primer interdifuzije:* V zlitinah atomi migrirajo s področja visoke koncentracije na področje nizke koncentracije.

Na začetku



Po določenem času

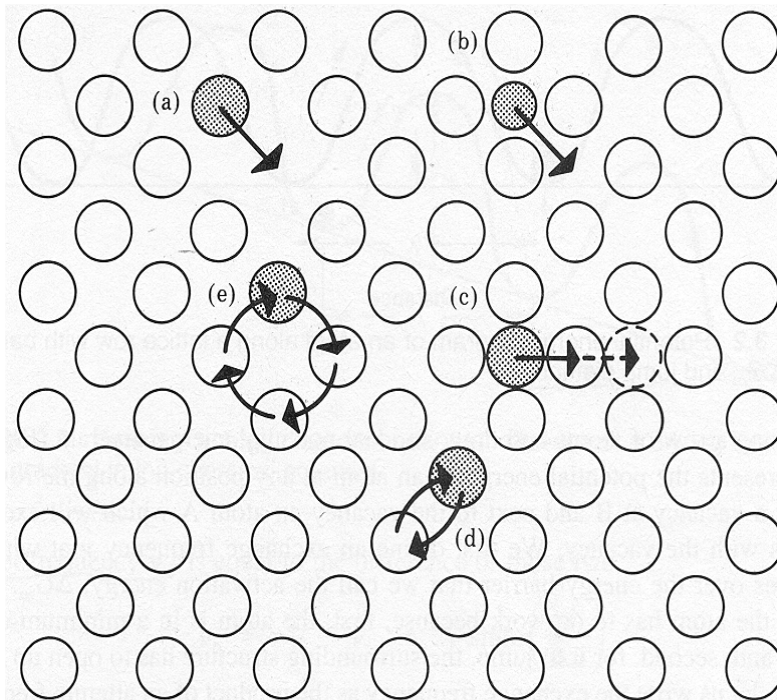


# Atomistični mehanizmi difuzije

## Mehanizmi

- **Difuzija preko vrzeli**
- **Intersticijska difuzija**
- **Izmenjalna difuzija**

Običajno je intersticijska difuzija najhitrejša (trdni elektroliti, ionski prevodniki)



- preko vrzeli
- Intersticijska
- Intersticijska preko vrzeli
- izmenjalna
- izmenjalna krožna

# Makroskopski opis difuzije

## Prvi Fickov zakon

– za ravnotežno stanje

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

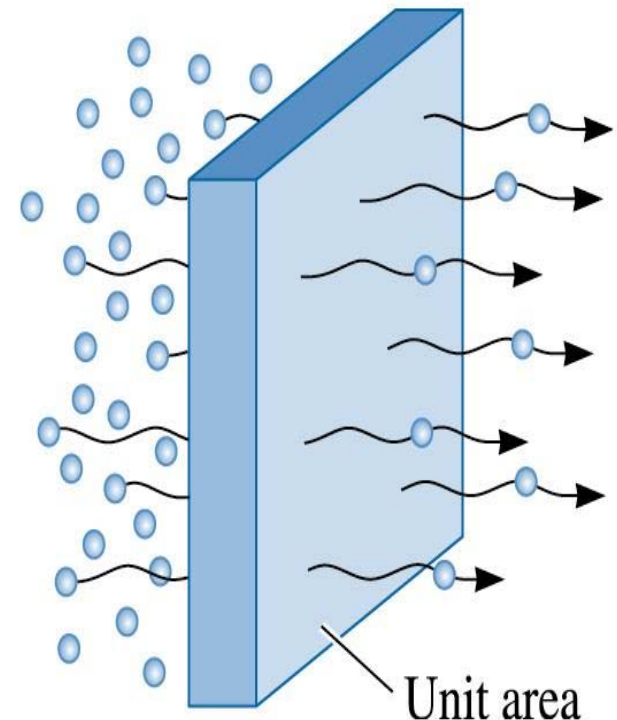
J...flux  $J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \Rightarrow \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] \text{ or } \left[ \frac{\text{atoms}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]$

$dC/dx$  ...koncentracijski gradient  
– gonilna sila za difuzijo [ $\text{kg}/\text{m}^4$ ]

$D$  ... **difuzijski koeficient** [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
sorazmernostna konstanta med  
gradientom in fluksom.

Negativni predznak kaže na to, da masni fluks poteka s strani z višjo konc. Na stran z nižjo - vzdolž koncentracijskega gradienta

Masni fluks je definiran kot število atomov, ki prehaja skozi ravnino ene ploskovne enote.

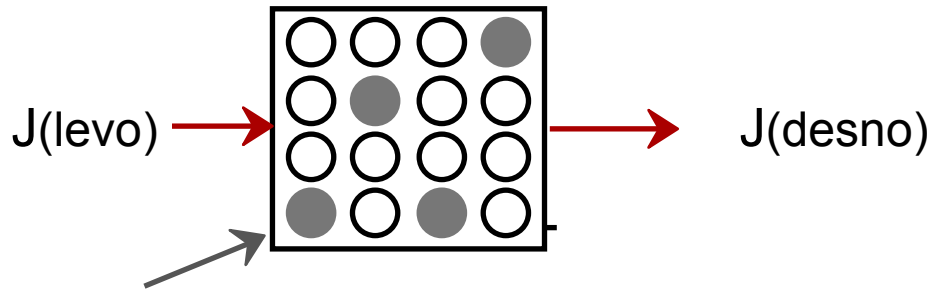




# Makroskopski opis difuzije

## Prvi Fickov zakon

– za ravnotežno stanje



Konzentracija v škatli se ne spreminja s časom.

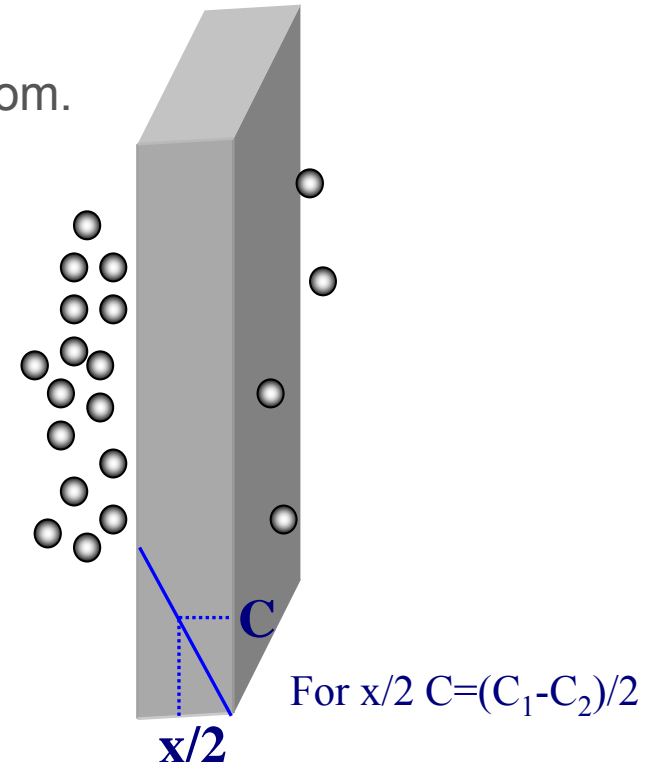
Ravnotežno stanje:

$$J(\text{levo}) = J(\text{desno})$$

➤ Apply Fick's First Law: 
$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

➤ If  $J(\text{levo}) = J(\text{desno})$ , then 
$$\left( \frac{dC}{dx} \right)_{\text{levo}} = \left( \frac{dC}{dx} \right)_{\text{desno}}$$

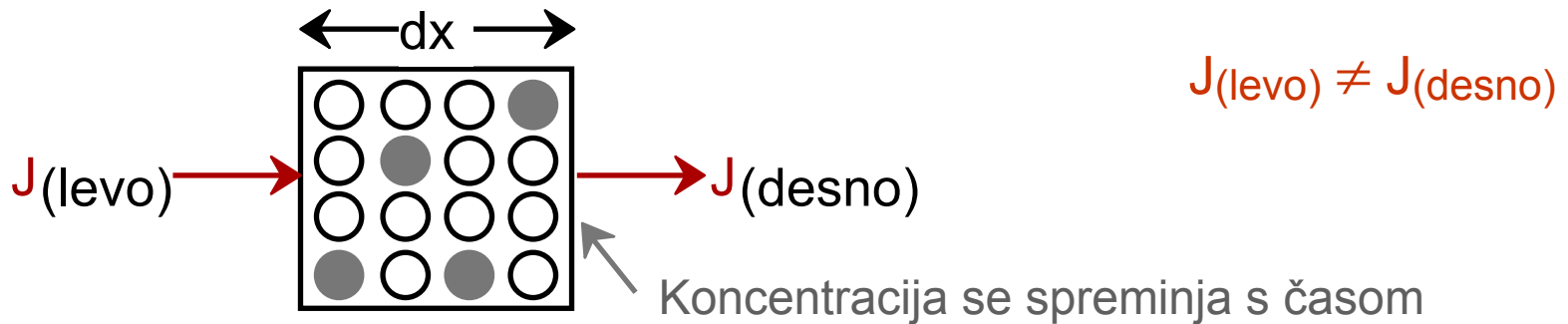
- Rezultat: naklon  $dC/dx$ , mora biti konstanten  
koncentracijski profil je linearen  
in neodvisen od časa



# Makroskopski opis difuzije

## Drugi Fickov zakon

– za neravnotežno stanje



➤ Koncentracijski profil se spreminja s časom

➤ Za ohranitev snovi v sistemu mora veljati:

[hitrost nalaganja] = – [gradient fluksa]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x}$$

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

**Drugi Fickov zakon**

## Primer rešitve 2. Fickovega zakona:

Tehnično pomemben sistem je sistem s končnim planarnim virom, ki difundira v neskončen material

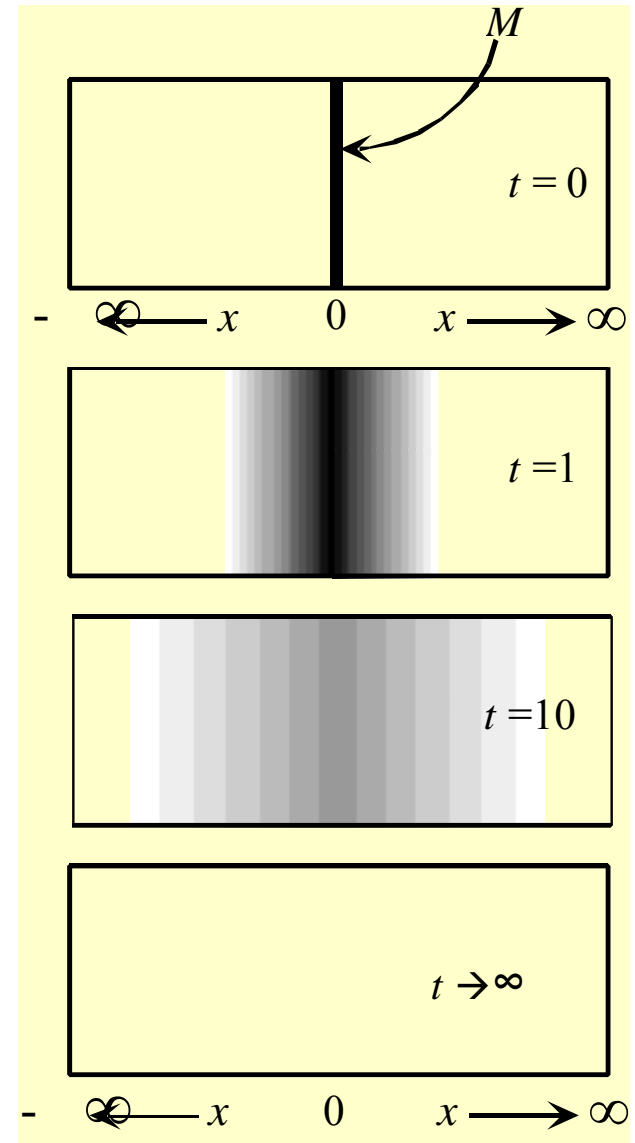
- začetni pogoj.:  $C(x,0) = 0$
- mejni pogoj #1:  $C(\infty,t) = C(-\infty,t) = 0$

