

Elektromos vezetés, vezetőanyagok

Dr. Szabó Péter János
szpj@eik.bme.hu

Elektronikai anyagtudomány
BMEVIETAA01
2022/2023/2

ELEKTROMOS VEZETÉSI FOLYAMATBAN TÖLTÉST TOVÁBBÍTÓ (ELMOZDULNI KÉPES) RÉSZECSKÉK:

Vezetők	fémek	szabad elektron
	ötvözetek	szabad elektron
	elektrolitok	+ és - ionok
	plazma áll. gázok	+ és - ionok
Félvezetők	elemi	szabad elektronok, lyukak
	vegyület	szabad elektronok, lyukak
Szigetelők	kovalens kristályok	szabad elektronok, lyukak
	ionos kristályok	szabad elektronok, lyukak
	folyadékok	+ és - ionok
	gázok	+ és - ionok

VEZETŐ ANYAGOK KLASSZIKUS CSOPORTOSÍTÁSA

σ (fajlagos vezetőképesség)
Siemens/m, 1/Ohm m

$< 10^{-8}$ S/m

szigetelő

$10^{-8} - 10^6$ S/m

félvezető

$> 10^6$ S/m

fémes vezető

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$\rho [\Omega m]$$

$$\sigma \left[\frac{S}{m} \right]$$

FAJLAGOS ELLENÁLLÁS IRÁNYFÜGGÉSE

izotróp (köbös szerkezetű egykristályok, polikristályok)

anizotróp (alacsony szimmetriájú kristályok: hex.,
tetragonális ...)

pl: Cd, Mg, Zn, C (grafit): $\frac{\rho_{parallel}}{\rho_{perpendicular}} \approx 1000$

VEZETÉSI MECHANIZMUSOK LEÍRÁSA

Klasszikus (Sommerfeld-féle, szabad-elektron modell)

Feltételezés: elektronok között nincs kölcsönhatás (ideális gáz)

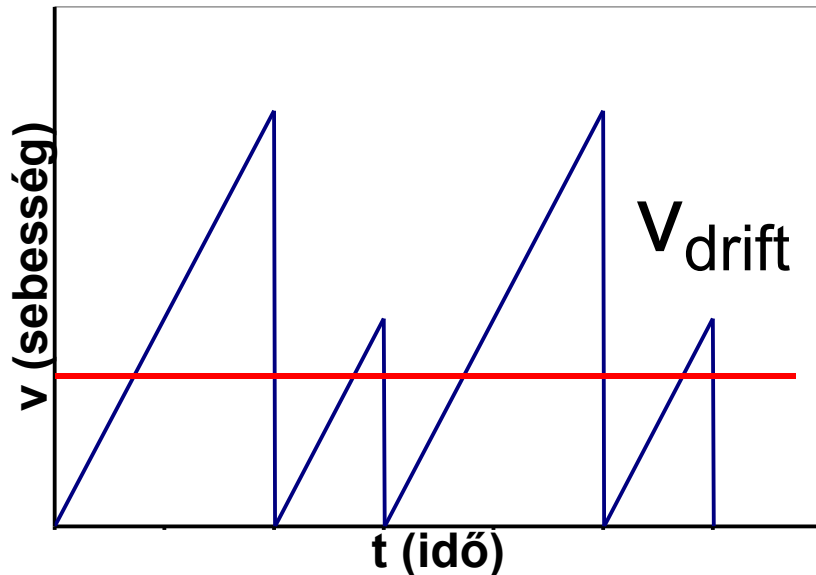
Elektron mozgása:

Rendezetlen termikus mozgás + sodródás (drift)

Kvantummechanikai leírás

Elektronhoz rendelt síkhullám mozgása a rácsperiodikus potenciáltérben. Vezető test: potenciálgödör.

KLASSZIKUS VEZETÉSI MODELL



Az elektronok az elektromos térerősség hatására folyamatosan gyorsulnak, az atomtörzseknek ütközve megállnak, majd újra gyorsulnak.

$$v_d = \mu \cdot E$$

v_d : driftsebesség (sodródási seb.)

q : az elektron töltése

n : a szabad elektronok száma

τ : két ütközés közötti átlagos idő

a : gyorsulás

F : az elektronra ható erő

m : az elektron tömege

E : elektromos térerősség

s : fajlagos vezetőképesség

$$j = q \cdot n \cdot v_d$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{q \cdot E}{m} \Rightarrow v_d = \frac{q \cdot E}{2 \cdot m} \tau$$

$$j = \frac{n \cdot q^2 \cdot \tau}{2 \cdot m} E = \sigma \cdot E$$

KLASSZIKUS VEZETÉSI MODELL

Eredmények:

- Differenciális Ohm-törvény
- 1-2 vegyértékű fémekre jó fajlagos ellenállás értékek

Problémák:

- azonos fém allotróp módosulatainak különböző vezetését nem magyarázza meg
- többvegyértékű fémek (fajlagos ellenállás hibás)
- Félvezetők, szigetelők fajlagos ellenállásának hőmérsékletfüggését nem magyarázza meg
- σ (T, megvilágítás, külső E, sugárzás...) nem definiált

