

# Fázisátalakulások

T, P, C változása  $\Rightarrow$  új (egyensúlyi) állapot

Új fázis(ok): stabil, metastabil

**Fázisátalakulás:** folyamat, amelynek során a régi fázis(ok)ból új, más szerkezetű (rács, szövet) vagy halmazállapotú fázis(ok) keletkeznek.

## Fázisátalakulások

- Kristályosodás, megolvadás (*halmazállapot változás*)

- Szilárd állapotban végbemenő fázisátalakulások

*allotrop átalakulás, újrakristályosodás, szegregáció, ...*

*diffúziós (egyedi atomi mozgás)*

*martenzites (kollektív atomi mozgás, diffúzió nélkül)*

# Fázisátalakulások termodinamikai hajtóereje

**Pl: Színfémek kristályosodása**

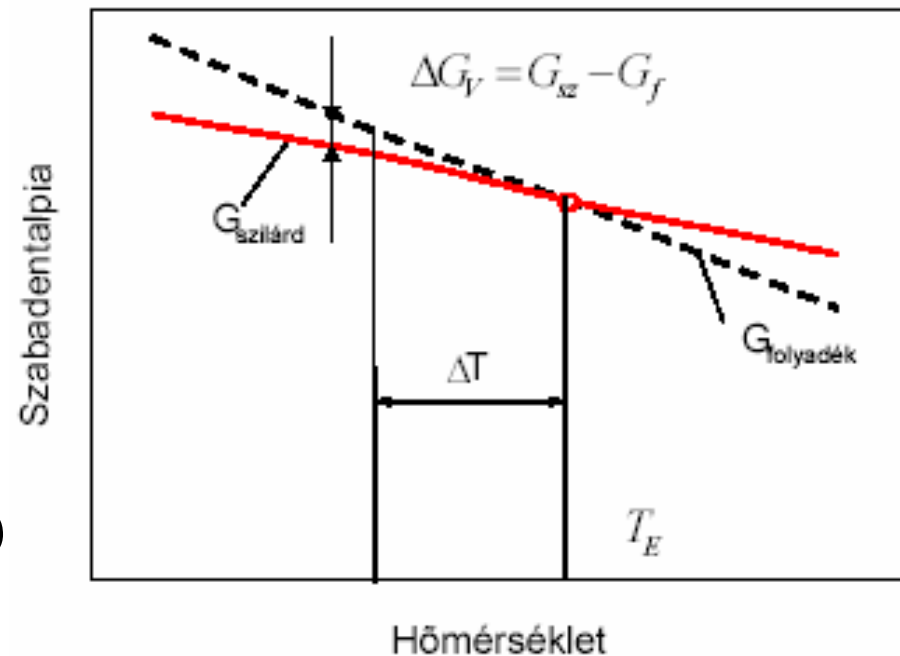
$$F = U - TS$$

Hajtóerő:  $\Delta F$

Olvadás/dermedés pont  $\Delta F=0$

$\Rightarrow \Delta T$  (túlhűtés)

$$S_z = K - F + 1 = 1 - 2 + 1 = 0 \text{ (nonvariáns)}$$



# Diffúziós fázisátalakulások kinetikája

## Fázisátalakulás (kristályosodás):

1. Csíráképződés, nukleáció (homogén, heterogén)
2. Kristályok növekedése  
Jelentős anyagtranszport (diffúzió)

## Homogén csíráképződés (nukleáció)

Csíra: gömb ( $r$ )

$\Delta F_V$ : szabadenergia csökkenés (térfogategységenként)

$\gamma$ : határréteg szabadenergiája (felületegységenként)

$$\delta F = -\frac{4\pi}{3} r^3 \Delta F_V + 4\pi r^2 \gamma$$

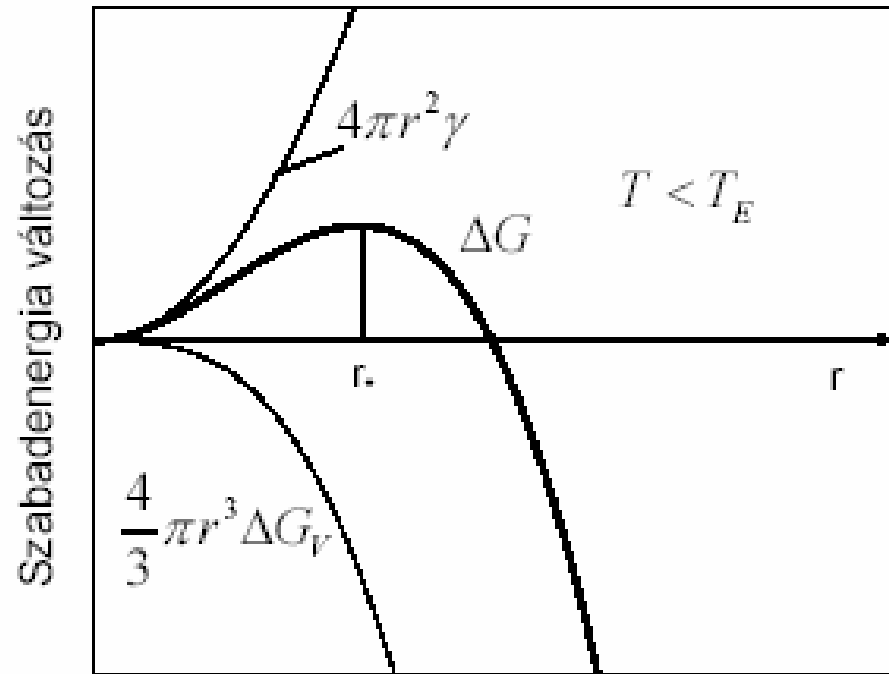
$$\frac{\delta F}{dr} = -4\pi r^2 \Delta F_V + 8\pi r \gamma$$

$$r^* = \frac{2\gamma}{\Delta F_V} \quad \text{Kritikus csíraméret}$$

Stabil, instabil

$$r^* = \frac{2\gamma T_E}{L\Delta T}$$

$$\delta F^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3L^2} \left( \frac{T_E}{\Delta T} \right)^2 \quad \text{Aktiválási energia}$$



$$T = T_E$$

$$F_\alpha = U_\alpha - T_E S_\alpha = U_\beta - T_E S_\beta = F_\beta$$

$$S_\alpha - S_\beta = \frac{U_\alpha - U_\beta}{T_E} = \frac{L}{T_E}$$

$$L = U_\alpha - U_\beta$$

$$T \neq T_E$$

$$\Delta F_V = F_\alpha - F_\beta = U_\alpha - U_\beta - T(S_\alpha - S_\beta)$$

$$\Delta F_V = L - T(S_\alpha - S_\beta)$$

$$\Delta F_V = L - \frac{TL}{T_E} = L \left( 1 - \frac{T}{T_E} \right) = L \left( \frac{T_E - T}{T_E} \right) = L \frac{\Delta T}{T_E}$$