(sestava na “koncu” neskončne palice se ne spremeni)

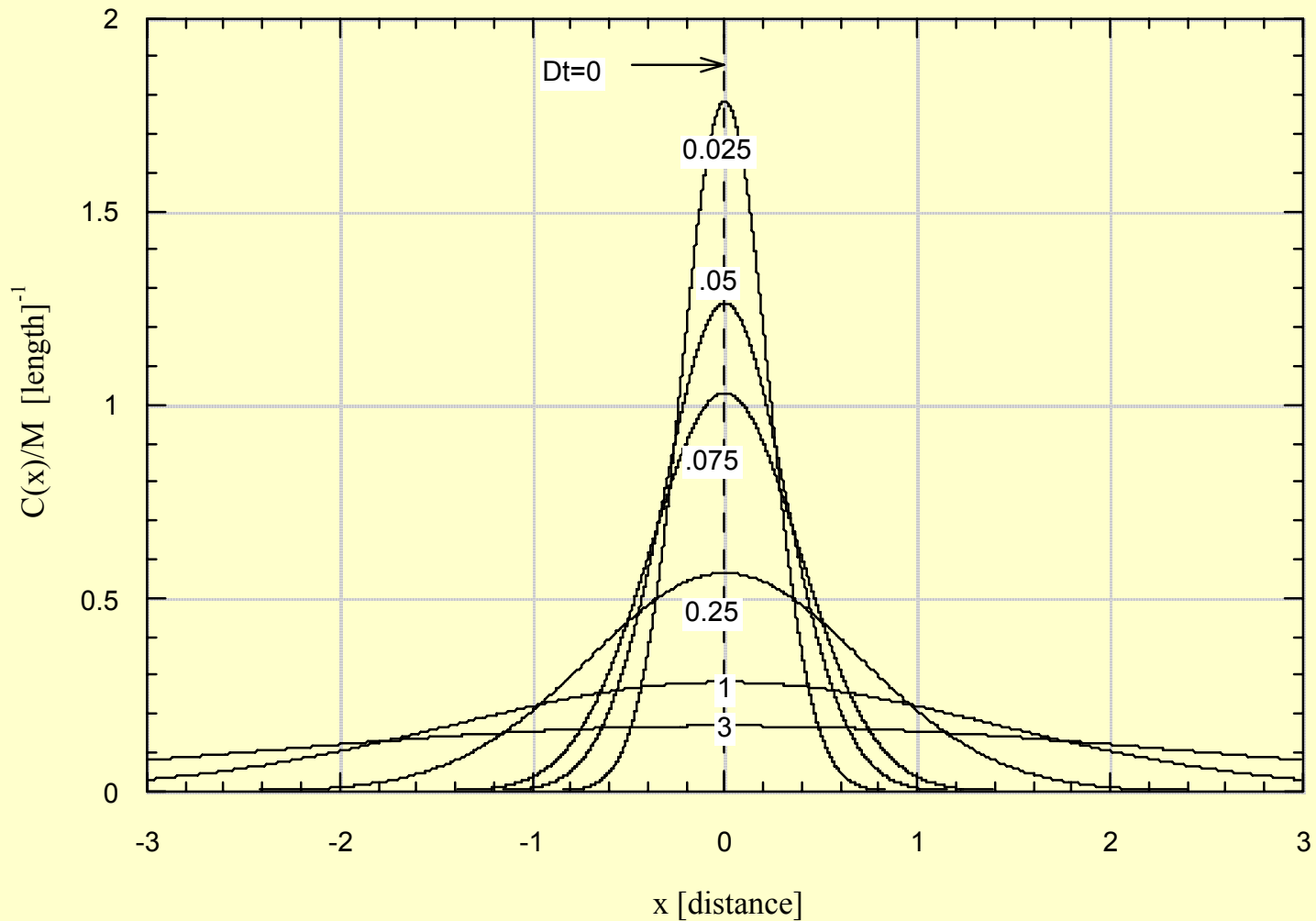
- mejni pogoj #2: 
$$\int_{-\infty}^{\infty} C dx = M$$

Velja za vse  $t$  (konstanta celokupna količina  $M$ )

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



# Grafična rešitev za končni planarni vir



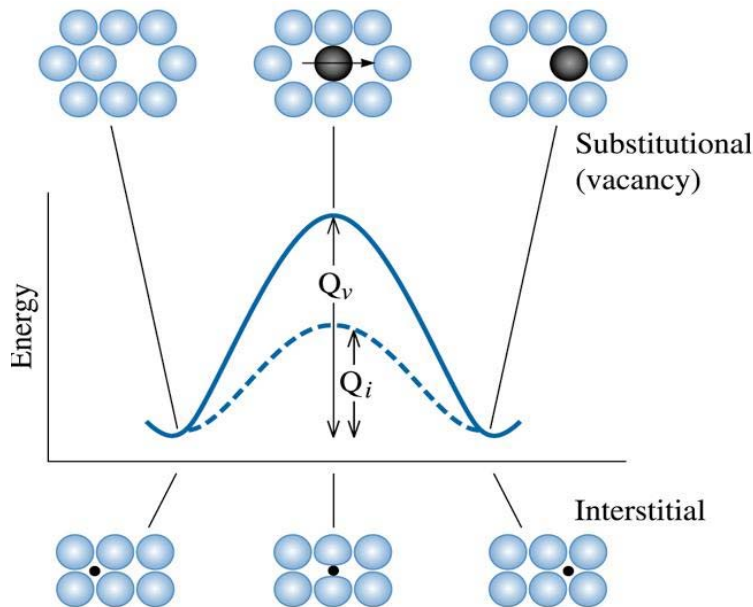
# Difuzijski koeficient

Atom, ki difundira potrebuje...

1) Prazno sosednje mesto; koncentracija vrzeli in torej tudi hitrost difuzije je močno odvisna od temperature in koncentracije nečistoč (dopantov)

$$[V_M] = \exp\left(-\frac{\Delta H_f}{kT}\right) \quad [V'_M] = [F'_M]$$

2) Aktivacijsko energijo, da zapusti staro mesto



$$D(T) = D_o \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

R ... 8.314 JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>

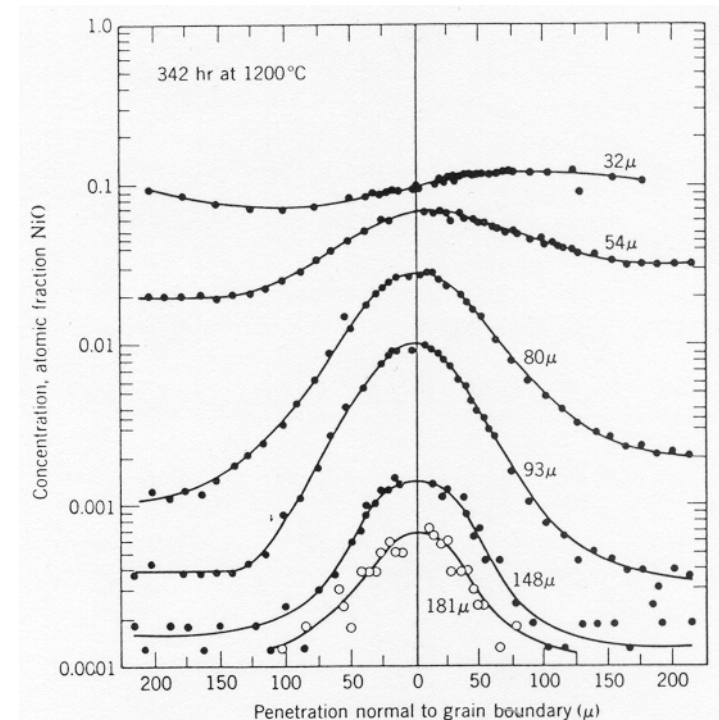
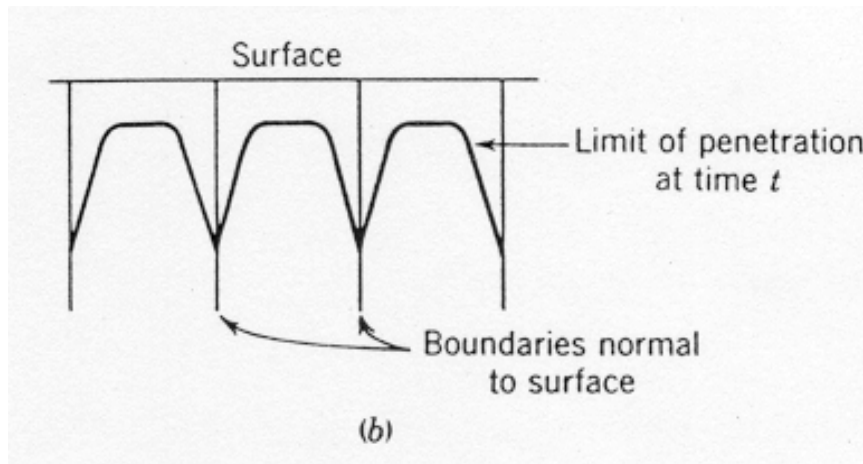
Q... aktivacijska energija za difuzijo

- se povečuje z velikostjo delca
- je večja za difuzijo preko vrzeli in manjša za intersticijsko difuzijo

# Površinska difuzija

Velja za dislokacijske ravnine, meje med zrnji in površine

- Na površinah faz atom, ki difundira, ni stisnjen med sosednje atome z vseh strani.
- Na dislokacijskih ravninah in mejah med zrnji atomski sklad ni tako gost kot v kristalu.
- Posledično so difuzijski koeficienti večji in aktivacijske energije manjše.
- Ocena: površinska difuzija je enkrat hitrejša kot mrežna difuzija medtem ko so vrednosti za difuzijo po dislokacijskih ravninah in mejah vmesne



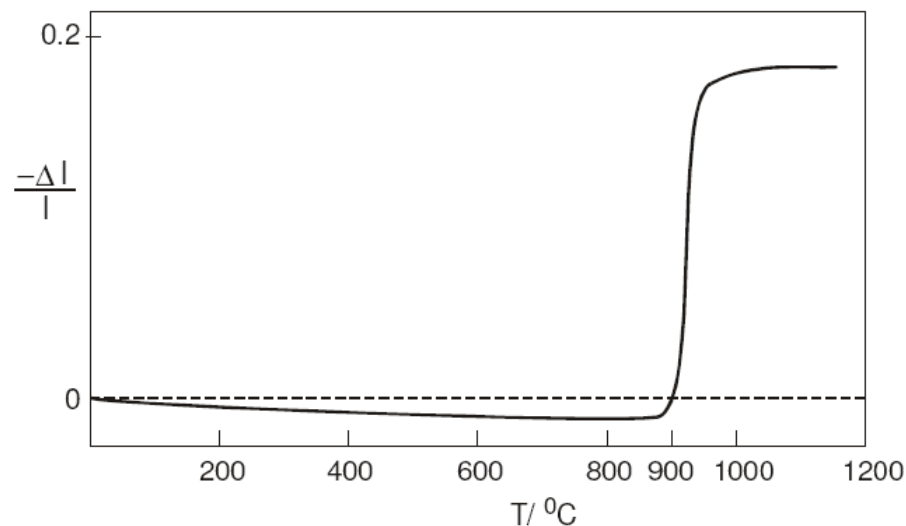
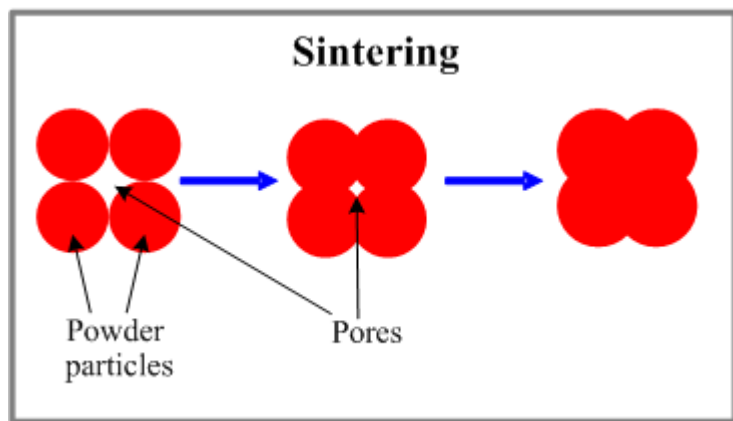
# Difuzija v trdnem