FÉMEK FAJLAGOS ELLENÁLLÁSÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

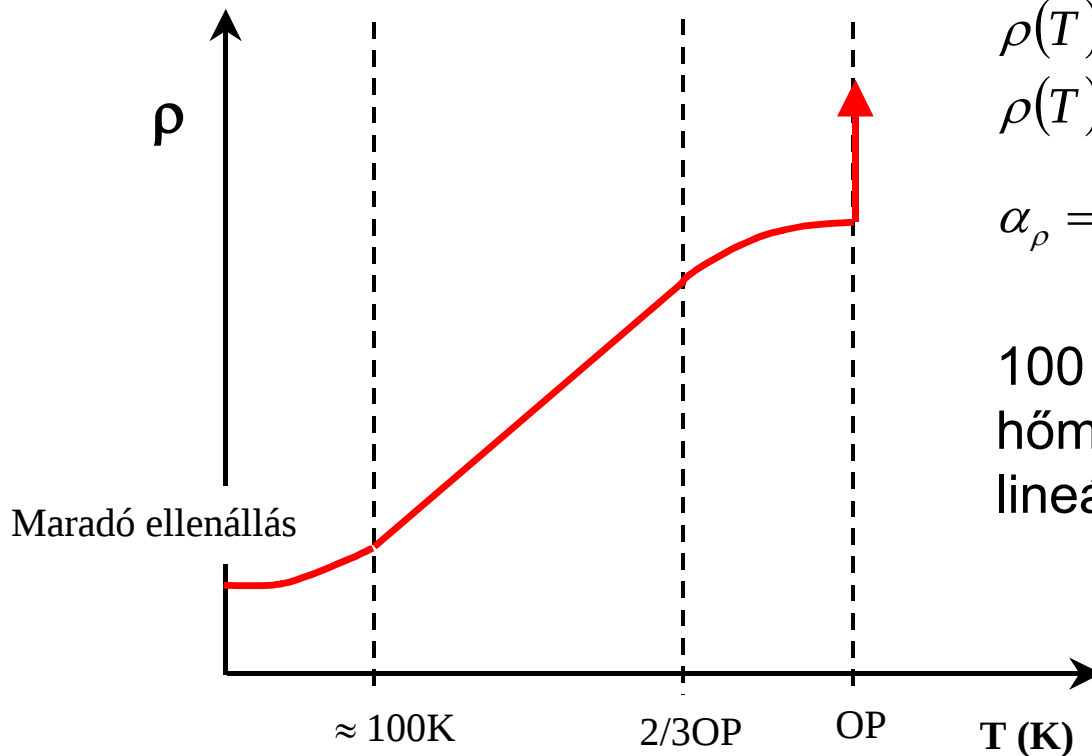
Kristályrács torzulása $\Rightarrow \rho$ növekedése

- termikus rácsrezgések
- termikusan aktivált ponthibák
- diszlokációk (alakítás)
- felületszerű hibák (szemcseméret)
- térfogati hibák (kiválások, új fázis)
- rácstorzulás (szilárd oldatos ötvözés)
- ...

Matthiesen-szabály (az egyes tényezők szeparálható függvényként fejtik ki hatásukat)

$$\rho(T, c, \varepsilon) = \rho_1(T) + \rho_2(c) + \rho_3(\varepsilon) + \dots$$

ρ HŐMÉRSÉKLETFÜGGÉSE (FÉMES VEZETŐ)



$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta T^2 + \dots + \mu\Delta T^n)$$

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$$

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta\rho}{\Delta T}$$

100 K felett a fajlagos ellenállás hőmérsékletfüggése jó közelítéssel lineáris.

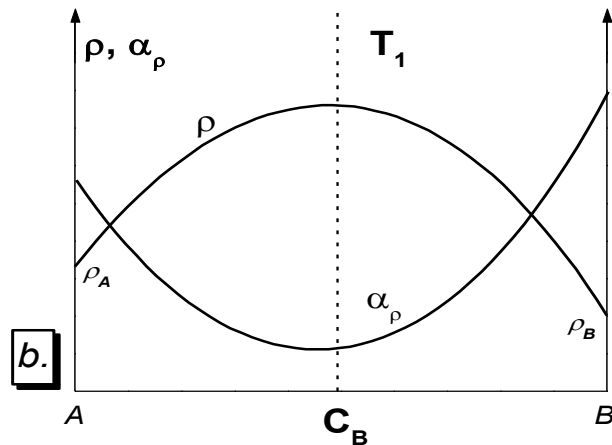
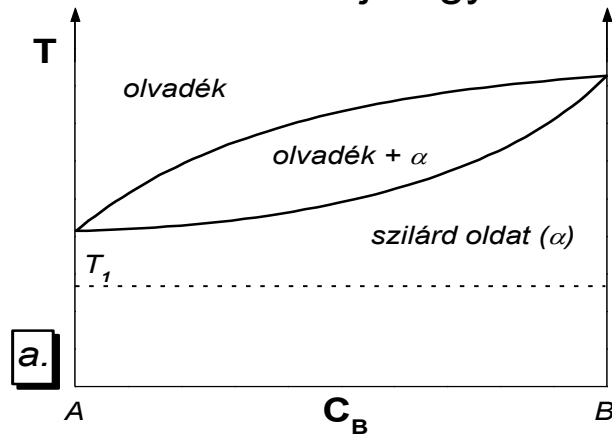
kristályhibák $\Rightarrow$ maradó ellenállás

Szupravezető: maradó ellenállás nulla

Lineáris viselkedéstől eltér, ha van:
ferro-paramágneses átmenet
allotróp átalakulás, fázis átalakulás