$$r^* = \frac{2\gamma T_E}{L\Delta T}$$

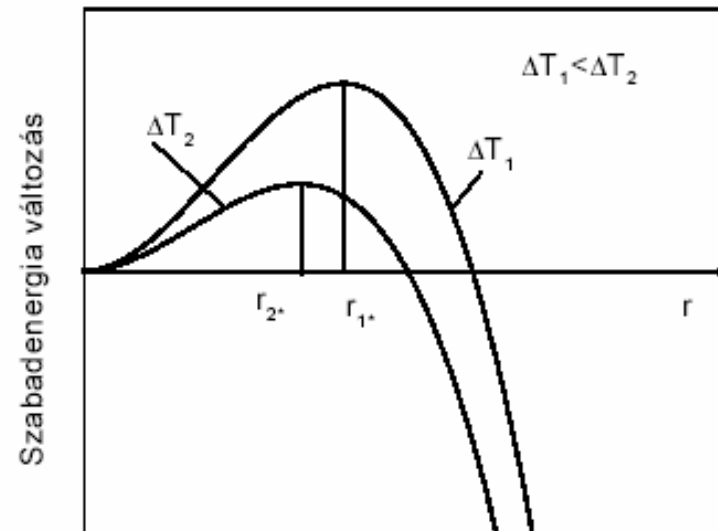
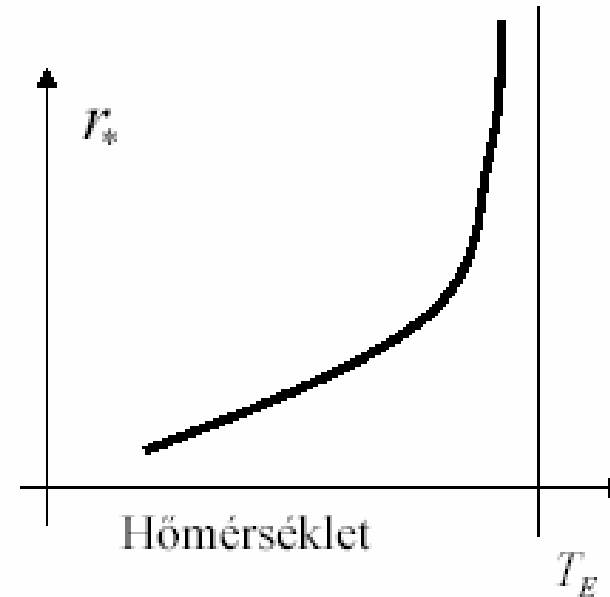
$$\delta F^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3L^2} \left( \frac{T_E}{\Delta T} \right)^2$$

$$\Delta T \rightarrow 0 \Rightarrow r^* \rightarrow \infty$$

$$\Delta T \rightarrow 0 \Rightarrow \delta F^* \rightarrow \infty$$

**Túlhűtés nélkül nem lehetséges fázisátalakulás.**

Lehülési görbe (10-15%)



# Diffúziós fázisátalakulási (kristályosodási) folyamat időbeli lefolyása

Mag keletkezési gyakoriság (kristályosodási képesség, nukleációs ráta)

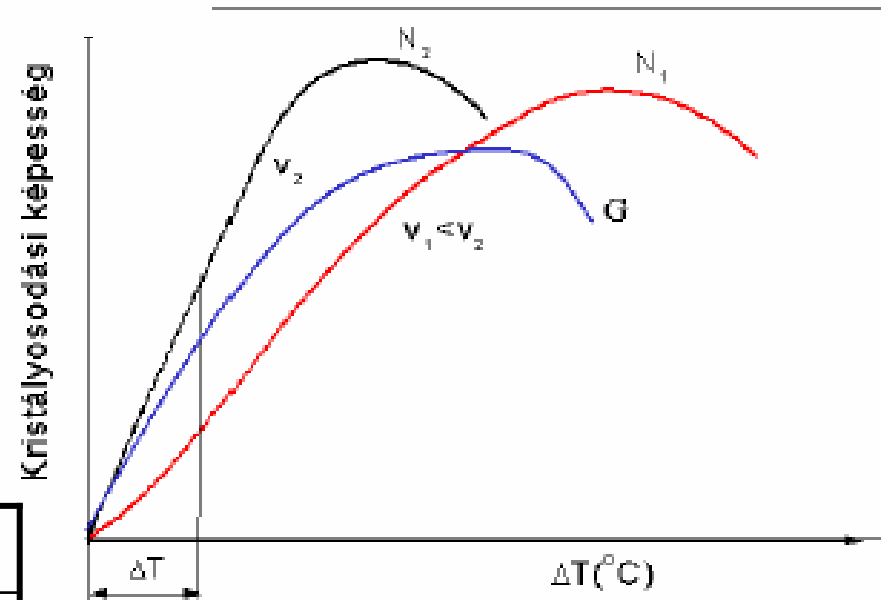
$$N = \frac{\text{keletkezett magok száma}}{\text{térfogat} \cdot \text{idő}} \left[ \text{mm}^{-3} \text{s}^{-1} \right]$$

Magok növekedési sebessége

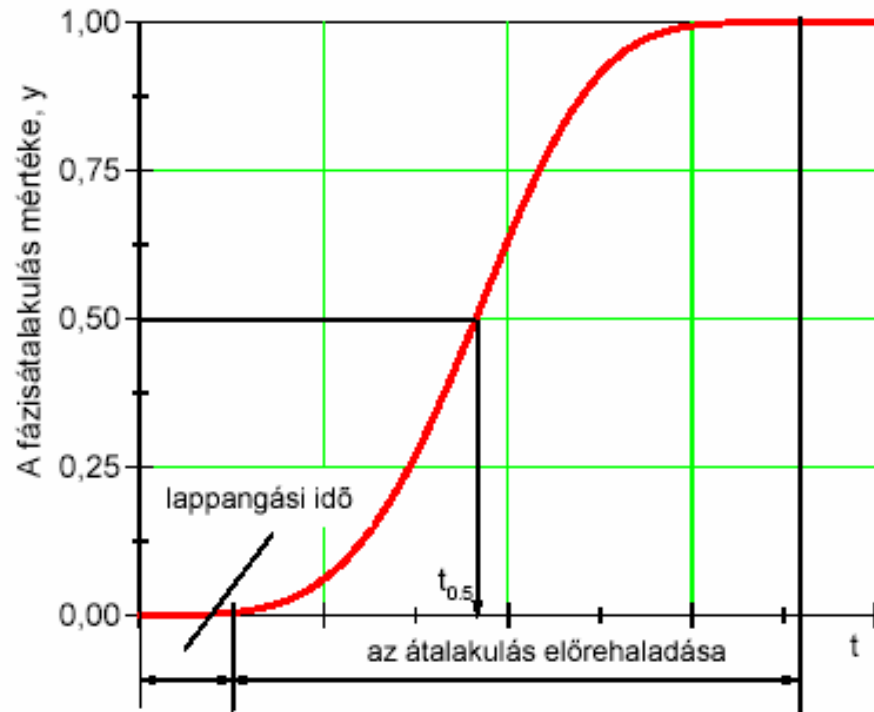
$$G = \frac{\Delta D}{\Delta t} \left[ \text{mm s}^{-1} \right]$$

Szemcseméret (N, G)