## ***Difuzija je...***

- transport atomov skozi snov
- Mehanizem na osnovi katerega se dogajajo pomembne procesi v materialih
  - ***Površinsko utrjevanje*** jekel
  - ***Dopiranje*** polprevodnikov
  - ***Oksidacija*** kovin
  - ***Reakcija v trdnem stanju***
  - ***Sintranje*** — Proces, pri katerem iz prahu stisnjen objekt pridobi gostoto in trdnost med termično obdelavo

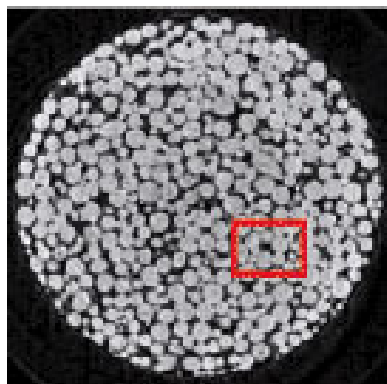
# Sintranje

Sintranje je termična obdelava pod temperaturo tališča matrične faze, ki pretvori kovinski ali keramičen prah (ali iz prahu stisnjeno telo) v kompakten keramični izdelek (ki običajno vsebuje še preostanek poroznosti)



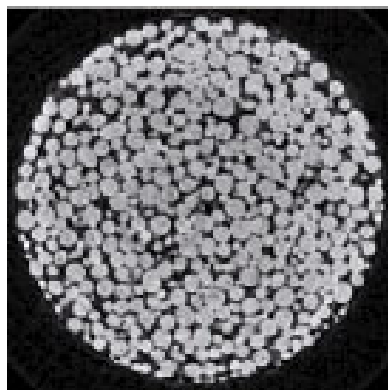


# Sintranje

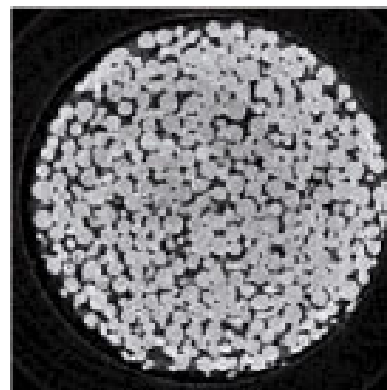


200  $\mu\text{m}$

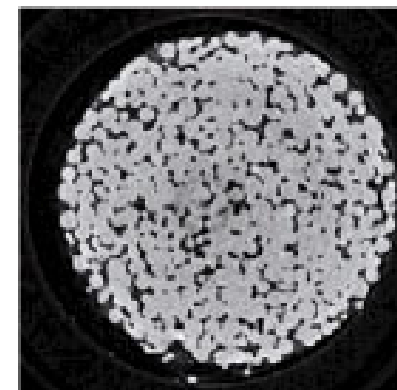
**a)**



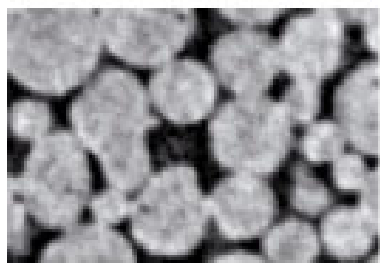
**b)**



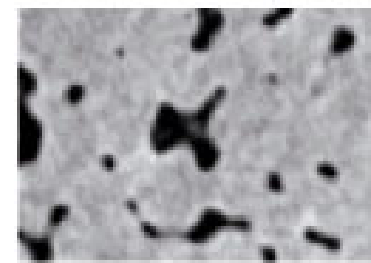
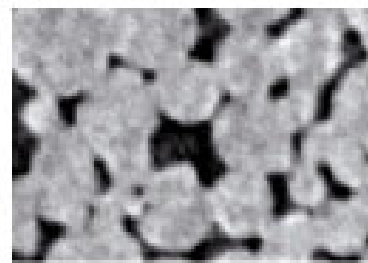
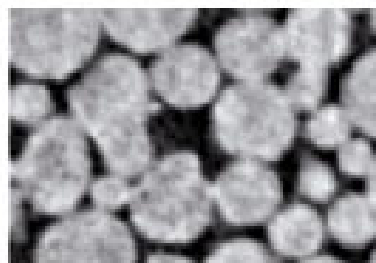
**c)**



**d)**



100  $\mu\text{m}$





# Sodobni materiali

## Sinteza

# Tehnike za sintezo materialov

Sinteza v trdnem

(So)obarjanje

Sol-gel sinteza

Hidrotermalna sinteza

Sinteza monokristalov (Czochralski, Bridgman)

Sinteza tankih filmov

Sinteza nanodelcev

Sinteza polimerov

Ultrazvočna sinteza

Sinteza s prenosom preko parne faze

Mehansko zlivanje

Sinteza pod visokimi pritiski in temperaturami (diamanti)

Reverzibilni miceli

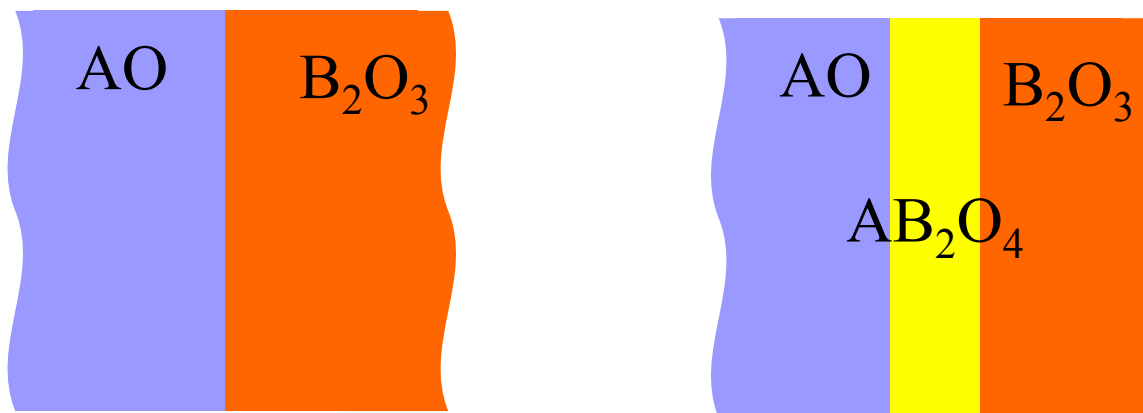
itd...

# Sinteza v trdnem

## Heterogena reakcija:

Reakcija poteka na površinah med reaktanti (AO in  $B_2O_3$ ).

Tvori se reakcijska plast.



## ***Zaporedje reakcijskih stopenj***

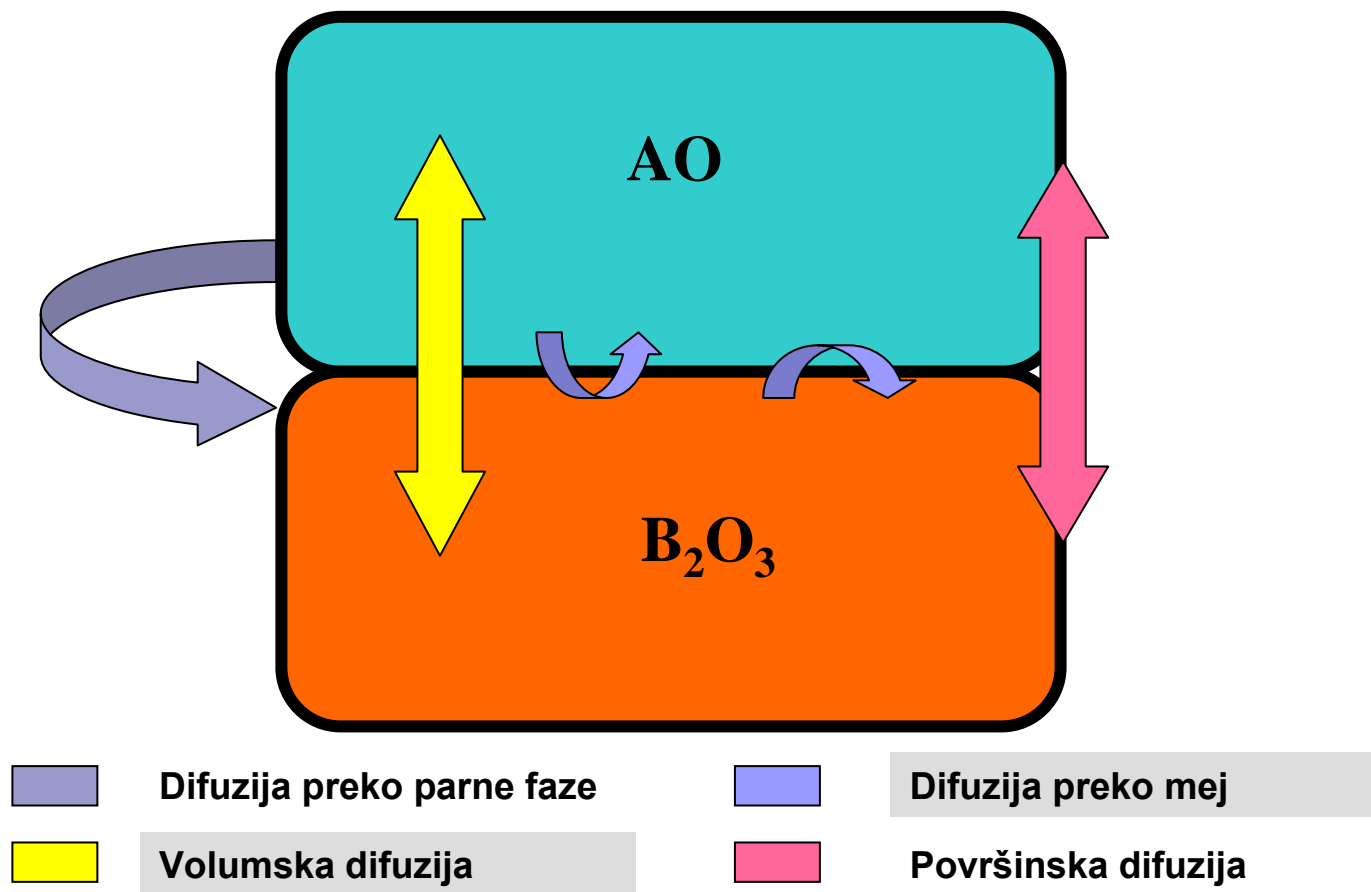
- transport materiala na reakcijsko mesto
- reakcija na fazni meji
- transport produktov stran od fazne meje (npr. plinastih produktov kot  $CO_2$ )

Celokupno reakcijska hitrost (kinetiko reakcije) določuje najpočasnejša stopnja

Toplota, ki se med reakcijo razvija ali absorbira vpliva na kinetiko

# Sinteza v trdnem

Možne reakcijske poti med dvema trdnima fazama

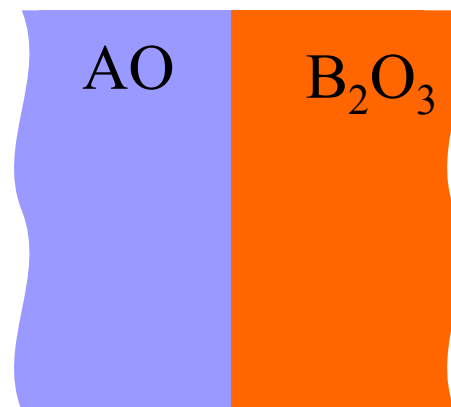


# Sinteza v trdnem

Parametri, ki vplivajo na hitrost reakcije

## 1.) Aktivacijska energija in temperatura

Za začetek reakcije je potrebna difuzija preko fazne meje – potrebno je premagati potencialno bariero, torej aktivacijsko energijo