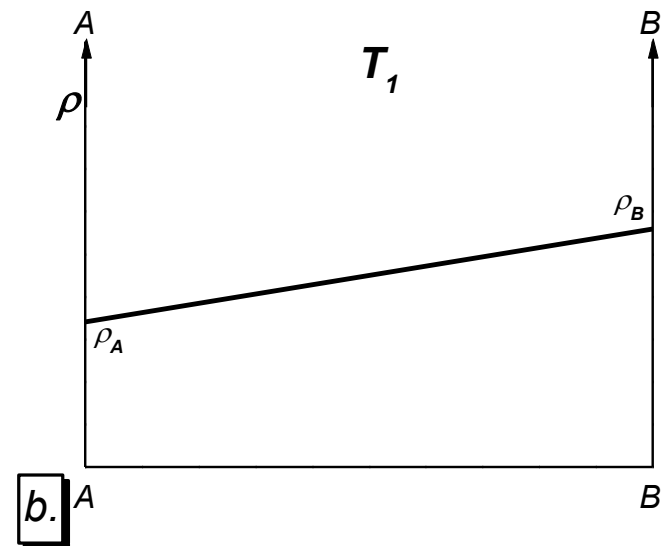
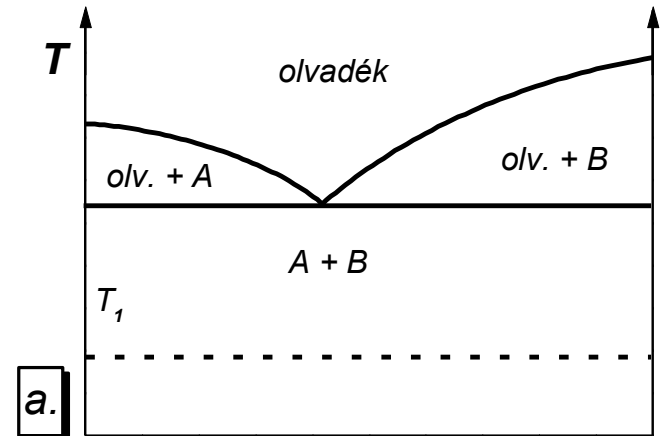
ÖTVÖZÉS HATÁSA

A két alkotó korlátlan mértékben oldja egymást



$$\Delta\rho_{\text{ötv}} = Ac(1 - c)$$

A két alkotó nem oldja egymást



$$\rho_{\text{ötv}} = \rho_A c_A + \rho_B c_B$$

ÖTVÖZÉS HATÁSA

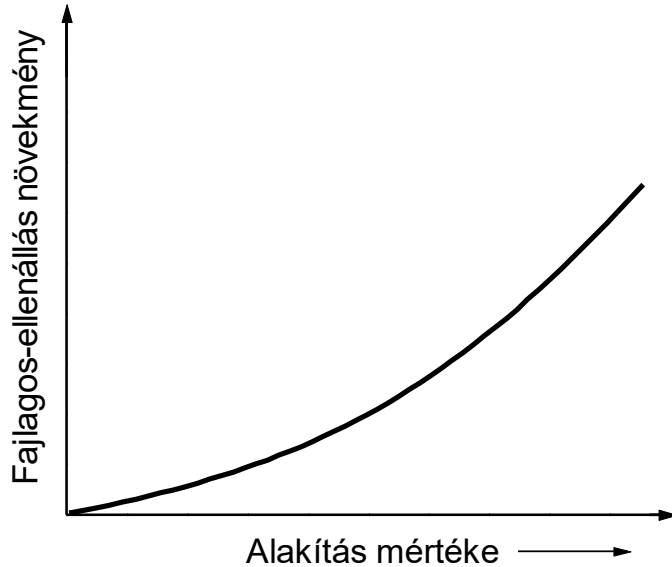
Nordheim-szabály: ha az alkotók szilárd oldatot és második fázist is létrehoznak akkor a fajlagos ellenállás:

$$\rho = \rho_A + (\rho_A - \rho_B)c_B + Ac_B(1 - c_B)$$

Mott-szabály: szilárd oldatok esetén kis ötvözőkoncentrációknál az $(1-C)$ közelítőleg 1 lesz, vagyis az egyik (pl. A) alkotóban gazdag ötvözetben a másik (pl. B) alkotó atomjai által okozott ellenállás-növekmény egyenlő lesz az A atom által okozott növekménnyel, ha az ötvözet B atomokban gazdag.