	N kicsi	N nagy
G kicsi		Finom szemcsék
G nagy	Nagy szemcsék	



## Átalakult fázis mennyisége: szigmoid görbe



lappangási, inkubációs idő

$$y = 1 - \exp(-kt^n)$$

Avrami - egyenlet

Átalakulás sebessége:

$$r = \frac{1}{t_{0,5}}$$

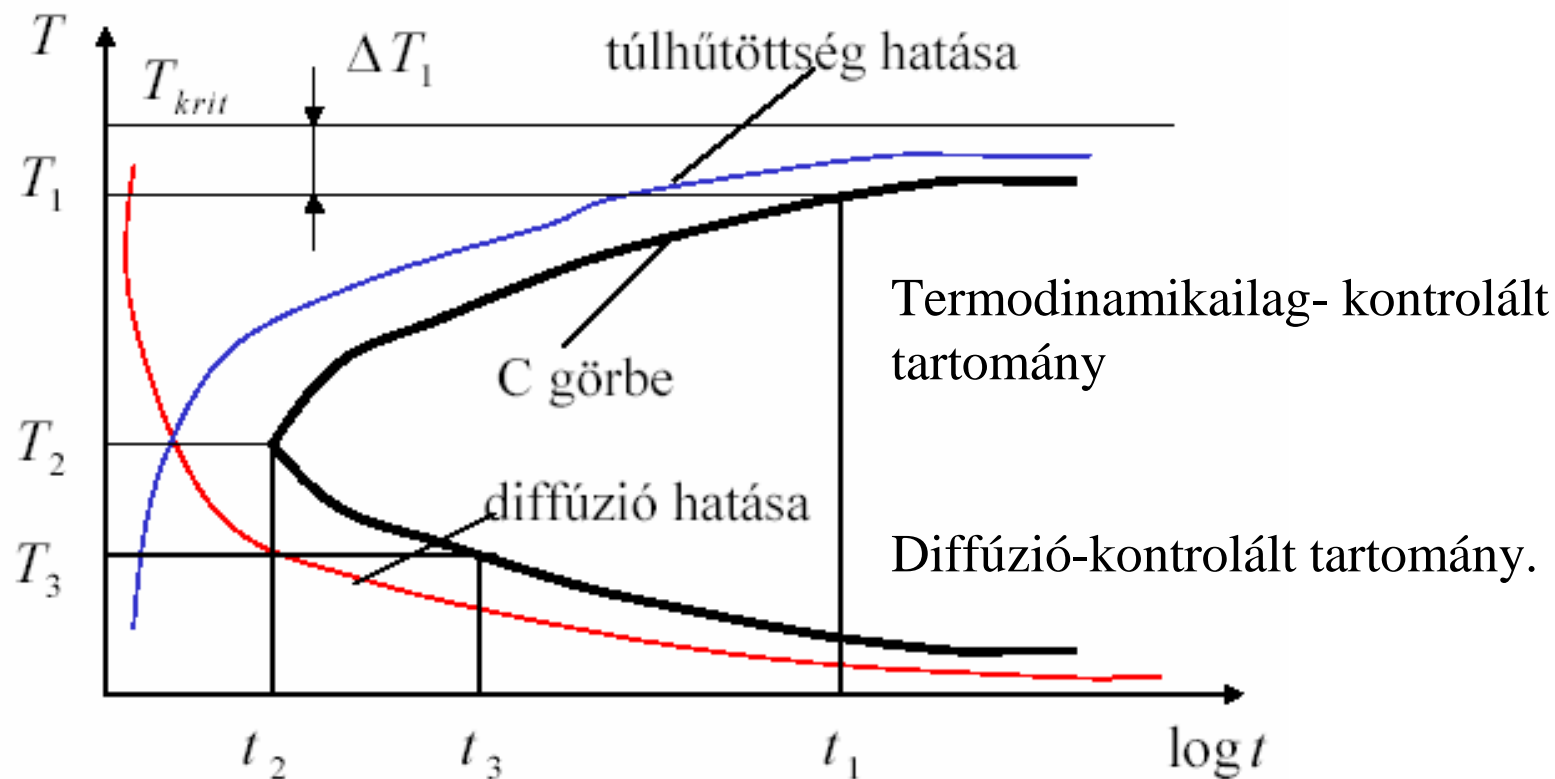
$$r = A \cdot \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$$



# Izotermikus átalakulási diagramok

## Time - Temperature - Transformation (TTT)

Gyors hűtés, hőntartás: átalakulás kezdete, befejeződése.

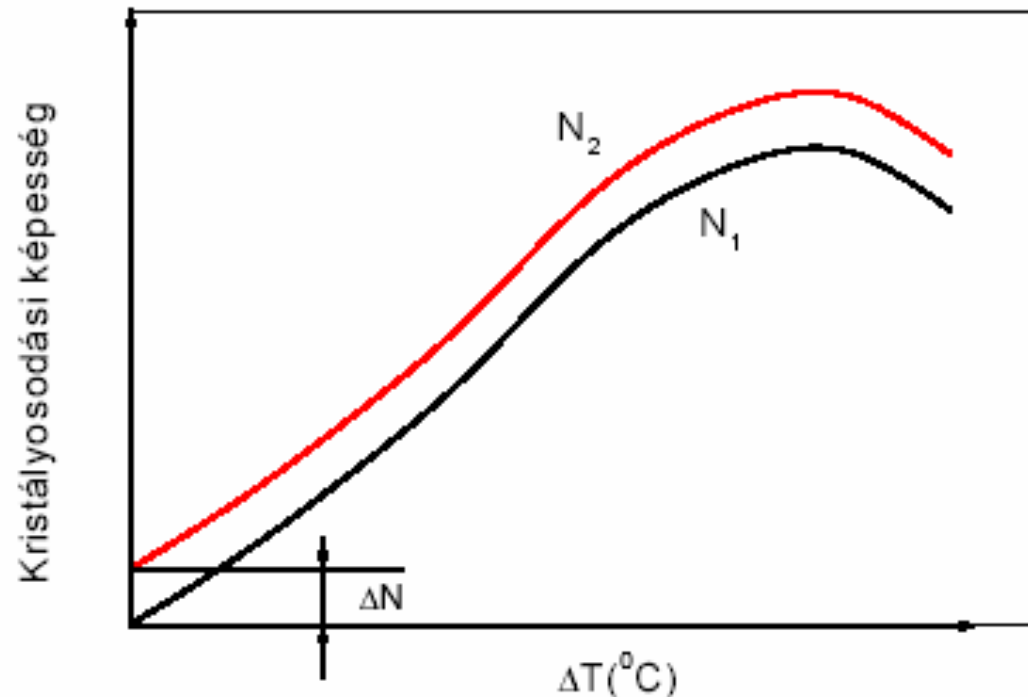


# Heterogén magképződés

Csíráképződési valószínűség inhomogén a térfogatban.

Idegen kristálycsírák. Additív hatás. Ötvözet beoltása.

Túlhűtés mértéke kisebb.



