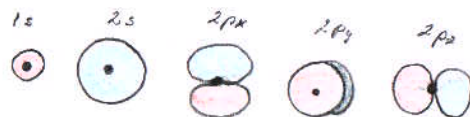


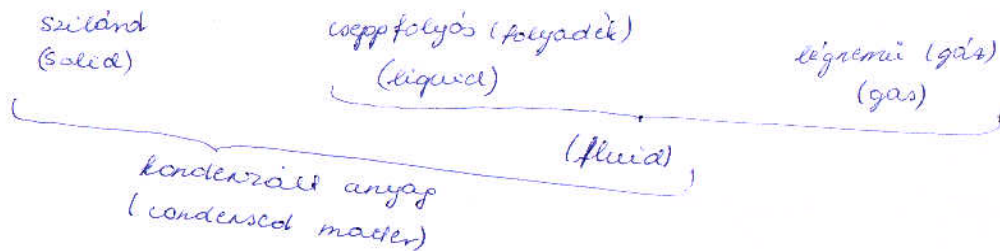
Bevezetés

Atomok

- pill. atommag körül $E \sim \frac{1}{r^2}$ típusú elektromos tér
- n db e^- van a körben
- **Pauli-féle kizárás elv:** állapotonként max. 1 e^- lehet



Anyagok osztályozása



Anyagok termodinamikája

Gázok:

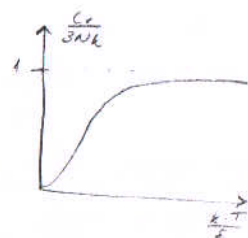
- Ideális gáz állapotegyenlete: $pV = n \cdot R \cdot T = N \cdot k \cdot T$ $R = 8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
- $\Rightarrow C_v = \frac{f}{2} \cdot R$ pl. N_2 : $20,81 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 2,505 \cdot R$

Szilárd testek

- **Dulong-Petit szabály:** $C_v = 3R$

pl.) Fe: $25,1 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 3,02 \cdot R$; Cu: $24,44 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 2,94 \cdot R$

\Rightarrow **MINDEN ANYAG EGYTÖRTE! VAGY MEGSEH?**



Neon lámpa

- Gázkiütés: Atomok gerjesztett állapotba kerülnek, majd fényt bocsátanak ki
- $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ $3,4 \text{ eV} = 380 \text{ nm}$ (kripton) $1,7 \text{ eV} = 750 \text{ nm}$ (neon)

Kompakt fénylő

- Hg gáz kiütése:
- $4,2 \text{ eV} = \text{UV}$
- fluoreszcens bevonat (fénypor)
- begyújtáshoz Ar gáz kell
- veszélyes hulladék

Anyagok szerkezete

Szilárd anyagok szerkezete

- A kémiai összetétel nem határozza meg az anyag összes tulajdonságát
- Pl.:
 - konduktor vs. szigetelő
 - Al_2O_3 : korund, zafír, rubin
 - C: gyémánt, grafit
 - SiO_2 : üveg, kvarc, +10 módosulat

Kristályos anyagok

- Kísérleti tapasztalatok XIX. sz. elején az atomos szerkezet még nem ismert, de számos kristályszerkezet ismert
- energetikailag legkedvezőbb a szabályos elrendezés \rightarrow bizonyítani kell
- röntgen diffrakció: $\Delta l = n \cdot \lambda = \frac{d \cdot \sin \theta}{\sin \theta}$ \rightarrow az elhajlás feltétele: $\lambda < d$
- $\lambda \geq d$ (n=1) $\leq d$ ($\sin \theta \leq 1$)
- a fémeknél a látható fény hullámhossza nem elég kicsi $\rightarrow 1 \text{ \AA} \rightarrow$ röntgen
- az elhajlás szöge függ a hullámhossztól \rightarrow különböző sínek másként hajlanak el



- 1895. Röntgen: röntgensugárzás
- Hevített volframszálon történő elektronok gyorsulnak \rightarrow becsapódnak az anyagba
- \rightarrow absz. e^- pályájáról nagy energiájú e^- kilökése \rightarrow λ kicsi (volframszál nagy hőm. kiütésű, mert szabadon van napon napos)