$$\Delta\rho = Ac \Rightarrow \Delta\rho_{AB} = \Delta\rho_{BA}$$

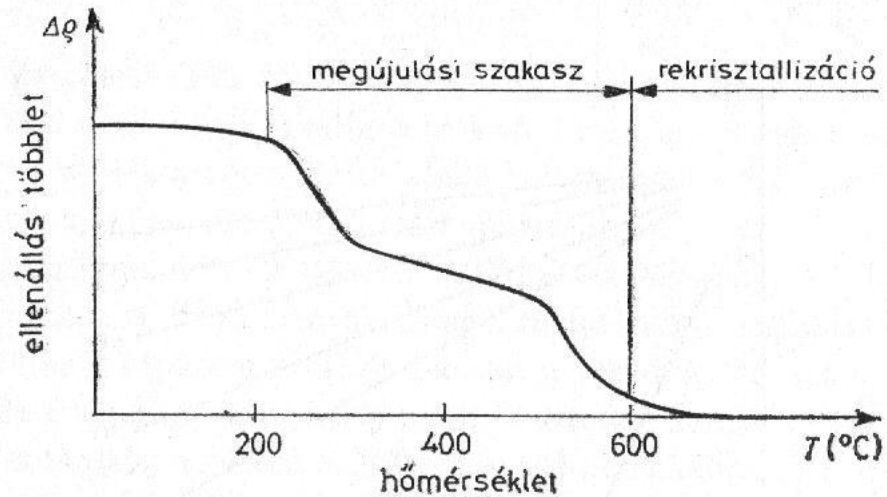
KÉPLÉKENY ALAKÍTÁS, HŐKEZELÉS HATÁSA



Képlékeny alakítás $\Rightarrow$
vakanciák, diszlokációk, növelik
a fajlagos ellenállást

$$\Delta\rho_\varepsilon = k \cdot \varepsilon^n$$

$$\ln \Delta\rho_\varepsilon = n \ln \varepsilon + \ln k$$



10.33. ábra

A Ni megújulása

Újrakristályosodás hatására
egyensúly felé tart a rendszer, ρ
csökken.

NYOMÁS ÉS RÉTEGVASTAGSÁG HATÁSA

Nyomás (hidrosztatikus) hatása: ρ növekszik

Rétegvastagság hatása

ha az e- szabad úthossza összemérhetővé válik a rétegvastagsággal

k: felület minősége (jellemző konstans)

a: alaktényező (huzal, lemez)

d: vastagság, átmérő

λ : e- szabad úthossza

$$+ \Delta\rho = k \cdot a \cdot \rho \cdot \frac{\lambda}{d}$$

$$\lambda = v_{drift} \cdot \tau$$

VEZETŐANYAGOK

Vezetékanyagok:

Cu és ötvözetek

Al és ötvözetek

Fe és ötvözetek

Hőelemek aktív anyagai

Cu - konstantán

Fe – konstantán

Ni – CrNi, Pt – PtRh

Érintkezőanyagok

kis átmeneti ellenállás

jó hővezetés

jó ívállóság

nagy szilárdság

kopásállóság

pl. Au, Ag, W, Pt,

Cu-Ag, Cu-Ag-Au,

kompozitok, pl. Ag-CdO

Üveg- és kerámiaátvezetők

kis hőágulási együttható

pl. Fe – Ni ötvözet 36-42% Ni

Kettősfémek

két eltérő hőágulású anyag

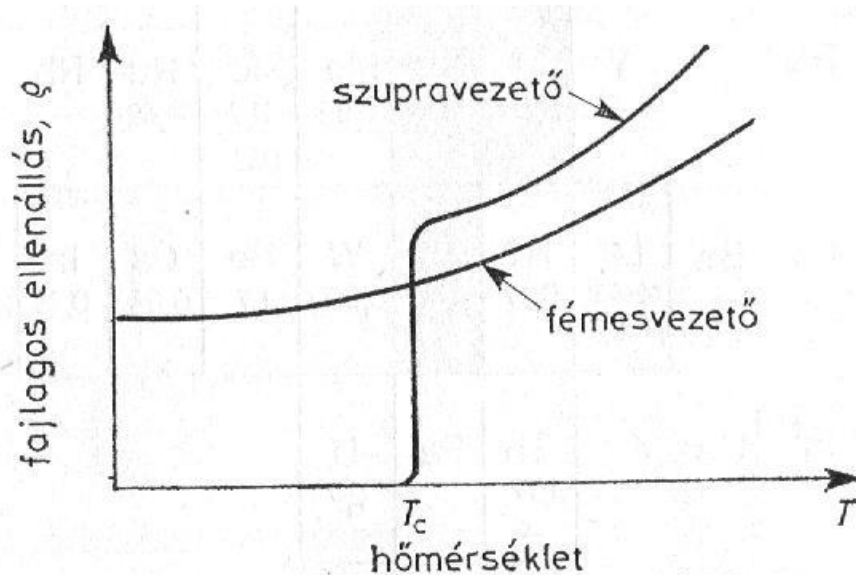
összehengerelve

Forrasztanyagok

SZUPRAVEZETÉS

Kamerlingh Onnes, 1911 (Hg)

28 elem és több mint 1000
vegyület



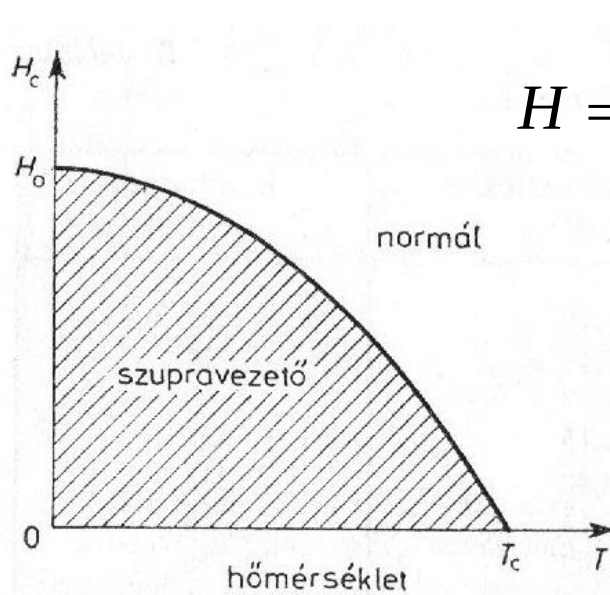
Nb	7,2K
Nb ₃ Sn	18,1K
Nb ₃ Al	17,5K
V ₃ Si	17K
V ₃ Ga	16,8K

Szupravezető anyag a kritikus hőmérséklet alatti hőmérsékleten elveszti az elektromos ellenállását.