**Arrheniusova enačba**

$$K = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$

Velja za sisteme, za katere ni potrebna difuzija na dolge razdalje

T ... temperatura

$E_a$ ... aktivacijska energija

R ... 8.314 JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>

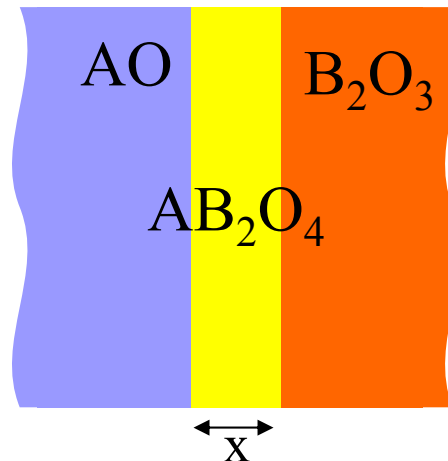
$K = \frac{dc}{c dt}$  ... konstanta reakcijske hitrosti

# Sinteza v trdnem

Parametri, ki vplivajo na hitrost reakcije

1.) Aktivacijska energija in temperatura

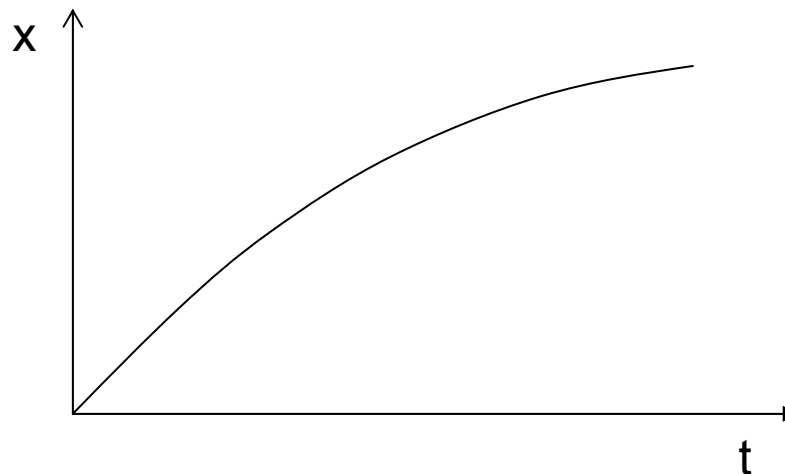
2.) Difuzija skozi reakcijski sloj



Ko je kinetika reakcije pogojena s hitrostjo difuzije skozi reakcijski sloj reakcija napreduje po **paraboličnem kinetičnem zakonu**

$$x^2 = Kt$$

K...parabolična hitrostna konstanta  
t...čas



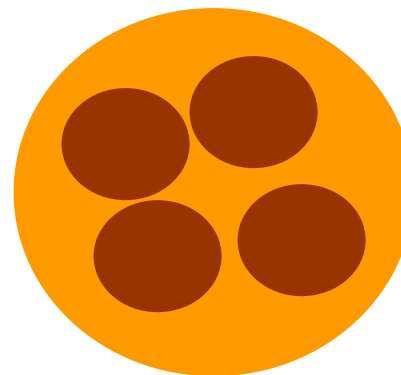
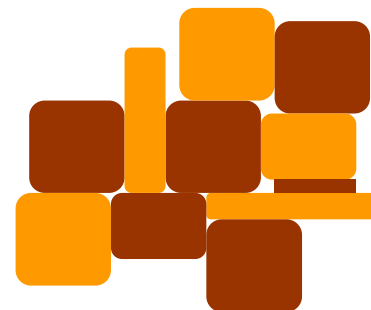
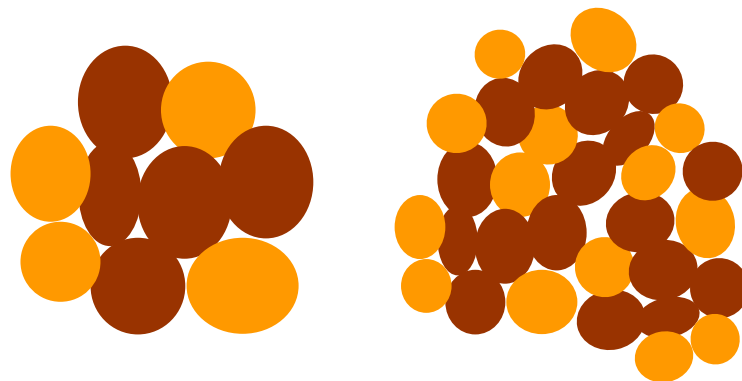
# Sinteza v trdnem

Parametri, ki vplivajo na hitrost reakcije

- 1.) Aktivacijska energija in temperatura
- 2.) Difuzija skozi reakcijski sloj
- 3.) Stične površine

$$\frac{dG}{dt} = Kc_1c_2F$$

- G ... stopnja pretvorbe  
K ... konstanta reakcijske hitrosti  
 $c_1, c_2$  ... koncentracija reaktantov  
F... stična površina





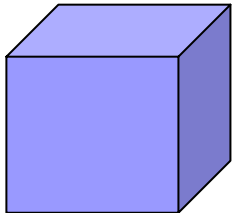
# Sinteza v trdnem

## Vpliv specifične površine prahu na kinetiko reakcije v trdnem

- Stična površina je močno odvisna od specifične površine prahu.
- Specifično površin lahko povečamo z mletjem prahu

Kocka z robom **1cm** ( $=10^4 \mu\text{m}$ )

$$\begin{aligned} \text{Specifična površina } S &= 6 \text{ cm}^2 = 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \\ &= \underline{\underline{6 \times 10^8 \mu\text{m}^2}} \end{aligned}$$



mletje



Kocka z robom **10 μm**

$$S' = 6 \times 10^2 \mu\text{m}^2$$

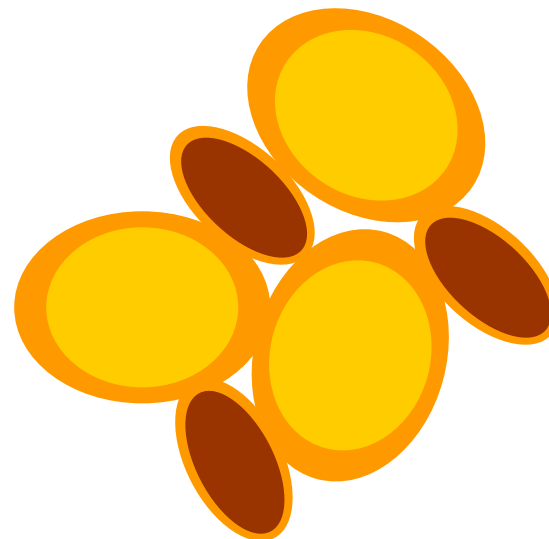
$$\begin{aligned} 10^9 \text{ delcev} \rightarrow S'_{\text{total}} &= 10^9 \times 6 \times 10^2 \mu\text{m}^2 \\ &= \underline{\underline{6 \times 10^{11} \mu\text{m}^2}} \end{aligned}$$

**Povečanje specifične površine za faktor  $10^3$**

# Sinteza v trdnem

## **Eksperimentalni pogoji za povečanje kinetike reakcije v trdnem**

- majhna velikost delcev
- homogena porazdelitev reaktantov
- stiskanje prahov
- primerno visoka temperatura
- vmesno mletje
- ( prisotnost tekoče faze )



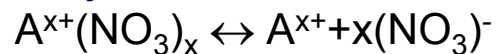
# (So)obarjanje

Mešanje izhodnih ionov na atomarnem nivoju. Zmanjšana difuzijska pot pri reakciji. Reakcija je bolj homogena in veliko hitrejša (nižja T).

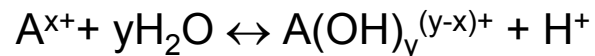
Izhodni reagenti: soli močnih kislin

Stopnje obarjanja:

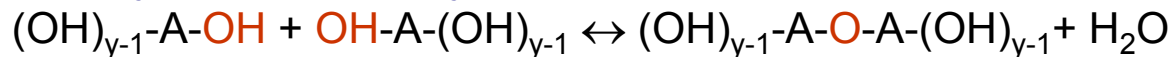
1. Disociacija v vodi



2. Hidroliza



3. Kondenzacija in polimerizacija



4. Po termični obdelavi dobimo oksid

➤ Obarjanje sprožimo z zvišanjem bazičnosti sistema (pH). Raztopino baze (obarjalni reagent) v pribitku zlijemo v sistem – *metoda direktnega udarca*

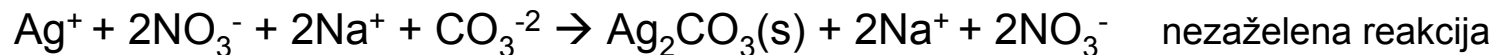
➤ Običajni obarjalni reagenti so  $NH_4OH$ ,  $NaOH$ ,  $Na_2CO_3$ , urea  $CO(NH_2)_2$ , TMAH  $(CH_3)_4N^+OH^-$

# (So)obarjanje

## **Večkationske raztopine:**

➤ Med raztapljanjem soli ne sme priti to obarjanja z izmenjavo ionov

npr. če so izhodne soli  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  in želimo sintetizirati mešan oksid  $(\text{Ag,Na})\text{O}_2$ :



➤ Homogeno obarjanje hidratiranih zvrsti je težje

➤ Večji ioni z manjšim nabojem (npr.  $\text{Pb}^{2+}$ ) potrebujejo večji Ph za hidrolizo

➤ V izogib sekvenčnega lokalnega in nehomogenega soobarjanja, ki bo vodilo do nehomogene porazdelitve kationov) uporabimo *metodo povratnega udara*

➤ *Metoda povratnega udara* = raztopino kation počasi vlivamo v obarjalni reagent

# Sol-gel sinteza

**Koloid:** Suspenzija v kateri so dispergirani delci tako majhni (1-1000nm), da so gravitacijske sile zanemarljivo v primerjavi s silami kratkega dosega (npr. elektrostatskimi)

**Sol:** koloidna suspenzija trdnih delcev v tekočini

**Organo-kovinske spojine:** spojine z direktno vezjo ogljik-kovina

**Metalo-organske spojine:** organski ligandi vezani na kovinski ion

**Alkoksilni ligand :** ligand, ki nastane z odvzemom protona hidroksilni skupini alkoholov

**Alkoksidi:** spojina z alkoksilnim ligandom (e.g. TEOS – tetraetil ortosilikat,  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ )

# Sol-gel sinteza

## *Dva osnovna pristopa*

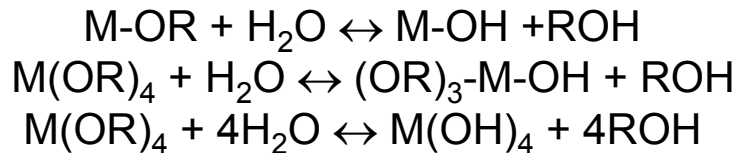
- **metalo-organski pristopa**: z metalo-organskimi alkoksidi in organskimi topili
- **anorganski pristop**: s kovinskim solmi v vodnih raztopinah (kloridi, oksokloridi, nitrati citrati); veliko ceneje in enostavneje vendar je reakcijo težje kontrolirati