→ szabályos mértékű: az atomok szabályos rendjének bizonyítéka

→ kötérsíkot feltételezett

• 1915: Bragg: kristályszerkezet megállapítása (22 élesen) / 25 élesen egyfajta röntgen diff. (d_{hkl})

L Póztároló alaptérképek (STM, scanning tunneling microscopy)



- piezoelektromosság révén nagyon pontosan mozgatható

- a mikroszkópra feszültséget kapcsolnak

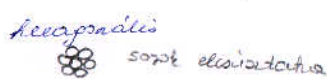
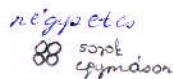
• ha a ki atom felett van → áramút effektus → áram

• ha a ki atom felett van → nem út az

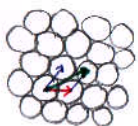
} atom ~ felület

• Kristályszerkezet: szabályos háromdimenzió (3D) (kivétel: a sík)

- Két dimenziós rácsok:



- Ponttípus $R_{n_1, n_2, n_3} = n_1 \cdot \underline{a}_1 + n_2 \cdot \underline{a}_2 + n_3 \cdot \underline{a}_3$



• elemi cella: az ($\underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{a}_3$) által kifeszített paralelogramma (az a síkban van rácspont)

R_{n_1, n_2, n_3} : transzlációs vektor

$\underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{a}_3$: elemi transzlációs vektor } vektorok, melyek mentén a rács orámciklus eltolható

→ a kristály rácsa a részecskék közti kölcsönhatástól függ

L Grafén szerkezet: szénatomok egy rétegben

• rács: primitív + bázis

hexagonális

• az elemi rácsvektorok által kifeszített paralelogramma: 2C atom

- Három dimenziós rácsok

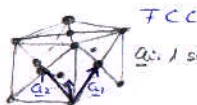
L Egyszerű köbös (Simple cubic)

PL) B (egyetlen)



L Lapcentrális köbös (face centered cubic)

PL) Au, Ag, Pt, Al, Ni, Pb, Fe 912°C felett

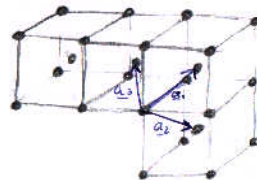


FCC

$\underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{a}_3$ sorából 3 transzlációs vektorhoz tartozó primitív vektorok

L Tércentrált köbös (body centered cubic)

PL) Fe 912°C alatt, Mo, W, Cr, V, Na, K



L Szoros illeszkedésű hexagonális

• a két réteg a különböző módon helyezkedhet el

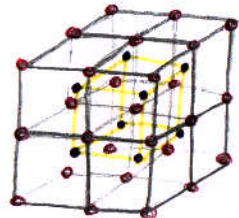


FCC: ABCABC...

HCP: ABABAB...

} Az e⁻ ok elhelyezkedésétől függ, hogy melyik valószínűleg

L PL) CsCl szerkezet:



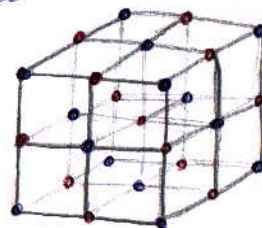
• Cl⁻
• Cs⁺

• rács: egyszerű köbös

• bázis: kétatomos

• PL: CsBr, AgZn, β-szilárdítvány

NaCl



• Cl⁻
• Na⁺

• rács: fcc

• bázis: kétatomos

• PL: AgCl, CaO, LiF,

Kristályok

↳ Egykristály: egy szemecéből áll

↳ Polikristály: több szemecéből áll



szemec: az atomok u. egy dőlnek

Szemeceméret szerinti osztályozás (d)

- d ~ pár mm: duraszemcsés pl.) Zn bevonat acélon (korgany)
- d ~ 10µm - 0,1mm: finomszemcsés
- d ~ 1 - 10µm: mikroszemcsés
- d ~ 10 - 100 nm: nanoszemcsés