# Szemcseméret hatása a mechanikai tulajdonságokra

## Folyáshatár

Hall-Petch egyenlet

$R_e$ : polikristályos folyáshatár

$R_0$ : egykristályos folyáshatár

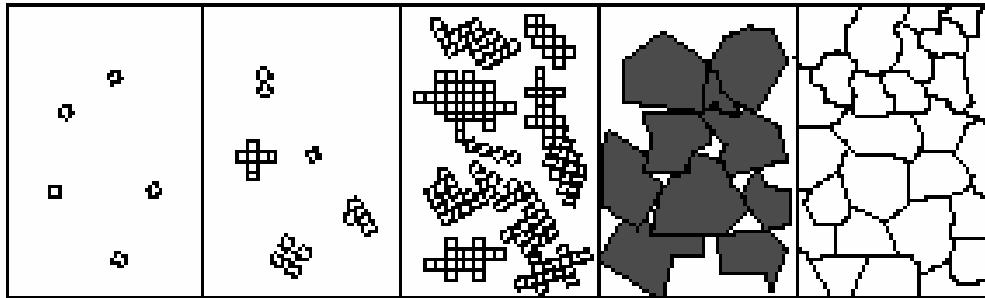
$d$ : szemcseméret

$$R_e = R_0 + kd^{-\frac{1}{2}}$$

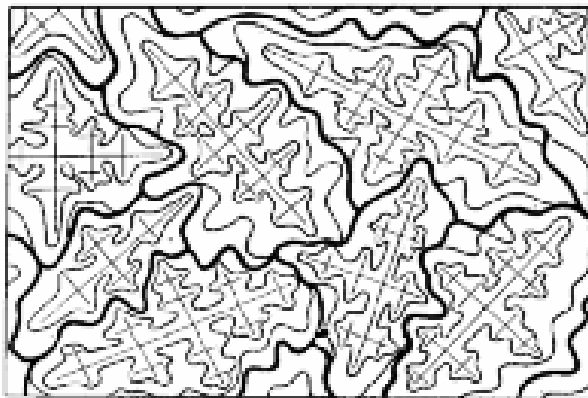
## Kifáradási tulajdonságok

## Alakíthatóság

# Kristályosodási mechanizmusok és formák

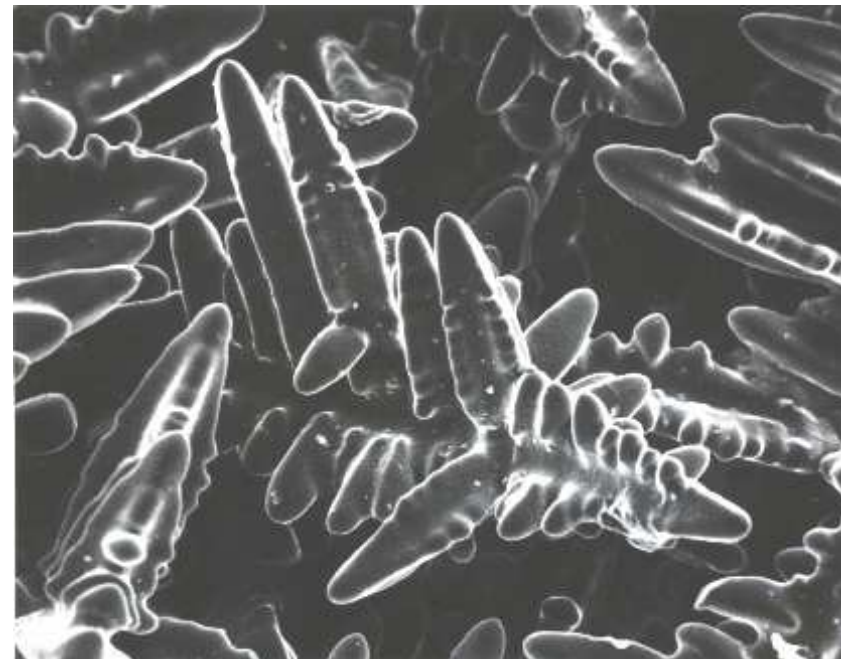


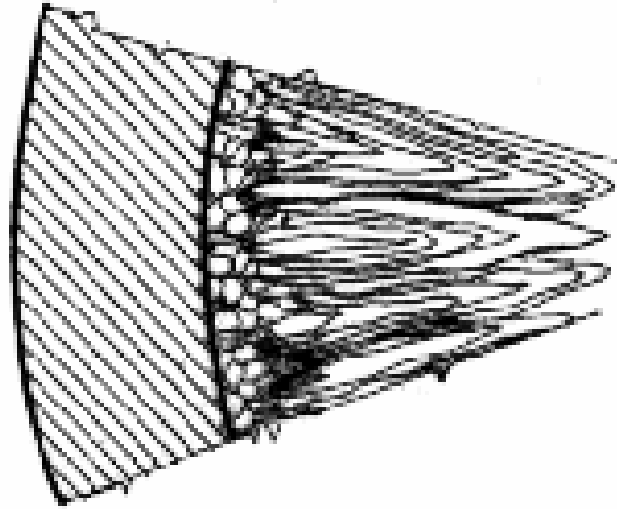
Poliéderez  
kristályosodás



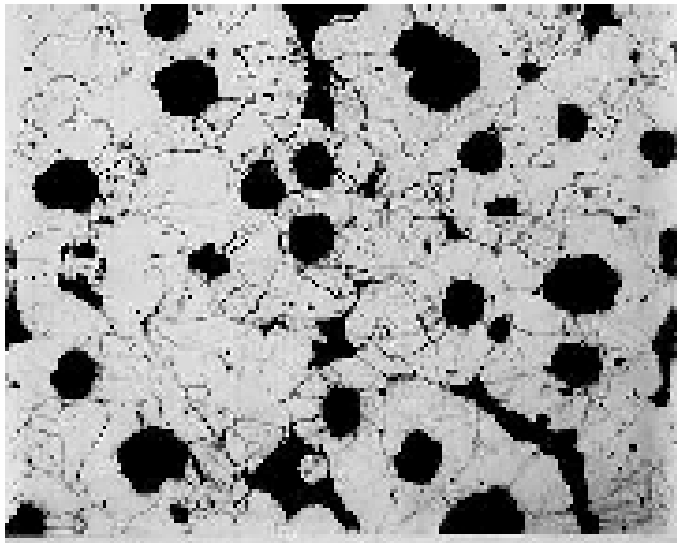
Dendrites kristályosodás

Dendron





Sugaras (oszlopos dendrites)  
alakanizotrópia



Szferolitos  
sphero - litos  
Magnézium, cérium  
(gömbgrafitos öntvény)

# Allotrópia, polimorfizmus

Egyensúlyi rács típus (T, P)