SZUPRAVEZETŐ ELEMÉK A PERIÓDUSOS RENDSZERBEN

H																	He
<i>Li</i>	Be	Légköri nyomáson szupravezetővé válik Csak nagy nyomáson válik szupravezetővé										<i>B</i>	C	N	<i>O</i>	F	Ne
Na	Mg											Al	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	Cl	Ar
K	<i>Ca</i>	<i>Sc</i>	Ti	V	Cr	Mn	<i>Fe</i>	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	<i>Ge</i>	<i>As</i>	<i>Se</i>	<i>Br</i>	Kr
Rb	<i>Sr</i>	<i>Y</i>	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	<i>Sb</i>	<i>Te</i>	<i>I</i>	Xe
<i>Cs</i>	<i>Ba</i>	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	<i>Bi</i>	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
		<i>Ce</i>	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	<i>Lu</i>		
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

$T_c, H_c, (J_c)$ HATÁSA



$$H = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

$$H = \frac{j}{2r\pi}$$

H : mágneses térerősség

H_0 : kritikus mágneses tér

T : hőmérséklet

T_c : kritikus hőmérséklet

j : áramsűrűség

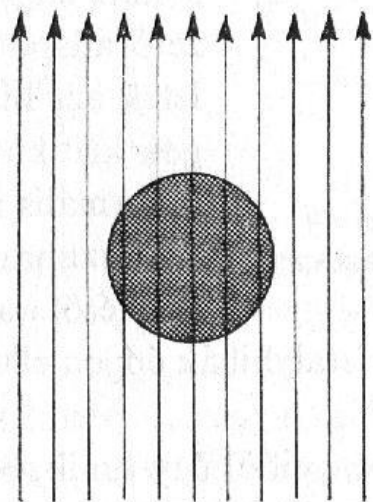
r : a vezető keresztmetszetének sugara

A szupravezető állapot nem csak a kritikus hőmérséklet, hanem egy kritikus mágneses térerősség miatt is megszűnhet. Ezt a térerősséget a szupravezető huzalban folyó áram is előidézhetheti. Emiatt a szupravezető huzalok nem használhatók tetszőlegesen nagy áramok továbbítására.

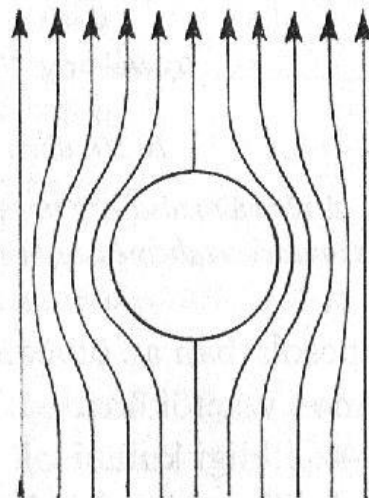
MEISSNER-EFFEKTUS

Mágneses tér erővonalai kiszorulnak

Szupravezető: ideális diamágnes (I. fajú)