Minél lassabban hűjtük, annál kevesebb és nagyobb szemec alakul ki

Pontosítási hibák

↳ Vakanciák

• egy atom helyén nincs semmi

• Termikus hiba → vakancia koncentráció: $n = N e^{-\frac{E_{vac}}{kT}}$
(minél melegebb, annál jobban mozog → több vakancia)

atomok száma

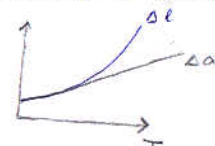
- vakancia kétféle energia
• fémekben ~ 0,8 - 2 eV
1 eV = 1,6 · 10¹⁹ J
• ~ 0,025 eV szobahőmérsékleten

• Vakanciák mérete

- Sims - Baluffi kísérlet (1960) hőágulás és rácsállandó mérete (vakancia miatt is nő a V)

→ kétféle hőmérsékletből meghatározható a vakancia koncentráció

$$\frac{n}{N} = 3 \cdot \left(\frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta a}{a} \right)$$



Ellenállásmérés

↳ vakancia megnövekedés az ellenállást → szupervezetés tökéletes kristályrészlet 0K-en φ ellenében

↳ hőkezelés majd quenchelés

↳ ellenállásmérés hidegben (pl. foly. nitrogén)

↳ Mathiessen - szabály

$$R = R_0 + R_i \cdot n = R_0 + R_i \cdot N \cdot e^{-\frac{E_{vac}}{kT}}$$



$$\ln(R - R_0) = \ln(R_i \cdot N) - \frac{E_{vac}}{kT}$$

↳ meredekség arányos a képződési energiával

R₀-nak is van T függése
• melegebb → vakancia
• hidegebb hűtés → vakanciák maradvány

R₀ minőségi a

↳ Szenyevők

• extra atom a rácson

• Szubsztitúciós (helyettesítő): egy másik atom beépül az üres helyre
- pl.) Cu - Sn (bronz)

- anyagok tulajdonságait nagyban befolyásolhatja: pl. Fe: rozsdásodik, fémhővezető

Fe - (Ag/Ni/Cr): rozsdamentes, ált. paramágnes

• Intersticiális: a rácson kívül

- pl.) fcc-ben sok hely → oktaédres hely Fe → C beáztatás



Diffúzió

- Szenyevő atomok vándorolnak az anyagban, ált. vakancia mechanizmussal

- Deformációt okoz

- Alkalmazások: pl. H tartóssága Hg-ban

Szilárd - szilárd fázisátalakulás

- Markezitei gyors

↳ fcc - bcc átalakulás pl. Fe 912°C-on

↳ Videó



- Diffúziós lassú

↳ Sn (dróptestis): 13,2°C alatt gyémánt, felette tetragonális

az a szerkezet



Videó

Yellemző mennyiségek

Young modulus

- Rugalmasság (flexibility): $G = E \cdot \epsilon = \frac{F}{A}$ feszültség
 $\frac{\Delta l}{l}$ relatív megnyúlás

- Keménység: milyen könnyen törik el az anyag (Strength, hardness)

L Skálák:

- Mohr - féle skála (1-10): mi mit károsít meg
- Brinnell - féle skála: gölyb telennyomás \rightarrow nyom mérete alapján (átmérőmérés)
- Vickers - keménység: gyémánt gúla telennyomása

- Szívósság mennyire deformálható az anyag

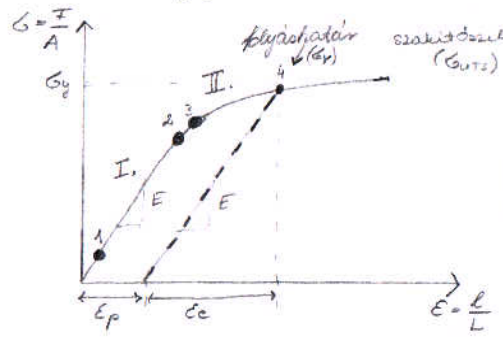
L szívós: acél, réz, bőr \rightarrow sok alkalmazásnál követelmény a szívósság pl. tengérszáj hajók
 L rideg: üveg, öntött vas

\rightarrow A jó anyag kemény?