allotróp átalakulás, allotróp módosulat

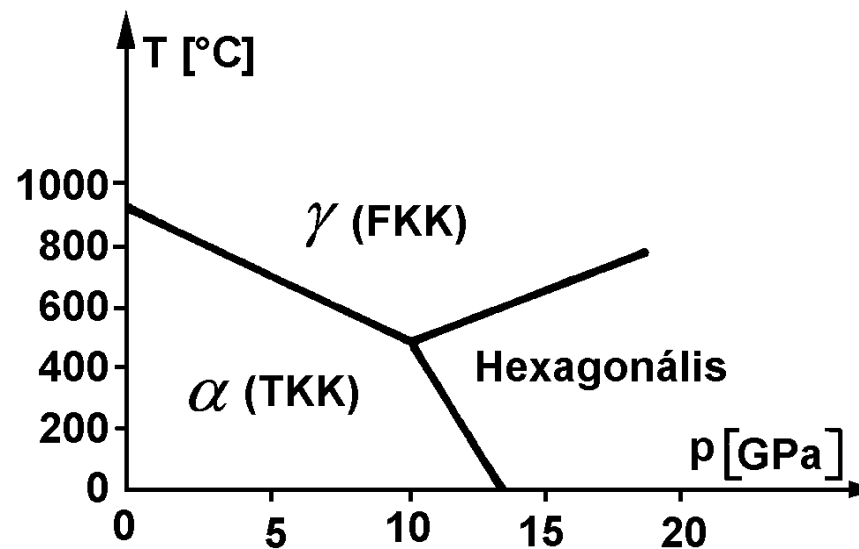
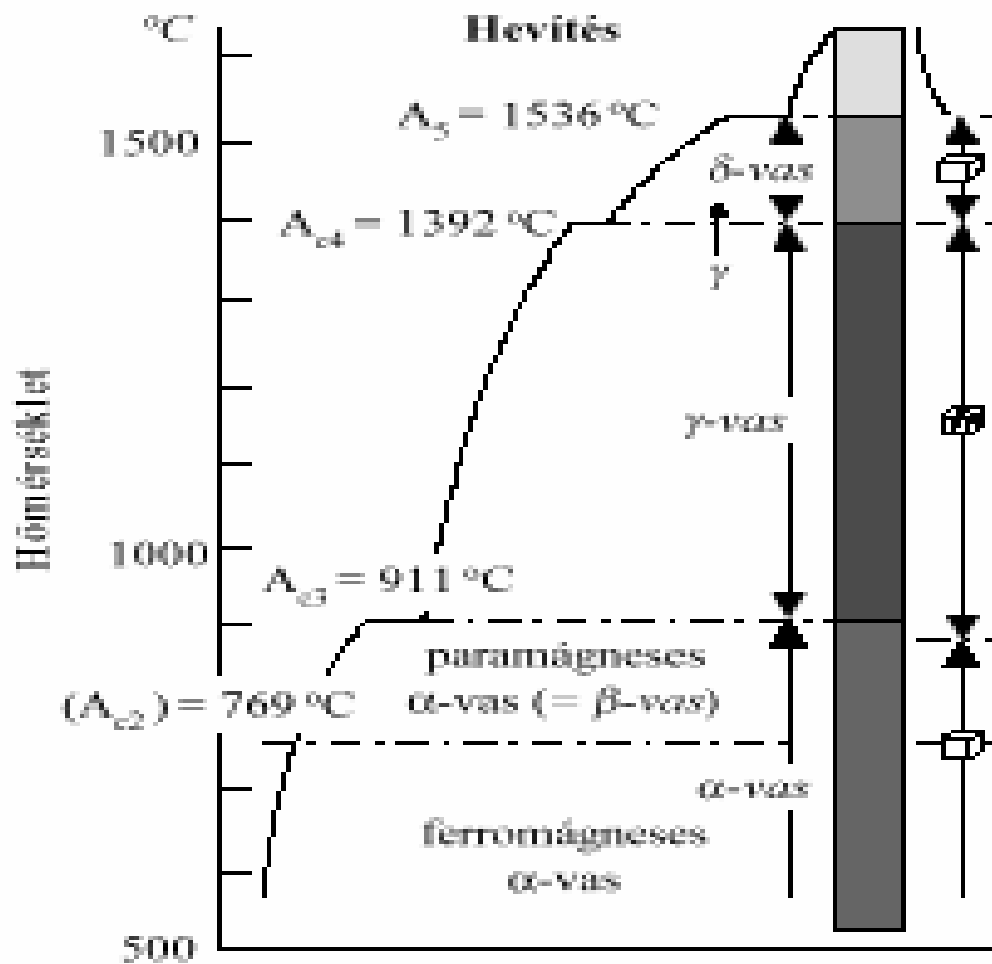
szilárd - szilárd fázisátalakulás

**Sn** (ónpestis)

$\alpha$  Sn (gyémánt rács)  $\Leftrightarrow$   $\beta$  Sn (tetragonális) 13,2 C°

**Bíborpestis** (Al-Au)

# Fe allotróp átalakulásai



ferrit - ausztenit

tkk  $\Rightarrow$  fkk (911°C, 1,04 %)

# Újrakristályosodás

Képlékeny hideg alakítás + hőkezelés ( $T_{\text{homológ}} > 0,5$ )

Hajtóerő: pont hibák + diszlokációk energiája

1. Megújulás, poligonizáció
2. Újrakristályosodás
3. Szemcsedurvulás
4. Másodlagos újrakristályosodás

Újrakristályosodási diagram

Ötvözők lassítják (Cottrell)

Diszlokációk gyorsítják.

Csíráképződés, diffúzió,  
szemcsenövekedés

termikusan aktivált

$$r = A \cdot \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$$

Van lappangási idő.

De: túlhűtés nem értelmezhető.

Nincs C-görbe.



# Egykristályok előállítása

Czochralski (tömeggyártás)

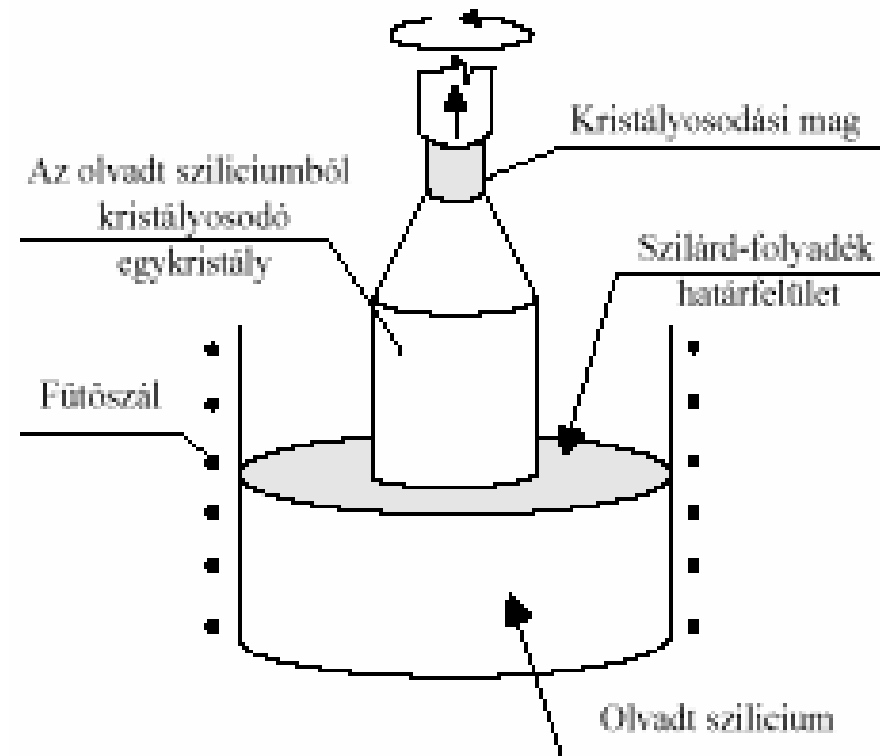
Bridgmann (kísérleti)