normális
 $T > T_c$
vagy $H > H_c$



szupravezető
 $T < T_c$
vagy $H < H_c$

$$\bar{B} = \mu_0 (\bar{H} + \bar{M}) = 0$$

$$\bar{M} = \kappa \bar{H}$$

$$B = 0 \Rightarrow \bar{H} = -\bar{M} \Rightarrow \kappa = -1$$

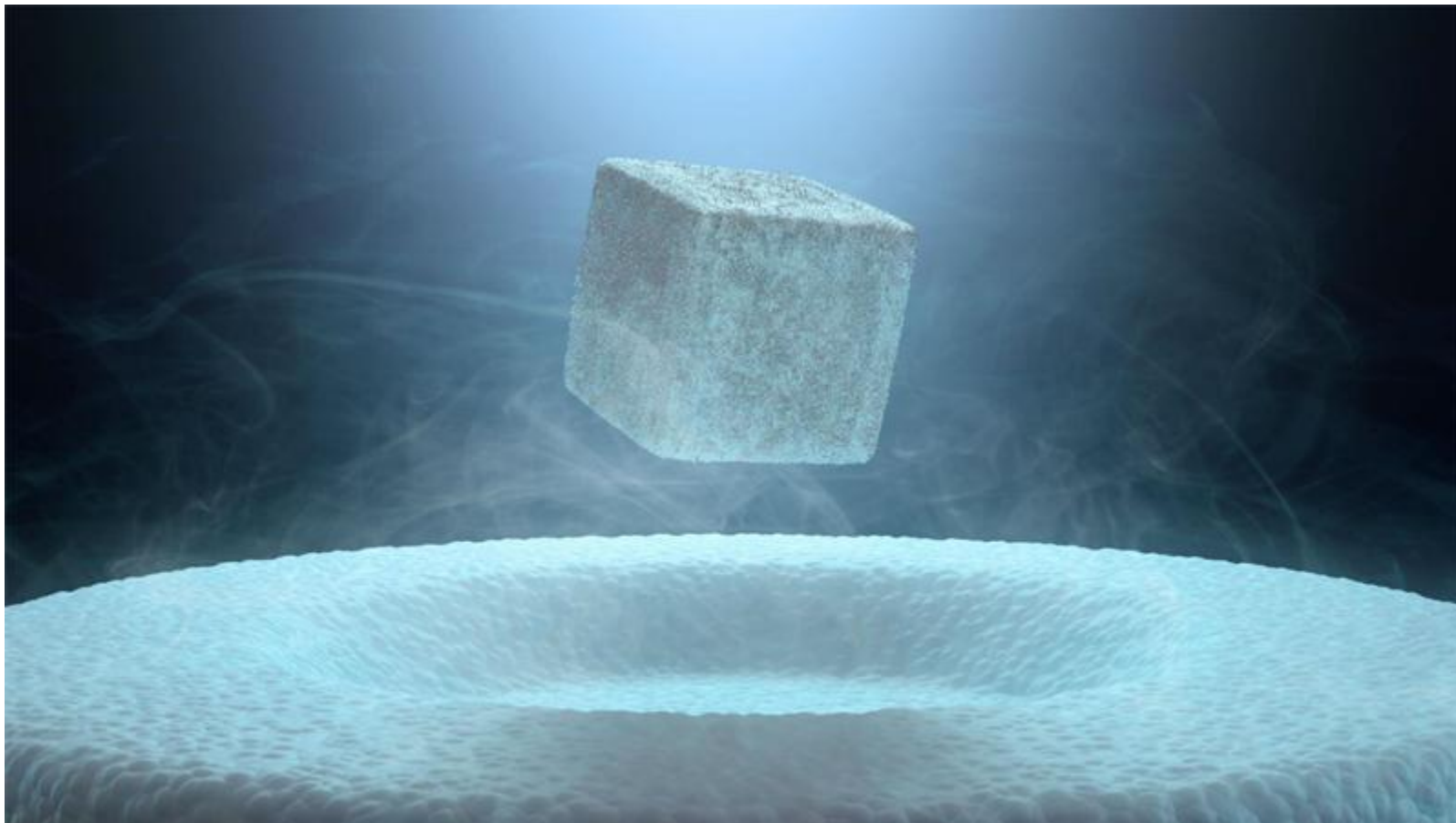
B: mágneses indukció

μ_0 : mágneses permeabilitás

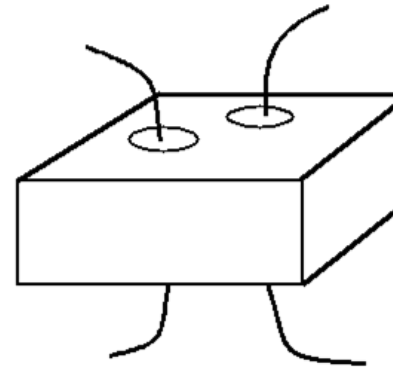
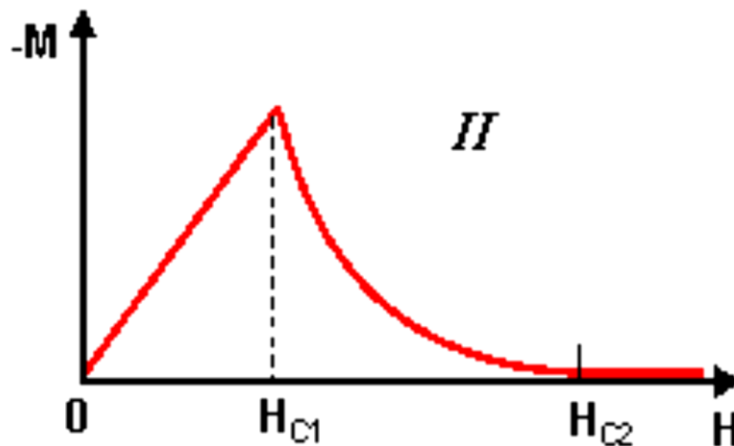
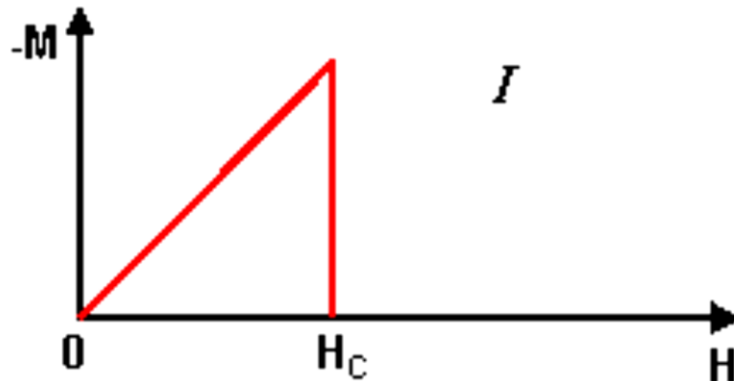
M: mágnesezettség