- beton: kemény, olvad, de húzás esetén könnyen törik \rightarrow vasbeton
- vas: nem törik, kemény, de rozsdásodik és olvad

Feszültség - deformáció görbe

- Deformáció fajtái: Reális megnyúlás
1. Rugalmas alakváltozás: $G = E \cdot \epsilon$ Hook-törvény
 2. Maradandó (plastikus) alakváltozás



\rightarrow Plasztikai keménység
 • plastikus deformáció \rightarrow keményedés \rightarrow szívósság csökken (ridegebb)
 \rightarrow történik valami az anyagszerkezettel

- I. szakasz: rugalmas def. $\rightarrow G = E \cdot \epsilon \rightarrow$ lineáris (G_1)
 II. szakasz: maradandó def. \rightarrow ráppontban (h) új egyensúlyi helyzet alakul ki ha megállunk \rightarrow I. szakasznál II. szakasznál (G_2)

Gyémánt: Egy darabig nyúl, majd eltörik $\rightarrow G_{u2}$: szakítószilárdság

Plasztikus gyártása:

- L hegyelés \rightarrow vékony, de rideg \rightarrow csak deformációval nem készíthető vékony fólia \rightarrow ismétlődik
- L hőkezelés \rightarrow mozgékony atomok újraelrendezik a kristályt (megnyúlás, relaxáció) (ha elég szűk van a hegyelés, a hegyelés során kellően felmelegszik)

Elméleti folyásfeszültség

L hogyan deformálódik maradandóan az anyag?
 • Kristályos megmarad, csak az alakja változik

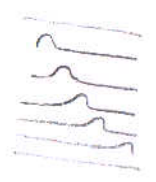


Elméletben: $G_y \approx \frac{G}{2\pi}$; $E_y \approx \frac{E}{2}$; G: nyírési modulus

L folyásfeszültség, ami után állandó alakváltozást szenved

Valóságban: $G_y \approx 10^{-3} G$; $E_y = 10^{-3} E \rightarrow \frac{1}{1000}$ akkora erő

$\approx 10m$ -es szénegyet amélt húzzunk úgy, hogy egy kis "okulát" tartunk rajta \rightarrow a diszlokációk haladnak az anyagban (vonalasni rácskiba)



Diszlokáció

- 1936: Taylor, Orowan, Polanyi
- valószínű rácshibák (letra atom a sík végén)
- Burgers kör:
 - L szabályos kristályban kört megtéve u-oda jutok vissza $\uparrow b$ u anyagi, $\downarrow b$ u anyagi
 - L diszlokáció esetén nem u-oda
- Burgers vektor: \underline{b} a kezdőpontból a végpontba mutató vektor
- irányvektor: \underline{l} a diszlokáció állását jellemző vektor

- Fajták:
 - eldiszlokáció: $\underline{b} \perp \underline{l}$
 - csavardiszlokáció: $\underline{b} \parallel \underline{l}$

- Kapcsolat a deformációval : \underline{b} Burgers vektor, diszlokáció elmozdul Δx -szel:

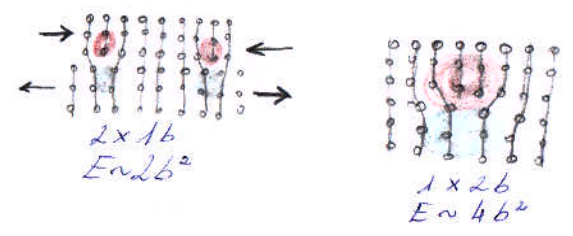
$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon_x = \frac{b}{L_y} \frac{\Delta x}{L_x}$$

• N diszlokáció esetén:

$$\epsilon = \frac{N}{L_x L_y} \cdot b \cdot \Delta x \rightarrow \epsilon = \rho \cdot b \cdot \Delta x$$

Orowan-összefüggés (diszlokációs sűrűséggel) (ρ)

- Tulajdonságok
 - L nyálmas rácsstruktúrát (deformációt) és feszültséget keltenek a kristályrácsban $G \sim \epsilon \sim b$
 - látszó energia: $E \sim G \epsilon \sim b^2$
 - L feszültségek hatására mozognak
 - egy diszlokáció kíváncsol az anyag szélére
 - sok diszlokáció összehatásait \rightarrow nem tud kíváncsolni



- Szerepe:
 - L kapcsolatot a mechanikai tulajdonságokkal
 - könnyen mozognak: lágy anyagok FCC
 - nehezen mozognak: kemény anyagok BCC ; ionkristály és kovalens kristály
 - b nagy \rightarrow keres \rightarrow nehezen mozog
 - \rightarrow nagyon kemény, rideg