# Sol-gel sinteza

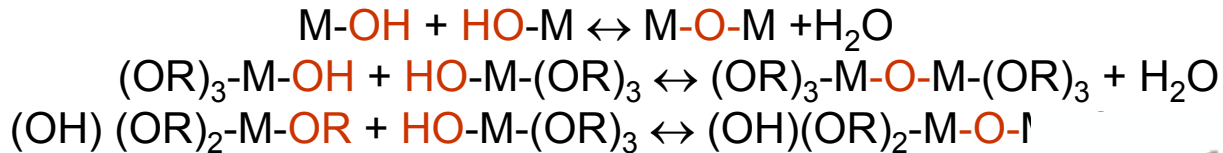
## Primer metalo-organske sol-gel sinteze

Produkt (gel) nastane s polimerizacijo in kondenzacijo kovinskih alkoxidov

### 1. hidroksilacija (hidroliza alkoxidnih skupin)



### 2. kondenzacija



Morfologija polimera je odvisna od števila funkcionalnih skupin na alkoxidnem monomeru

f=1; dimer, konec kondenzacija

f=2; verige ali obroči

**f>2, 3D prepredene verige, razvejanje**



# Sol-gel sinteza

## **Prednosti**

- visoka čistost produkta
- visok nivo homogenosti
- nizke sintezne temperature
- dobra kontrola poroznosti  
keramičnega produkta

## **Slabosti**

- visoki stroški
- dolgi časi sinteze
- hlapni reagenti
- skrčec, napetosti in fragmentacija  
produkta

## **Aplikacije**

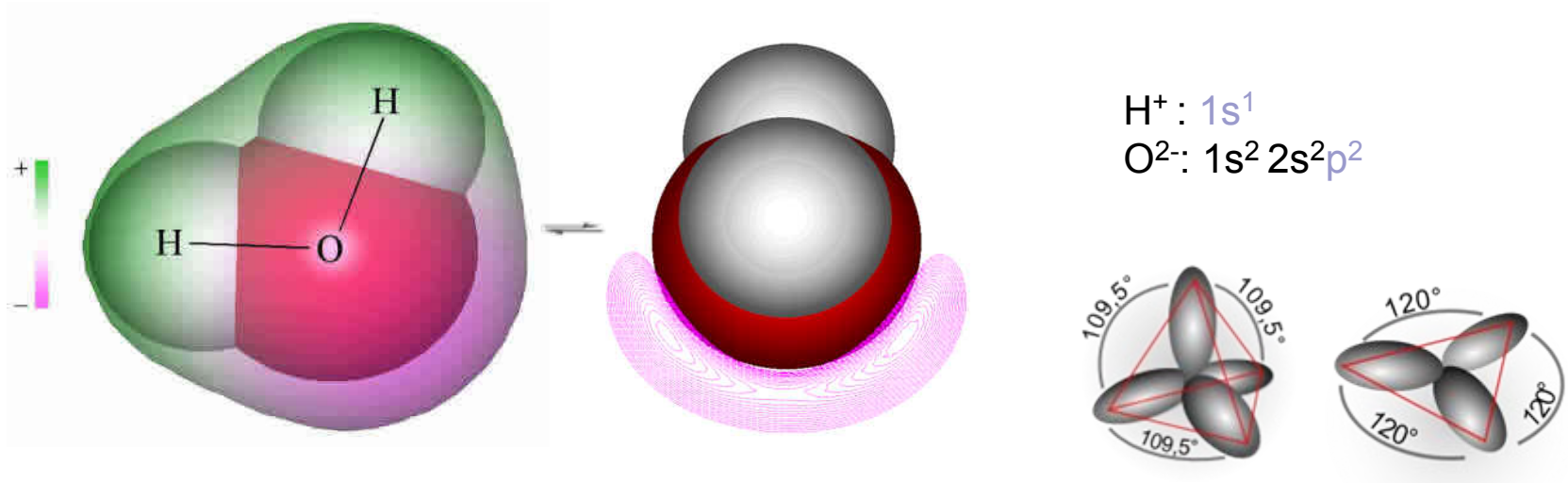
Stekla, transparentna keramika, vlakna, fini abrazivi, prevleke tanki filmi



# Hidrotermalna sinteza

Sinteza v avtoklavih iz vodnih raztopin pri povišani temperaturi in tlaku

Voda je pri teh pogojih zelo nevarna zato je potrebno natančno poznati njene lastnosti



## Disociacija vode



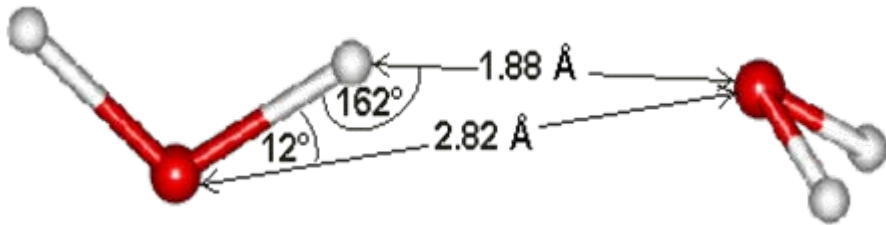
$$K_w = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-]$$

$$\text{pH} = -\log_{10}([\text{H}_3\text{O}^+])$$

$$K_w = 0.991 \times 10^{-14} \text{ mol}^2 \text{ l}^{-2} \text{ at } 25^\circ\text{C}$$

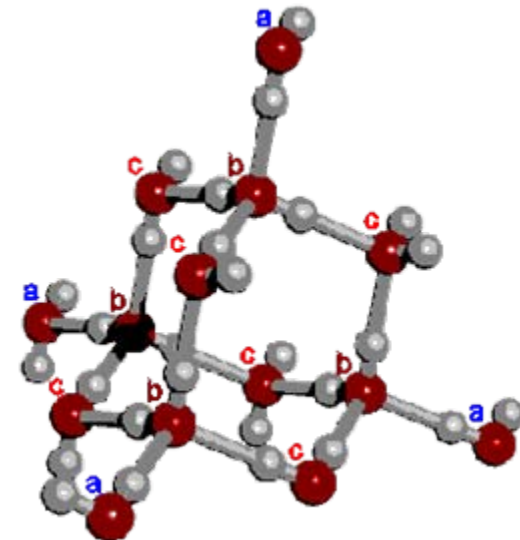
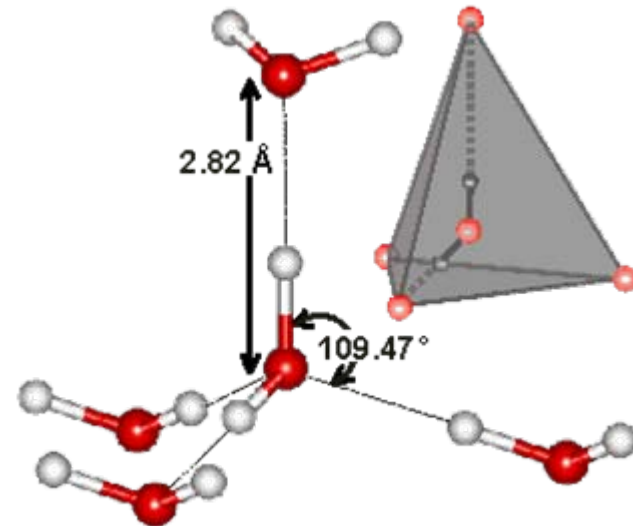
$$[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] = \sqrt{K_w} \quad \text{pH} = 7$$

# Hidrotermalna sinteza -vodikova vez v vodi

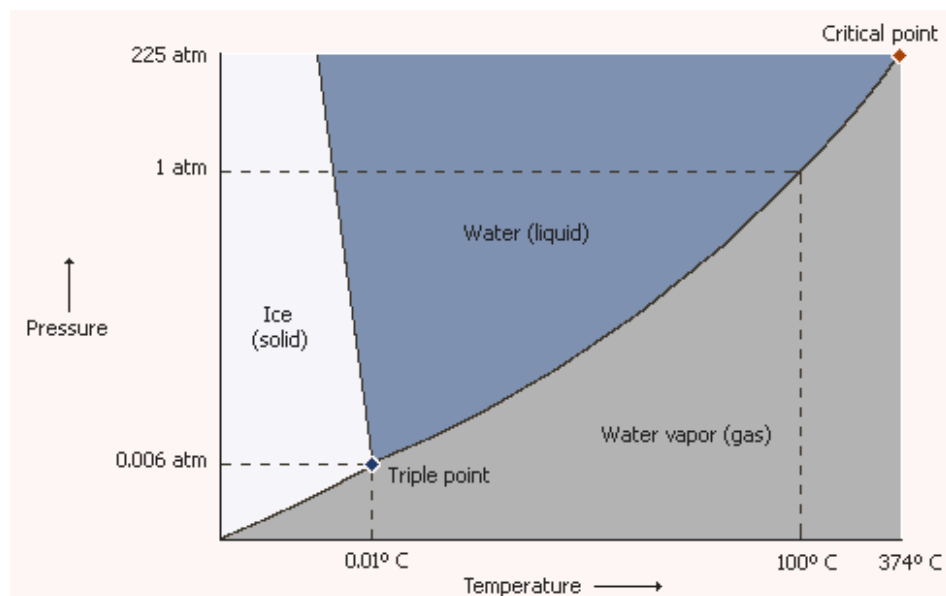


Vodikov atom je povezan z dvema atomoma kisika – z enim kovalentno in z drugim z vodikovo vezjo. To povzroča združevanje molekul vode v večje skupke. Pri 4°C je gostota skupkov večja kot gostota ledu.

Jakost vodikove vezi v vodi je pri sobni temperaturi 10x močnejša od termičnih fluktuacij



# Hidrotermalna sinteza – trojna točka



- Pri temperaturi višji od 647 K vode ne moremo več utekočiniti. Lastnosti tekoče faze se izenačijo z lastnostmi plina. To temperaturo imenujemo **kritična temperatura** in parni tlak pri tej temperaturi se imenuje kritični parni tlak.
- Pri kritični točki jakost interakcij v tekoči fazi pade na raven interakcij v plinski fazi.
- Zaradi jakosti in obsega vodikovih vezi v vodi je kritična točka pri visoki temperaturi. Veliko energije je potrebno za zmanjšanje molekularnih interakcij na ustrezno nizek nivo.
- Pri temperaturah višjih od kritične tlak skokovito naraste

# Hidrotermalna sinteza

Lastnosti vode v bližini  $T_c$  se dramatično spremenijo:

gostota, viskoznost, ionska mobilnost, ravnotežne konstante disociacije, hidroliza in formacija kompleksov, topnost plinov in trdnih snovi

## **Hidrotermalne metode**

- precipitacija
- kristalizacija
- razkroj
- oksidacija
- sinteza
- etc..