κ : szuszceptibilitás

Mágneses lebegtetés



I. ÉS II. FAJÚ SZUPRAVEZETŐK



I. és II. fajú szupravezetők M mágnesezettségének alakulása a külső tér függvényében

H_{c1} : alsó kritikus térerő

H_{c2} : felső kritikus térerő

H_{c1} alatt: ideális diamágnes

H_{c1} - H_{c2} : H tér behatol

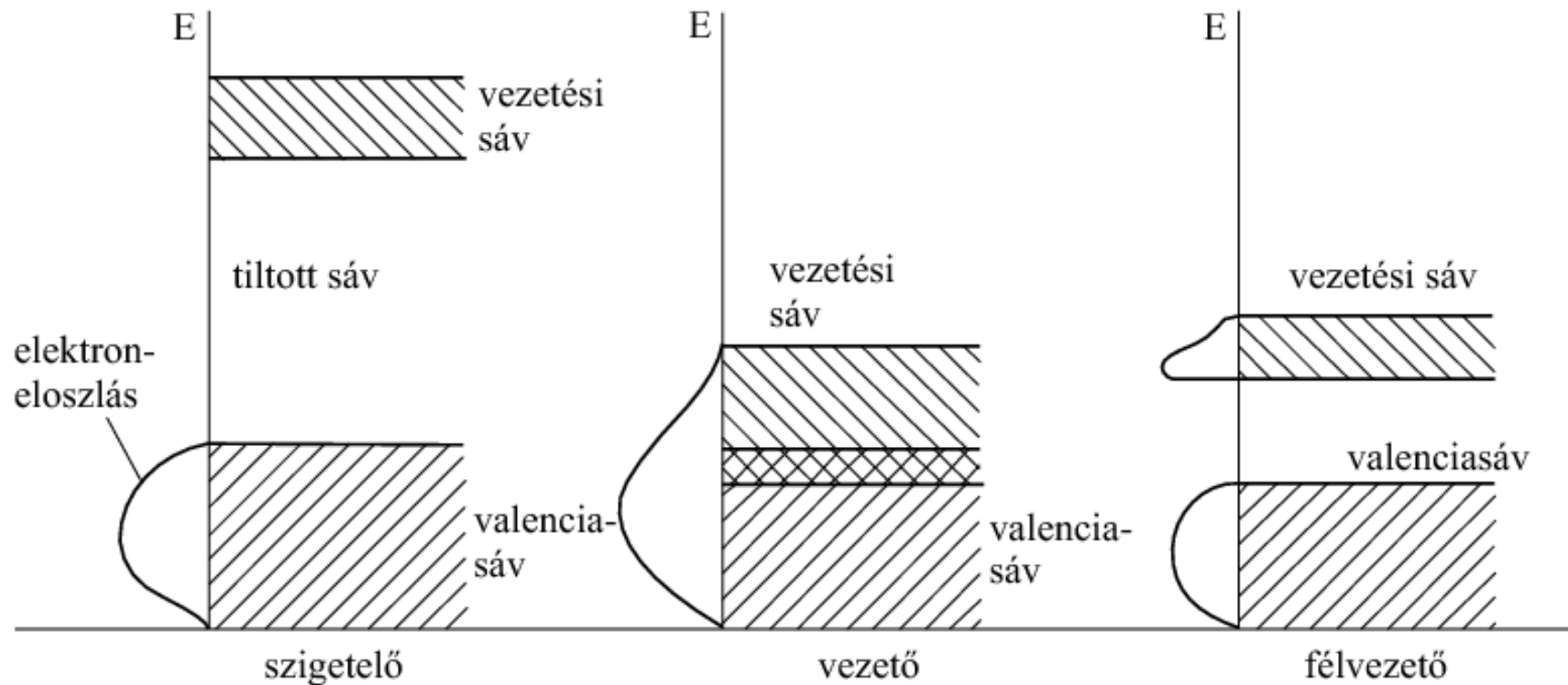
ISMERTEBB I. ÉS II. FAJÚ SZUPRAVEZETŐ ELEMEEK ÉS T_c (K)