Függőzónás

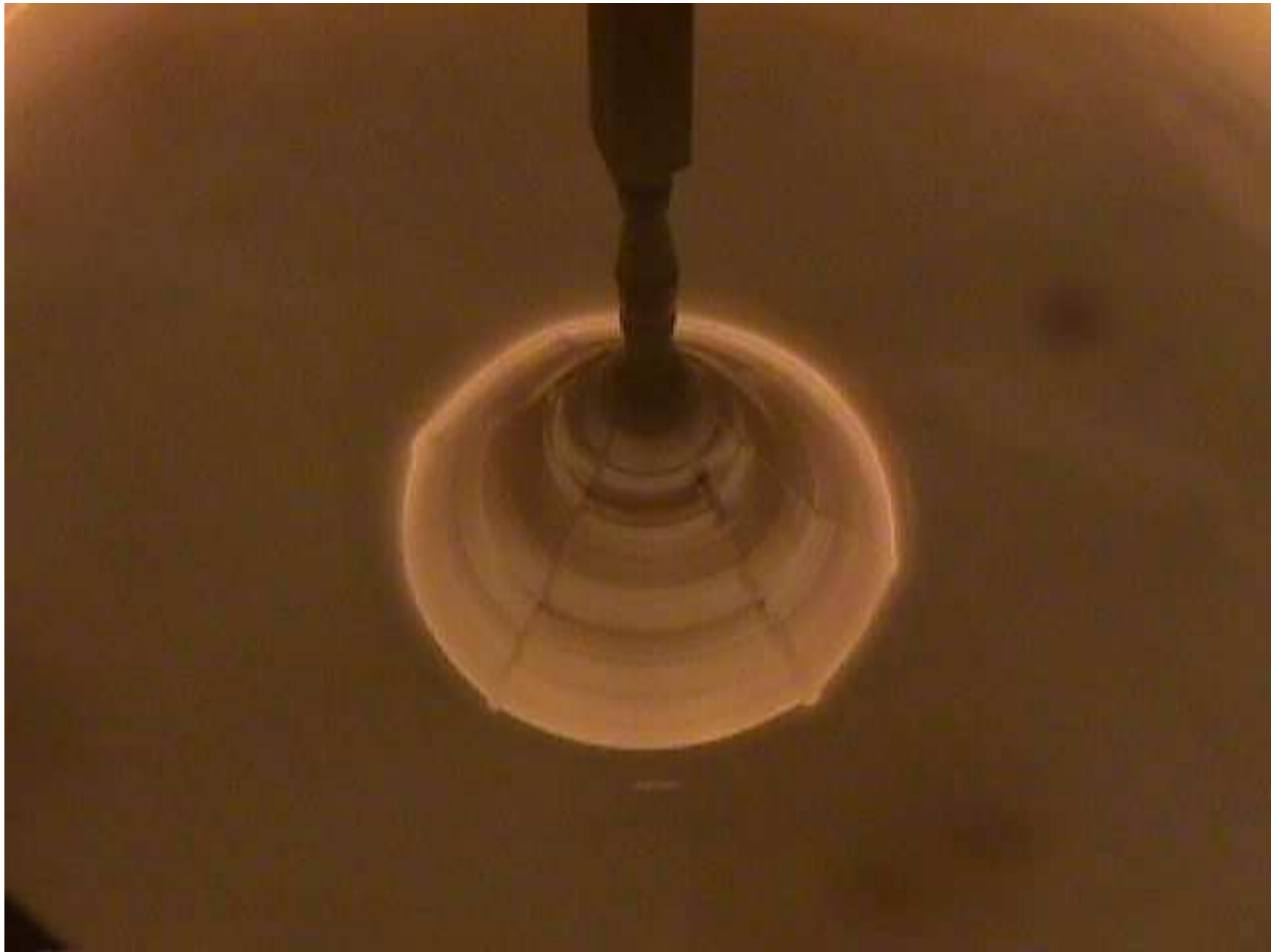
*Epitaxiális*

**Nagytisztaságú anyagok  
előállítása**

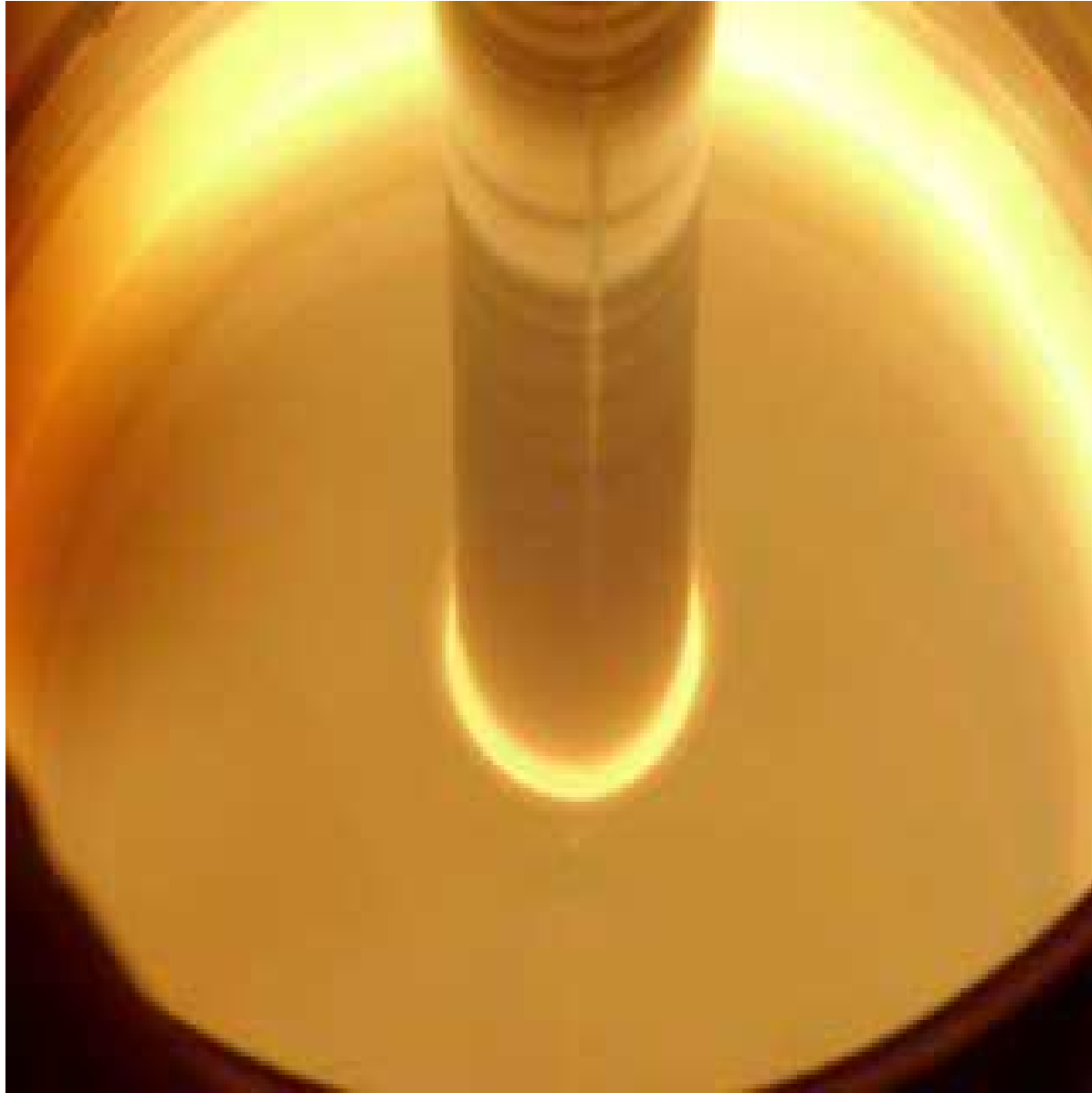
Zónás tisztítás





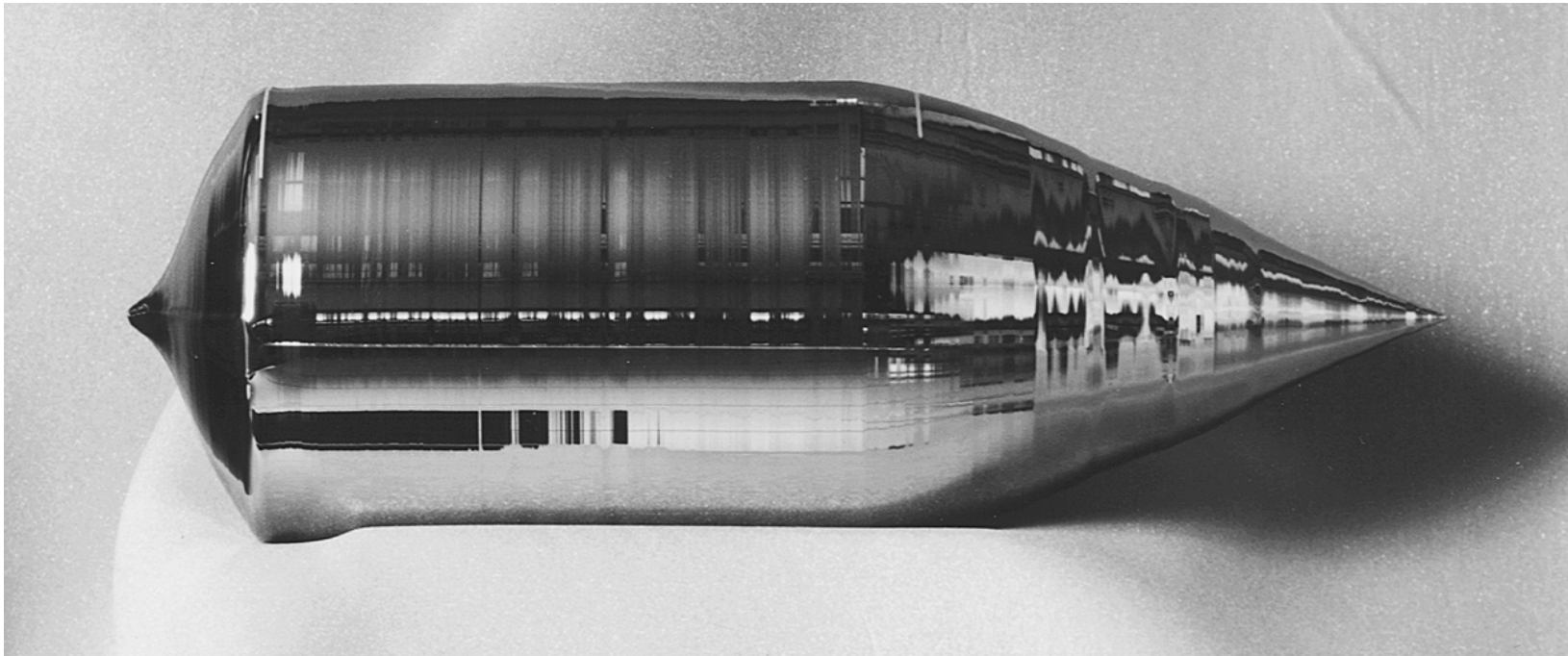




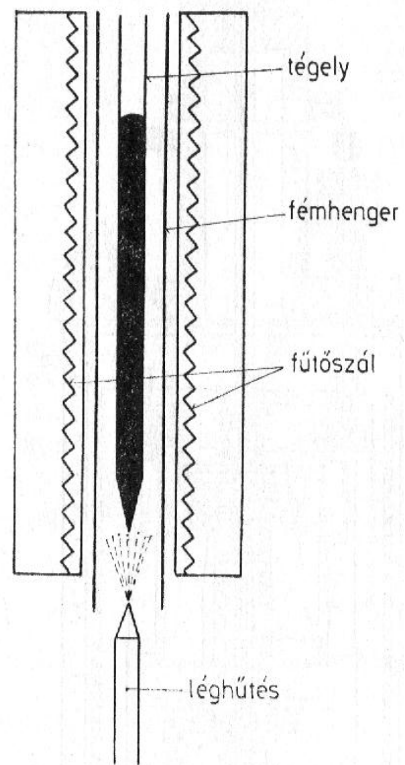




Átmérő 300 mm (12-in.) ; hosszúság 1.5 ; tömege 275 kg.  
(Photograph courtesy of MEMC Electronics Intl.)