## **Karakteristike hidrotermalne sinteze:**

- fine delci ( $<1\mu\text{m}$ ) ali monokristali
- nič oziroma šibka aglomeracija
- dobra kristaliničnost
- dobra homogenost
- neporozni produkt
- ozka porazdelitev velikosti delcev
- sinteza nizkotemperaturnih in metastabilnih faz
- sinteza faz z visokim parnim tlakom

# Hidrotermalna sinteza - primer

## 1. Raztapljanje



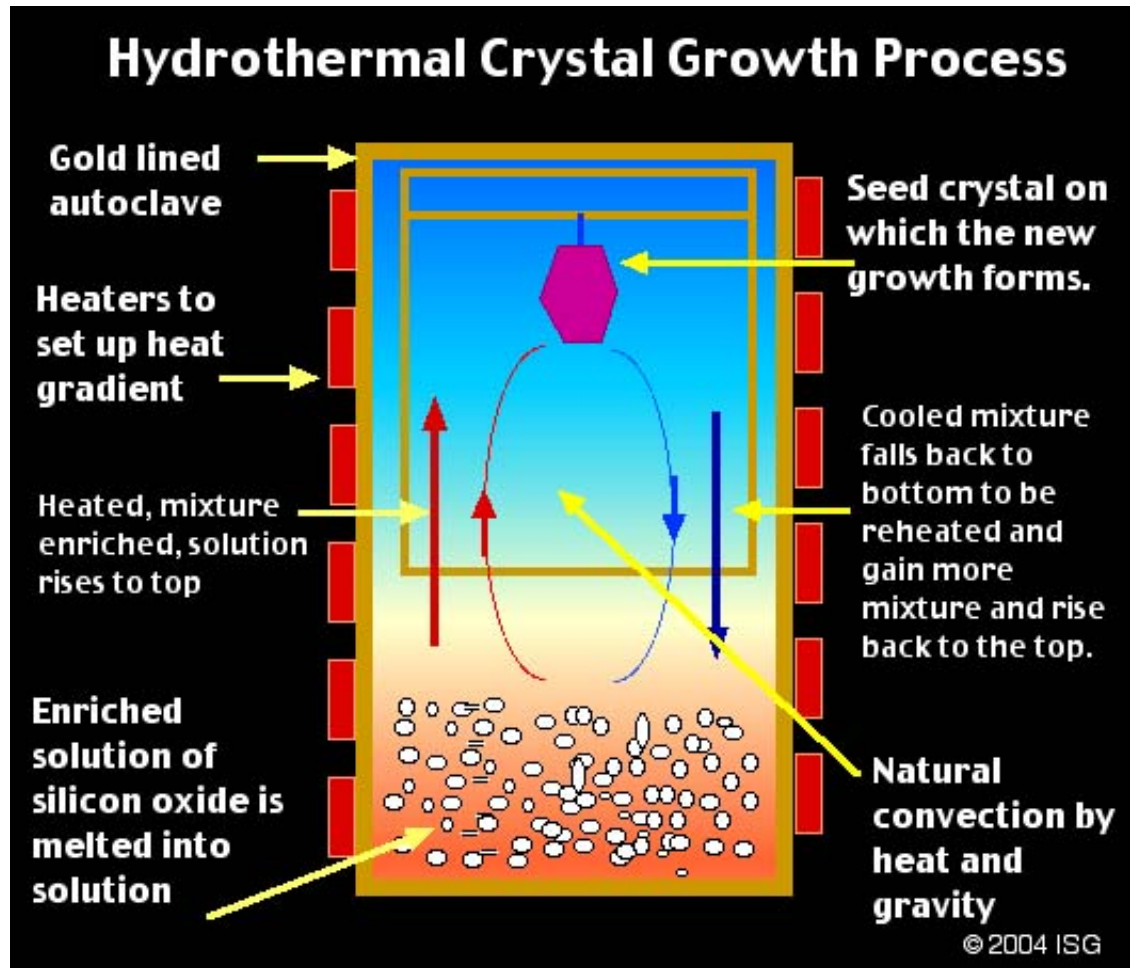
## 2. Končna reakcija v avtoklavu



Vmesni produkti

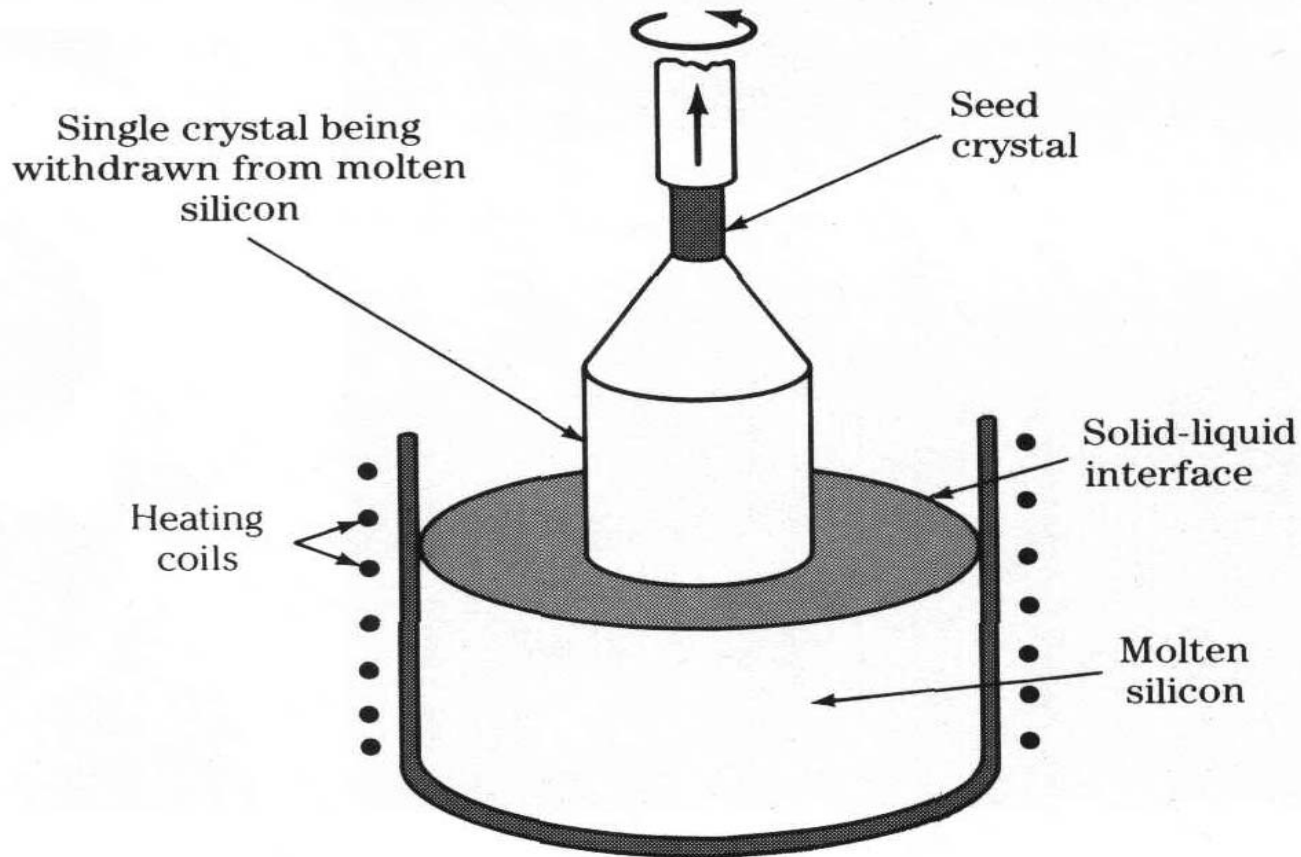


# Hidrotermalno gojenje monokristalov



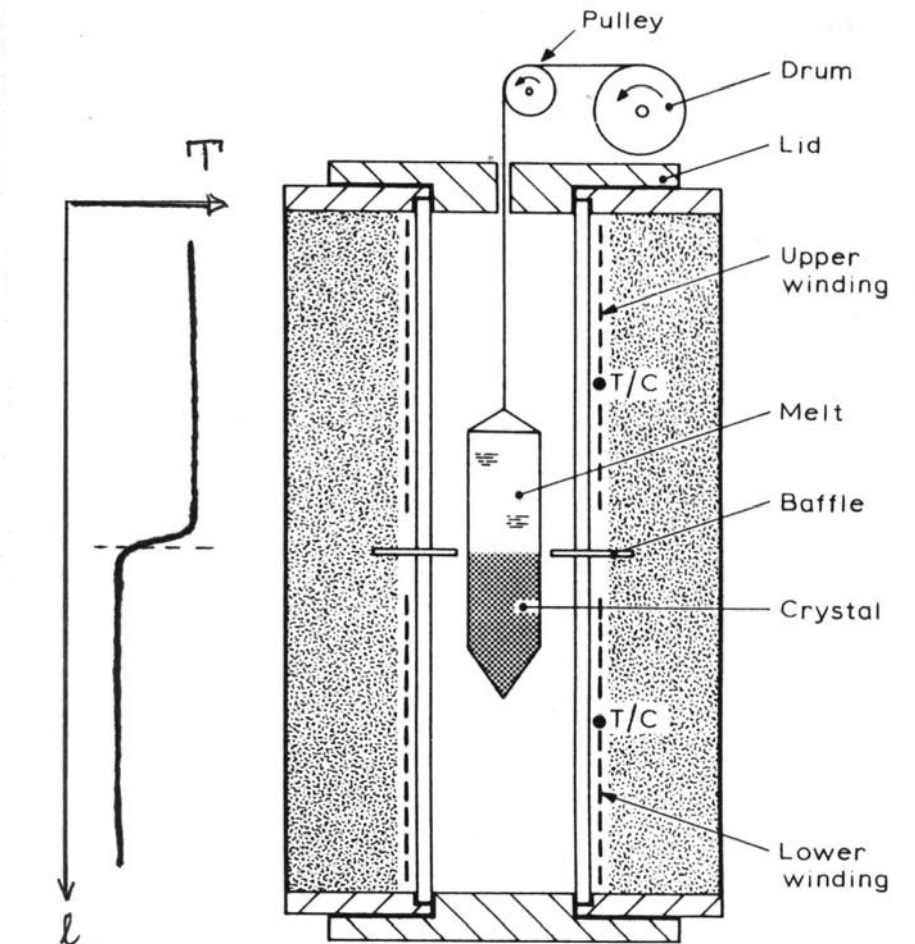
# Gojenje monokristalov - Czochralski

Vrtečo so kristalno kal počasi dvigamo iz taline z ustrezno sestavo



# Gojenje monokristalov - Bridgman

Posodo s talino počasi spuščamo skozi temperaturni gradient







# Sodobni materiali

## Fazna ravnotežja

# Definicija pojmov

**Komponenta** – izhodiščna spojina/kovina/ iz katere pridobimo fazo

**Faza** – omejeno področje materialnega sistema, znotraj katerega so sestava, struktura, kemijske in fizikalne lastnosti povsem enake

**Ravnotežno stanje** – Ko se kemijske in fizikalne lastnosti v izbranem volumnu časovno neodvisne. Pri določenih pogojih je prosta energija sistema je minimalna

**Fazni prehod** – ko pride pri spreminjanju pogojev do nezveznih sprememb lastnosti dane faze (prvotna faza se je spremenila v drugo)

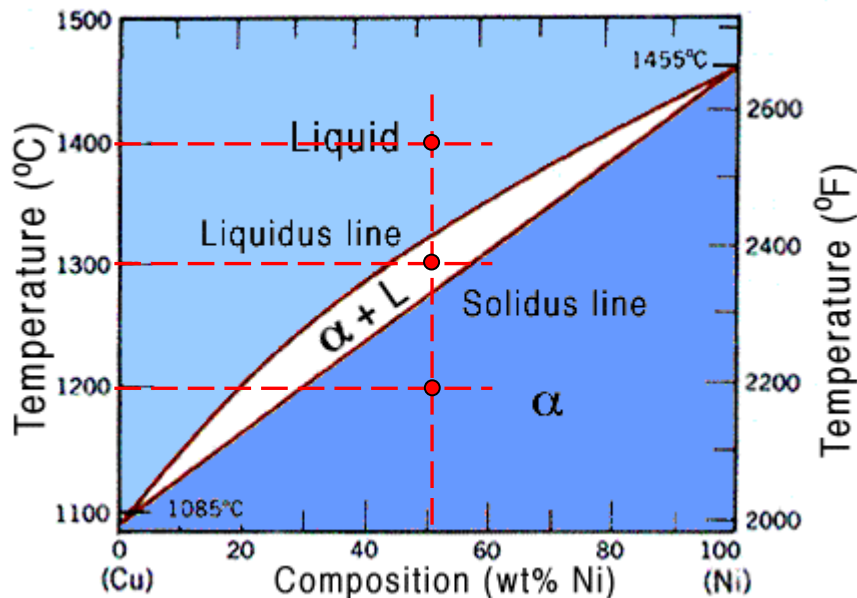
**Trdna topnost, meja trdne topnost** – maksimalna koncentracija dopanta, ki se lahko raztopi v kristalni strukturi

**Fazni diagram** – diagram, ki podaja fazne prehode, kot funkcijo različnih spremenljivk (velja za ravnotežno stanje)

**Mikrostruktura** – strukturno zlaganje kristalitev oziroma amorfnih faz na mezoskopskem nivoju (večjem od kristalne strukture)