		***		Al 1,18	
Ti 0,39	V 5,03		Zn 0,86	Ga 1,09	
Zr 0,55	Nb 9,5		Cd 0,52	In 3,41	Sn 3,72
	Ta 4,48		Hg 4,15	Tl 2,37	Pb 7,19

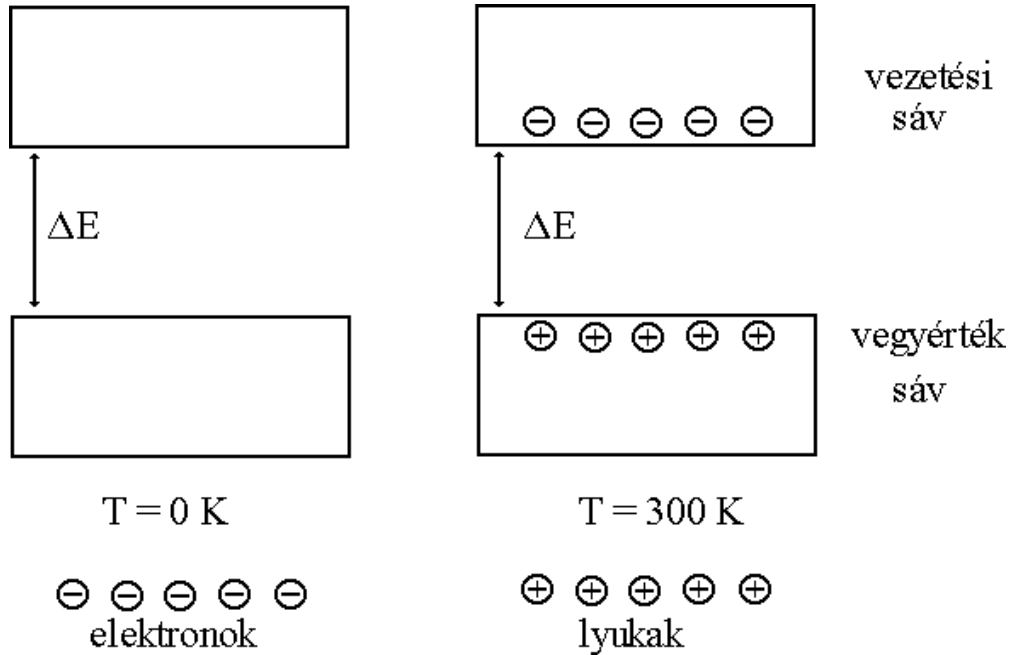
SZUPRAVEZETŐ ANYAGTÍPUSOK

- Elem
- Ötvözet
- Vegyület (intermetallikus)
- Kerámia (rideg, törékeny, magas T_c)

FÉLVEZETŐK - SÁVELMÉLET



ELEMI FÉLVEZETŐK



Gerjesztés (pl. hőmérséklet, vagy elektromágneses sugárzás [fény, röntgensugárzás]) hatására elektronok kerülhetnek a vegyértéksávból a vezetési sávba. Ekkor az anyag vezetővé válik. Az elektronok helyén a vegyértéksávban pozitív töltésű fiktív részecskék, „lyukak” keletkeznek.

ADALÉKOLT FÉLVEZETŐK

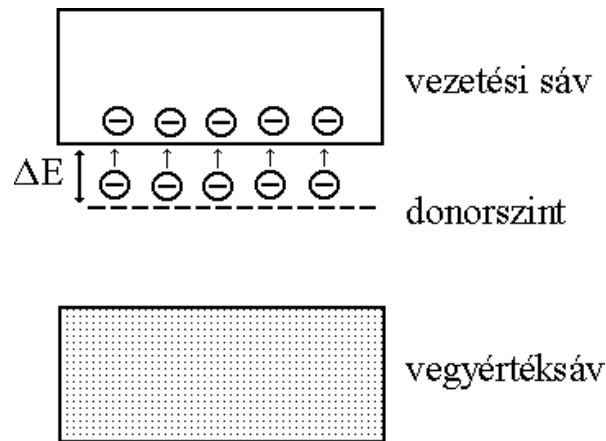
Extrinsic (adalékolt)

n-típusú, donor, 5 vegyérték (P, As, Sb)

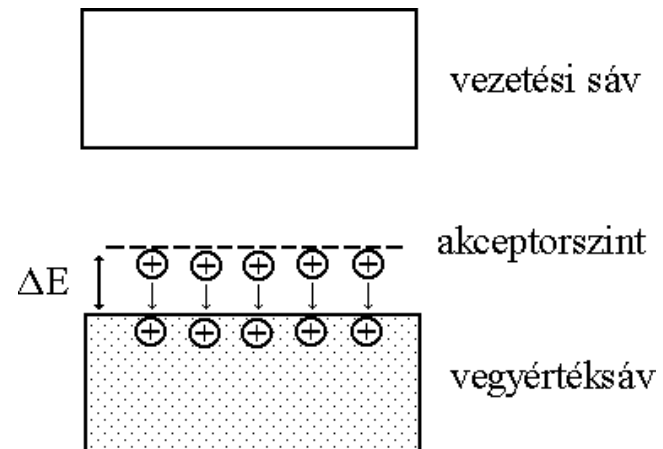
p-típusú, akceptor, 3 vegyérték (B, Al, In, Ga)

Adalékolás: szubsztitúciós ötvözés (oldhatósági határ alatt)

Az n-típusúnál az elektronok, a p-típusúnál a lyukak száma sokszorozódik meg, így lesznek elektron- ill. lyukvezetők.



FD4.ábra



FD5.ábra

FÉLVEZETŐK CSOPORTOSÍTÁSA

	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	<i>VII</i>
<i>II</i>	Be	B	C	N	O	
<i>III</i>	Mg	Al	Si	P	S	Cl
<i>IV</i>	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br
<i>V</i>	Zn	In	Sn	Sb	Te	I
<i>VI</i>	Sr		Pb	Bi	Po	At
<i>VII</i>	Cd					

Elemi félvezető (Si, Ge...)

Vegyületfélvezetők: biner, ternér, kvaternér... ($A^{III} B^V$, $A^{II} B^{VI}$)

Ellenőrző kérdések

- Alapfogalmak definiálása:
 - szigetelő, félvezető, vezető
 - klasszikus vezetési modell
 - sodródási (drift) sebesség
 - fajlagos ellenállás hőmérsékletfüggése
 - fajlagos ellenállás ötvöztéstől való függése
 - képlékeny alakítás hatása a fajlagos vezetőképessegre
 - szupravezetés jelensége
 - Meissner-effektus
 - I. és II. fajú szupravezetők
 - sávmélelet
 - elemi félvezetők
 - adalékolt félvezetők

Igaz-hamis kérdések

- Fémek fajlagos ellenállása növekszik a hőmérséklet növelésével. (I)
- A diszlokációk javítják a fémek vezetőképességét (H).
- A fémek fajlagos ellenállása 0 K-en nullára csökken (H).
- Szupravezető csak fémes anyag lehet (H).
- A mágneses tér egy kritikus értéke megszünteti a szupravezető állapotot (I).
- A félvezetők tiltott sávjának szélessége kisebb, mint a fémeké (H).