# Bridgeman módszer



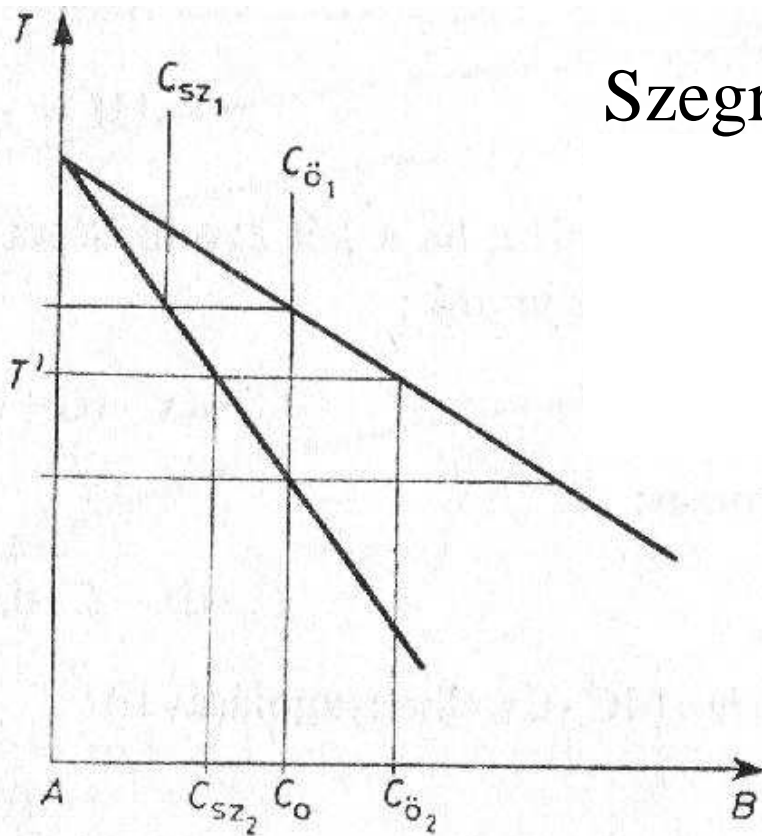


Problémák: allotróp átalakulás

Czochralski: koncentráció változás (olvadék pótlás)  
diszlokáció sűrűség csökkentése  
eltérő parciális gőznyomások (pl: GaAs)

Bridgmann: koncentráció változás (hosszirányú)  
hőmérséklet gradiens biztosítása  
kis átmérő