# Binarni sistemi – sistemi z dvema komponentama

Sistem s popolno trdno topnostjo (npr. Cu-Ni)



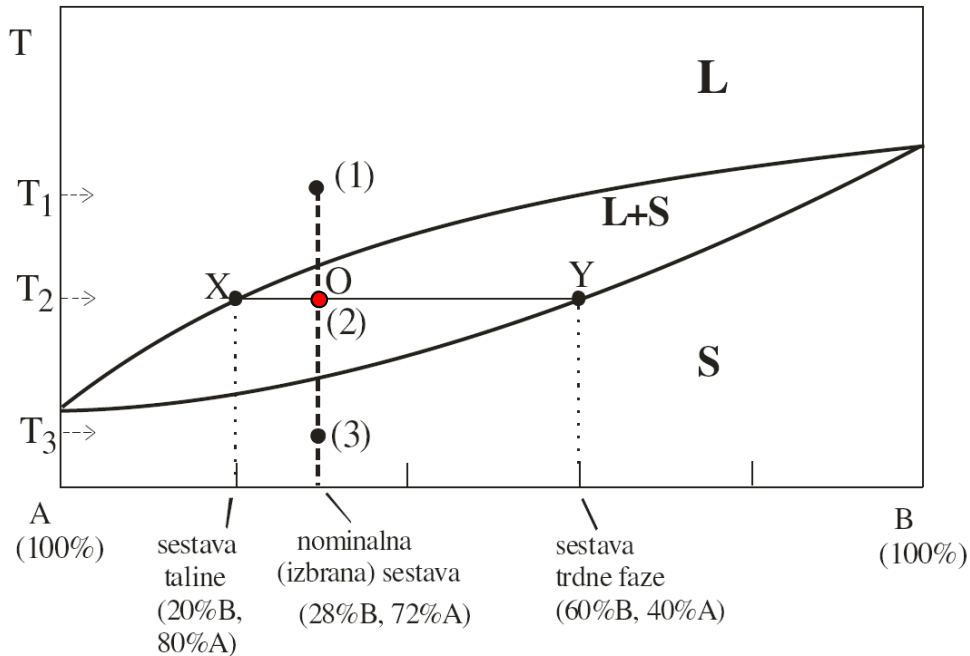
*Področje α (temno modro) – homogena trdna raztopina*

*Področje L + α (belo) – dvofazno področje (trdna in tekoča raztopina)*

*Področje L (svetlo modro) - homogena tekoča raztopina Cu in Ni*

**Identifikacija faz pri danih pogojih:** Lociramo točko, ki odgovarja dani temperaturi in sestavi ter identificiramo fazno polje

# Binarni sistemi – kvantitativna obravnava

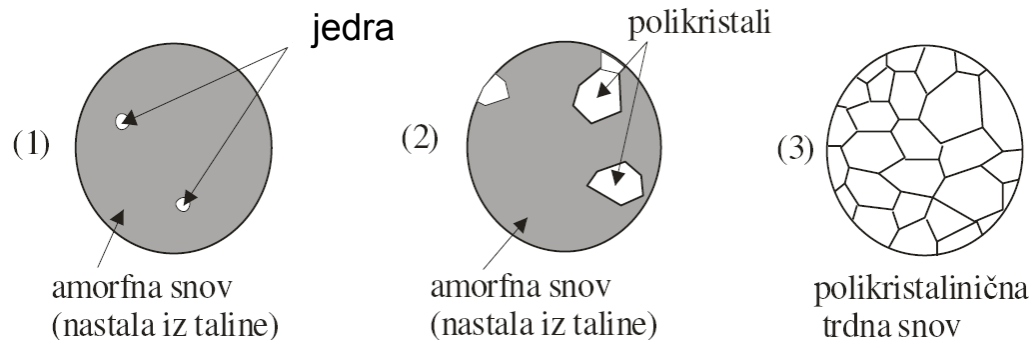


Pravilo vzvoda:

$$m_{tek} \overline{OX} = m_{trd} \overline{OY}$$

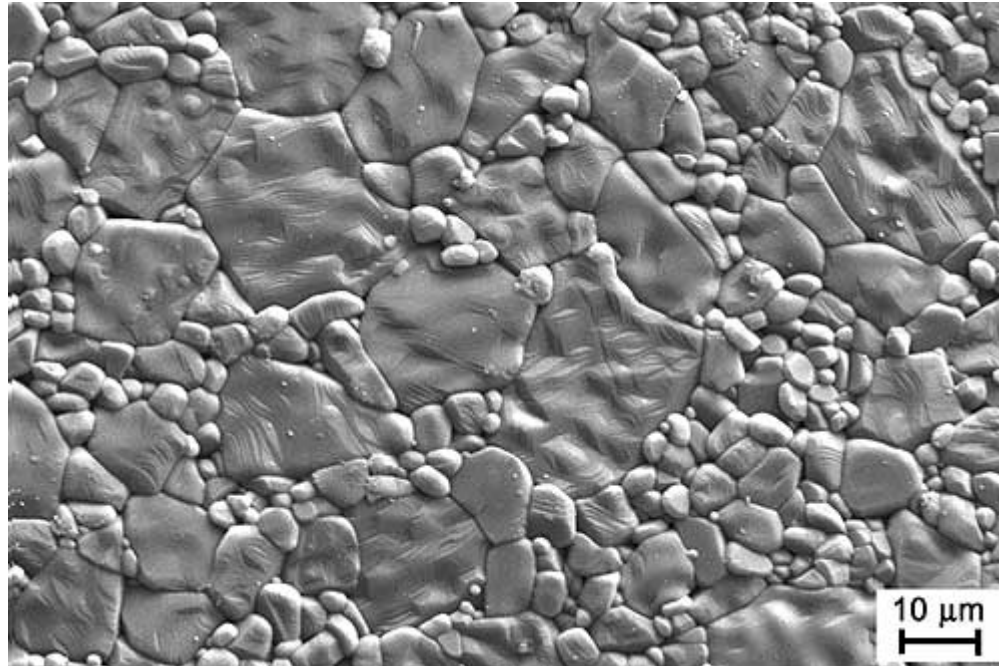
$$\frac{m_{trd}}{m_{tot}} = \frac{\overline{OX}}{\overline{XY}} \quad \frac{m_{tek}}{m_{tot}} = \frac{\overline{OY}}{\overline{XY}}$$

V konkretnem primeru je masni delež tekočine  
 $(60-28)/(60-20) = 0.80$  (80%)



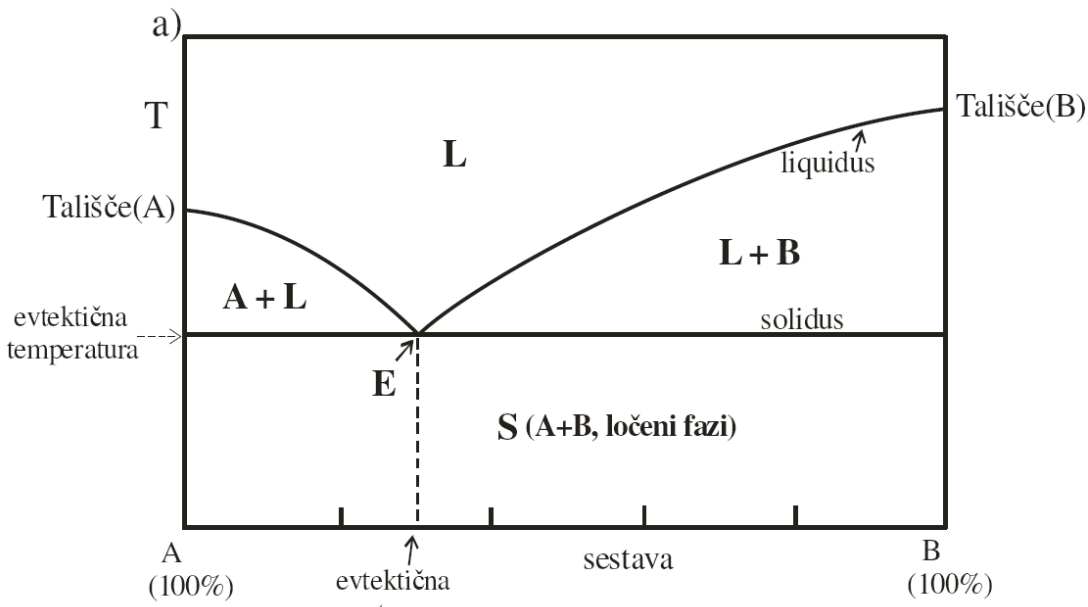
Razvoj mikrostrukture pri ohlajanju

# Binarni sistemi – kvantitativna obravnava

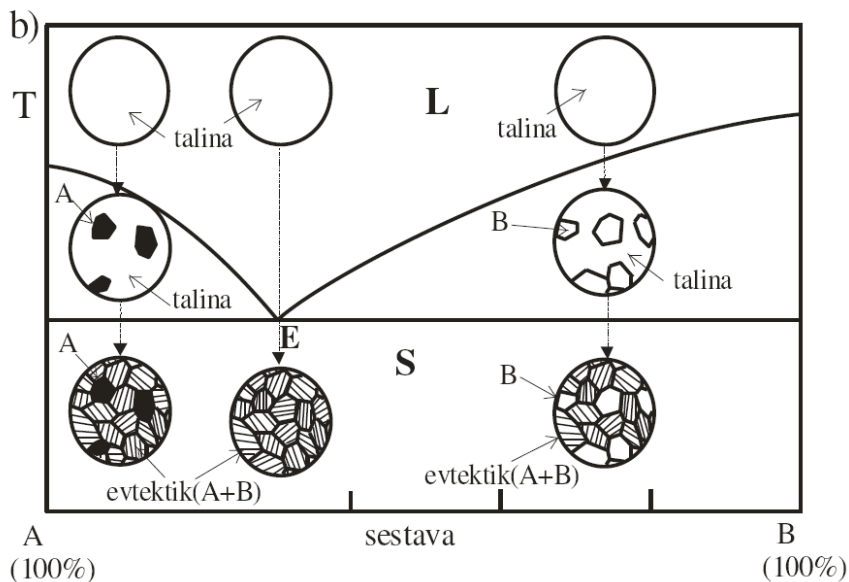


Enofazna, sintrana Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> keramika

# Binarni sistemi – popolna netopnost

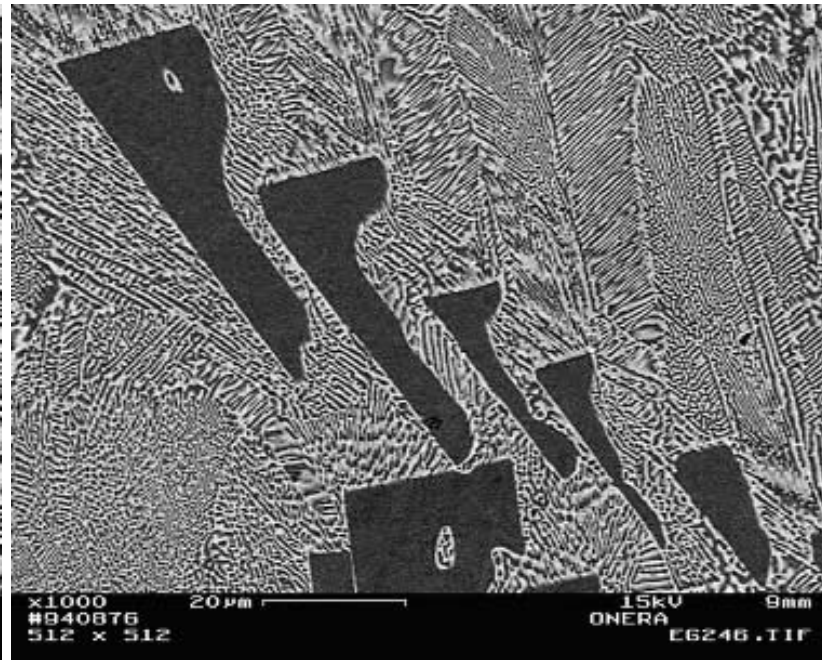
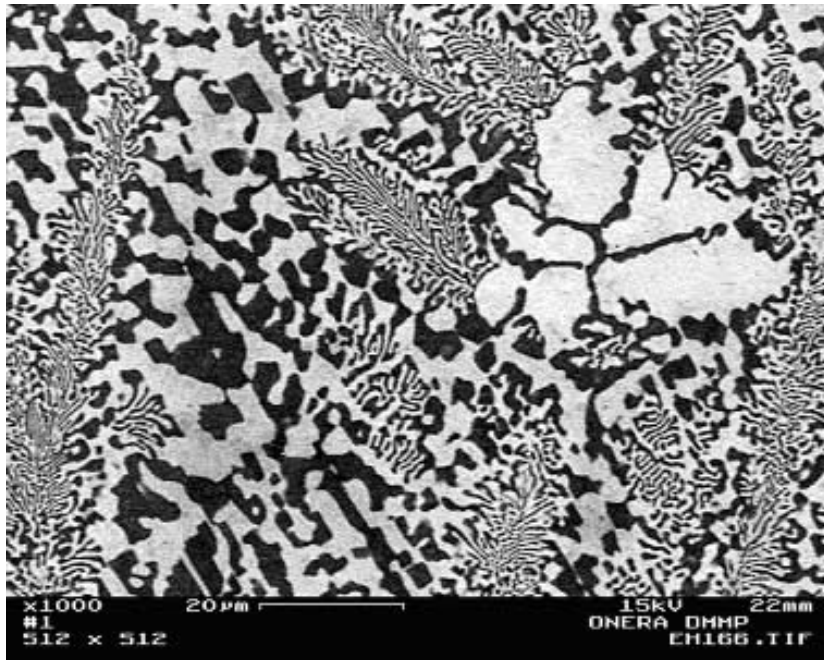


- Solidus je povsem ravna
- Likvidus se dotika solidus v evtektični točki
- Evtektična točka ima povsem določeno evtektično sestavo in evtektično temperaturo
- Evtektična temperatura je nižja od tališča komponent



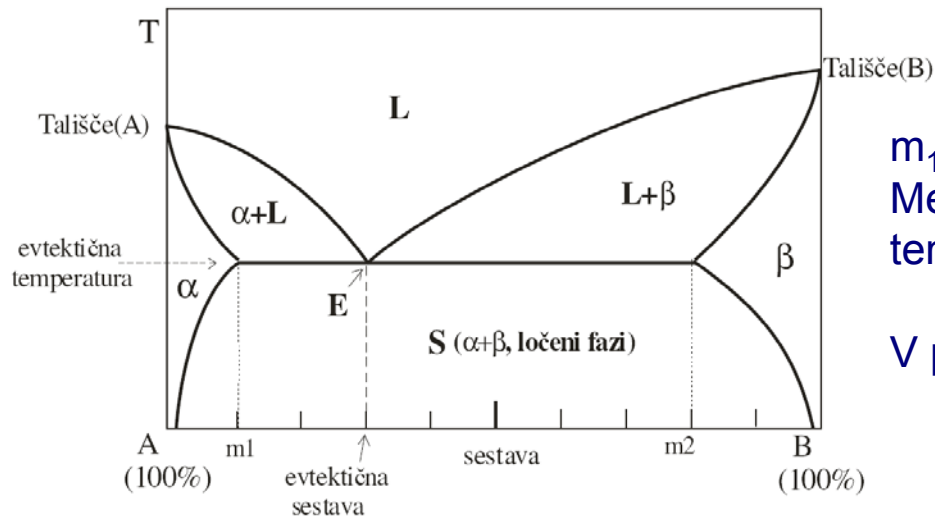
V tekočini sta komponenti pomešani na atomarnem nivoju in pri strjevanju je difuzija prepočasna, da bi se povsem ločili. V zrnu obstajajo izmenjujoče se tanke plasti obeh komponent

# Binarni sistemi – popolna netopnost



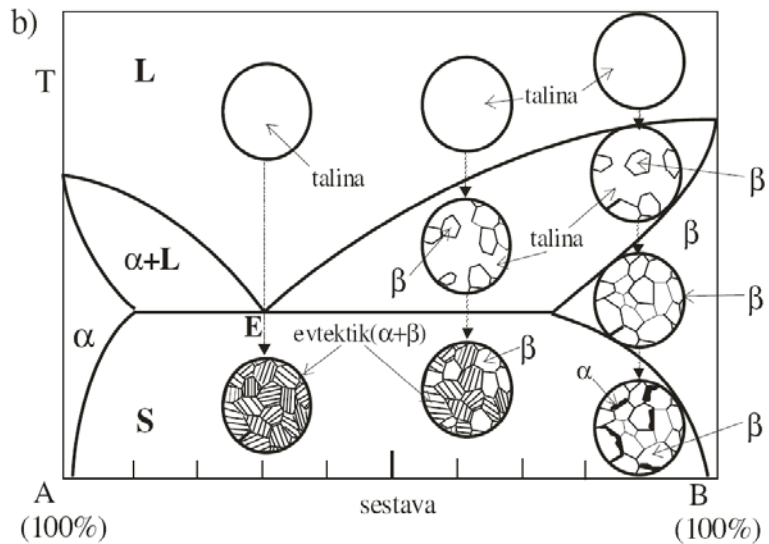
Evtektična mikrostruktura niobij silikatne zlitine (Nb je svetla faza, Si je temna)

# Binarni sistemi – delna topnost



$m_1, m_2 \dots$  meja trdne topnosti  
 Meja trdne topnosti se viša do evtektične temperature.

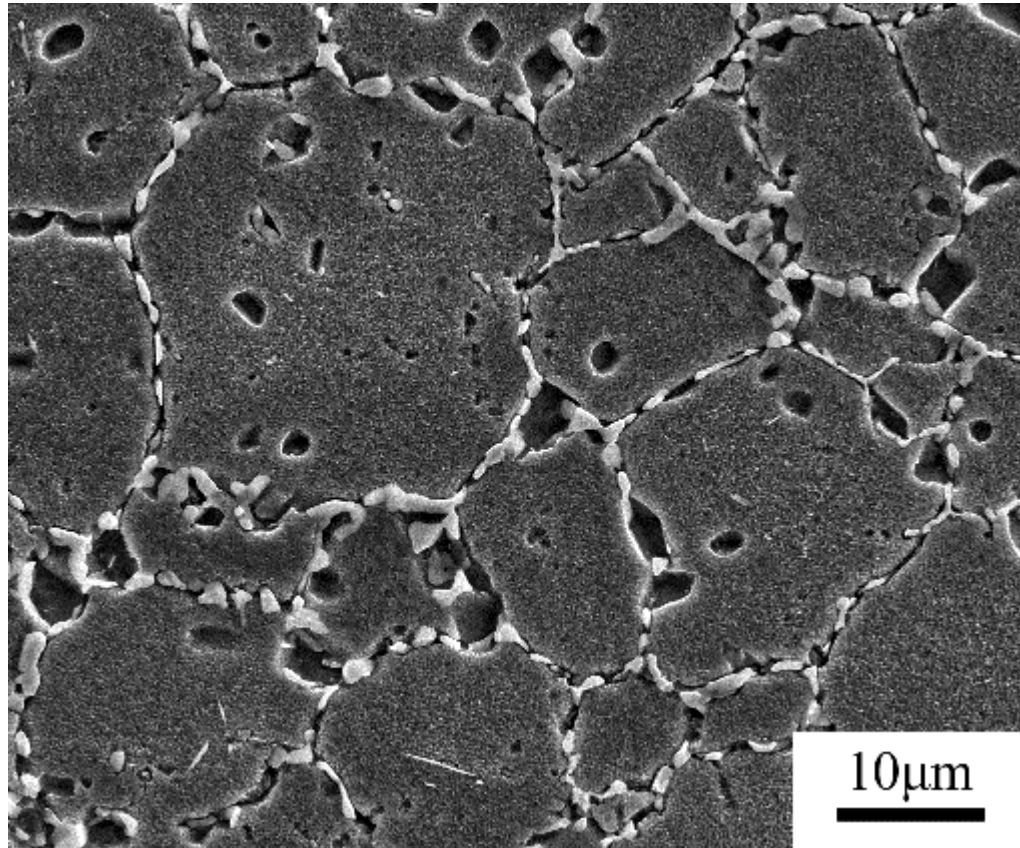
V polju S soobstojata obe trdne raztopini



Iz enofaznega sistema  $\beta$  se z difuzijo v trdnem na mejah izloči faza  $\alpha$

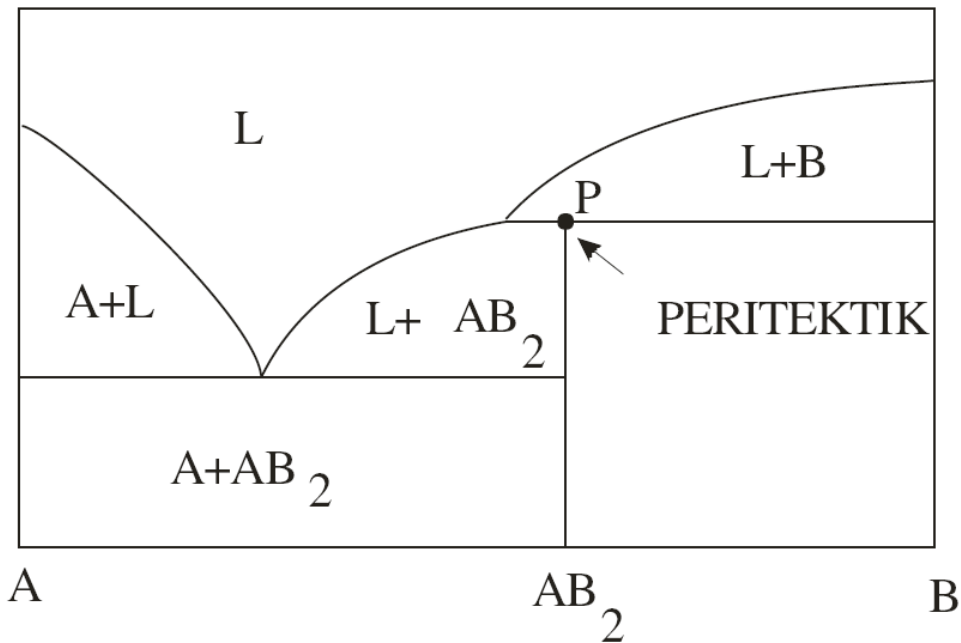


# Binarni sistemi – delna topnost



Nikljeve zlitine – izločanje sigma faze

# Binarni sistemi – z novo binarno spojino



Točka P se imenuje peritektik. Pri tej temperaturi se spojina **inkongruentno tali** – razpade na talino in trdno fazo s spremenjeno sestavo

**kongruentno taljenje** – spojina se stali v celoti in talina ima sestavo spojine

# Gibbsovo fazno pravilo

Gibbsovo fazno pravilo je osnovno pravilo pri konstrukciji faznih diagramov. Pove koliko faz lahko soobstoja pri določenih pogojih (konst. tlak in temp.)

$$P + F = C + N$$

P...število faz

F ... število prostostnih stopenj

C...število komponent

N...število nematerialnih spremenljivk

Za binarni sistem:  $F=1, C=2, N=1 \rightarrow P+1=2+1 \rightarrow P=2$

( $F=1$  ker j temp. in tlak. konstanten in je samo sestava prosta)

V binarnem sistemu lahko pri določenih pogojih v ravnotežju soobstoja največ dve fazi!!!

Za ternarni sistem:  $F=1, C=3, N=0 \rightarrow P+1=3+1 \rightarrow P=3$

V binarnem sistemu lahko pri določenih pogojih v ravnotežju soobstajajo največ tri faze!!!