# Szegregáció jelensége



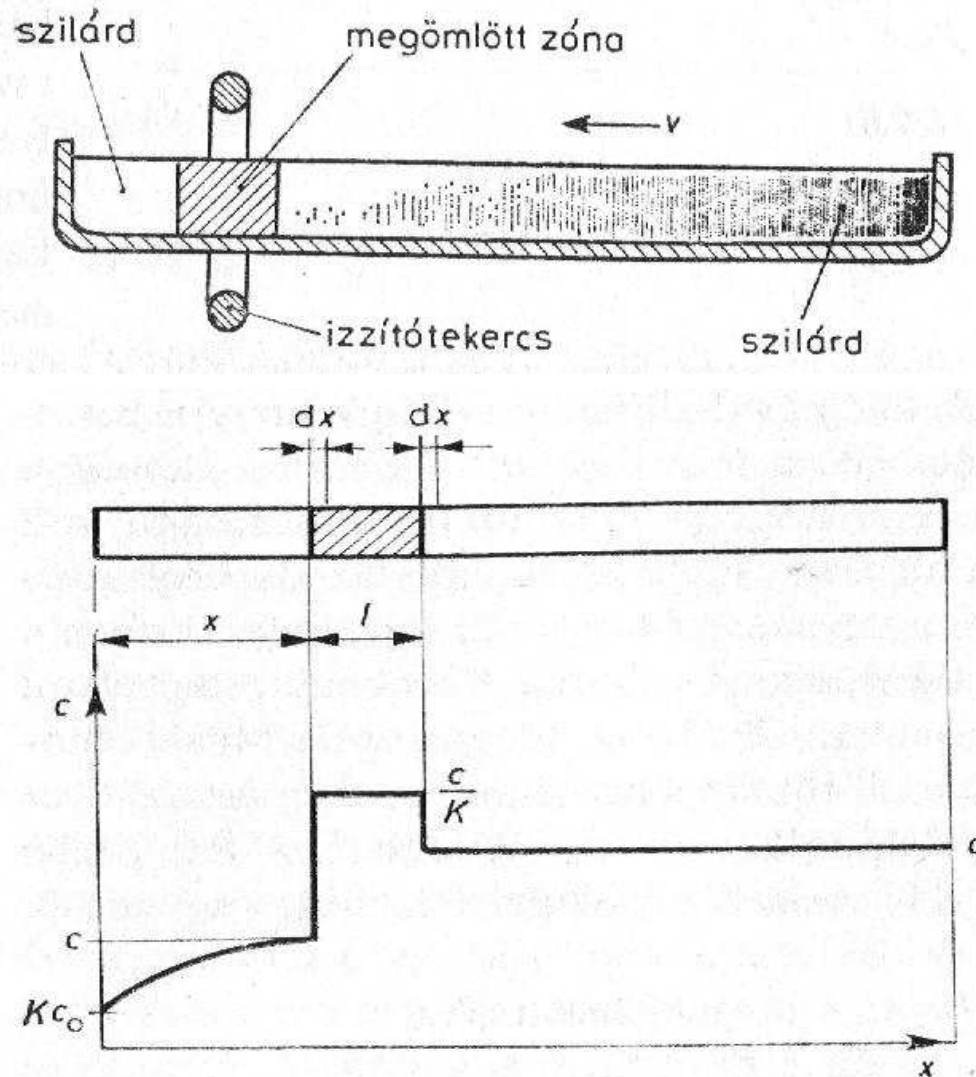
Szegregációs-, megoszlási állandó

$$k = \frac{C_{szilárd}}{C_{olvadék}}$$

8.9. ábra

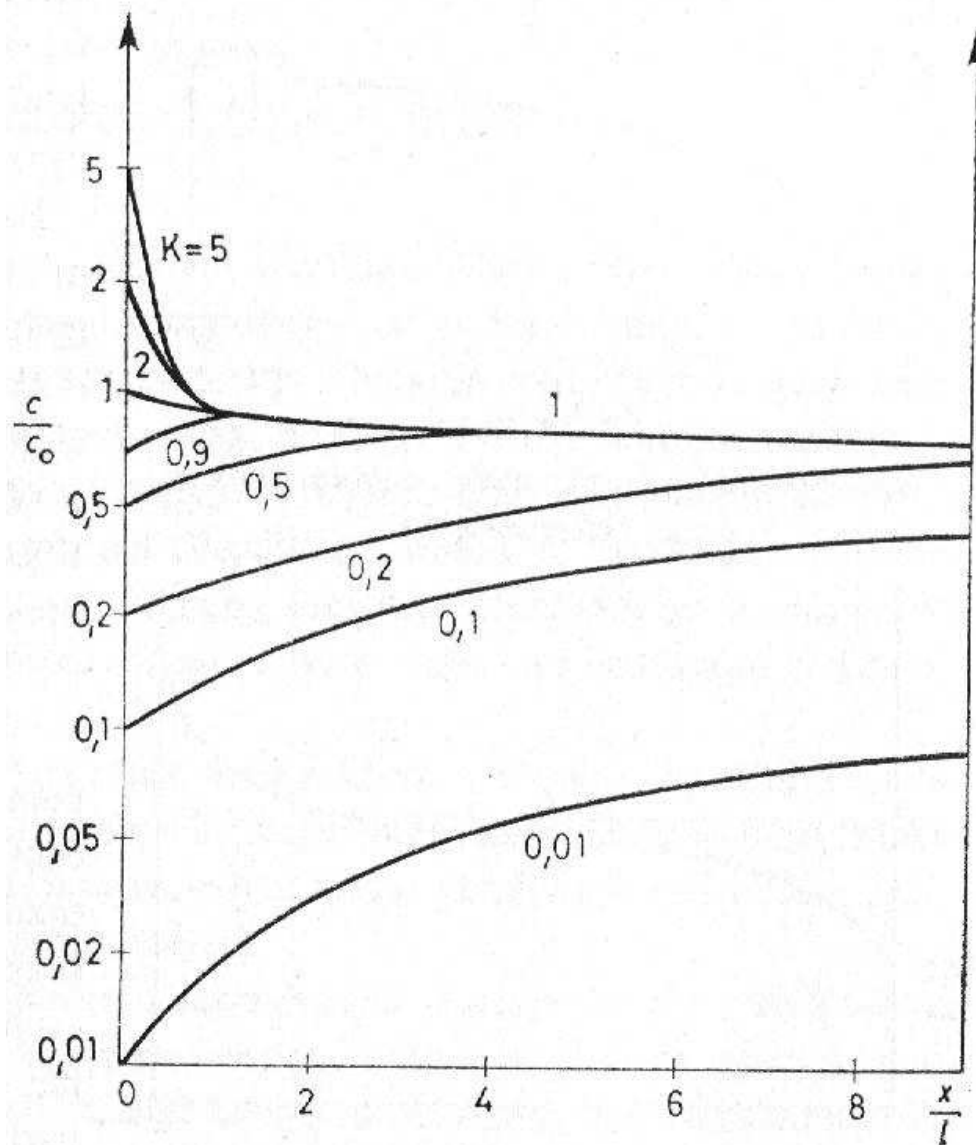
*A zónás tisztítás közbeni  
koncentrációváltozás*

# Nagy tisztaságú anyagok előállítása (zónás tisztítás)



8.10. ábra

*A koncentrációeloszlás a zónás átolvasztás közben*



8.11. ábra

*A koncentráció eloszlása a zónában olvasztott rúd mentén,  
különböző  $K$  értékekre*

Tisztítás van ha:

$$k < 1$$

Többszörös zónázás

# **KÖSZÖNÖM MEGTISZTELŐ FIGYELMÜKET**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,  
Anyagtudomány és Technológia Tanszék  
MTA-BME Fémtechnológiai Kutatócsoport

1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 7. MT épület

Tel.: +36 1 463 2954 ; +36 1 463 1234

Fax: +36 1 463 1366

E-mail: [matsci@eik.bme.hu](mailto:matsci@eik.bme.hu)

[www.att.bme.hu](http://www.att.bme.hu)