Anyagok keményítése

- Akadályokat kell létrehozni a diszlokációknak
 - L más anyagból származó az anyagban: kiválasztás keményedése \rightarrow feszültség akadályozza a mozgást
 - L többi diszlokáció: diszlokációformás
 - ponthibák
 - felület
 - szemcsesokár
 - Frank-Read formás: feszültség hatására diszlokáció karkokat bocsát ki
 - L Oldott (szubsztitúció vagy intersticiális) atom
 - L szemcsesokár

Diszlokáció mechanizmus

- L Diszlokációk nyálmas feszültséget keltenek az anyagban
 - L statikus keményedés:
 - deformáció \rightarrow diszlokációk mozognak és sokszorozódnak \rightarrow akadályozzák egymás mozgását
 - \rightarrow keményedést az anyag
 - L Taylor-összefüggés: $G_y = \alpha \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2}$
 - G_y : folyófeszültség ; $0,1 < \alpha < 0,2$
 - G : nyálmas állandó ; ρ : diszlokációs sűrűség
 - L hidrázós keményedés: fennakadnak a hidrázókön
 - megkeméítés (Orowan mechanizmus)
 - átvágás: ha a hidrát és az anyag rácsa azonos irányban áll
 - L Szemcsesokár
 - minél finomabb szemcsék, annál keményebb anyag \rightarrow sok szemcsesokár
 - megfelelő szemcseméret hőkezeléssel vagy deformációval elérhető be
- Hall-Petch reláció:
 $G_y = G_0 + k \cdot d^{-1/2}$
 szemcsesokár

Vasérc

- a vas a földkéreg 2. leggyakoribb eleme tömeg szerint
- tipikus ércei: $Fe_2O_3 + Fe_2O_4 + FeO + \text{szilik} + \text{egyéb (gyepvasérc)}$

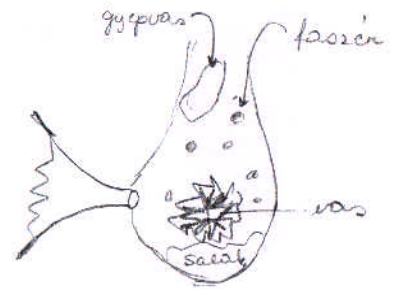
hematit

Bucavassgyártás

- ősi technológia, már a kőfoglaló magyarak is
- XVIII. sz. -ig működteték bucakemencét Európában
- Video

Bucakemence

- L alapanyagok: gyepvas + faszén
- L salak epj része megolvad és kifolyik
- L átalakulások: $2C + O_2 \rightarrow 2CO$
 $CO + FeO \rightarrow CO_2 + Fe \rightarrow Fe + \text{salak}$
- L hőforrás: a vas kalapácsolásánál megfűtött "telep"
- L jellemző: hidegsétus

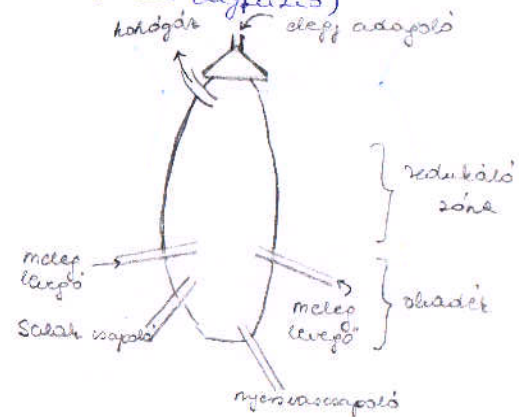


Martensites átalakulás

- szilárd-szilárd fázisátalakulás bcc (martenit) és fcc (austenit) fázis között
- L Pl. tiszta Fe 912°C-on
- a két fázis egymáshoz képest deformációval átvihető egymásba (nem kell hőszel diffúzió)

Nagyvasztó

- XVII. sz. - től
- olyan, mint a bucakemence, csak nagyobb
- nyersvas / öntöttvas nyervekő belőle
 - vas is megvasztható: vas a legnagyobb sűrűségű
 - alulra megy → folyékony vas és salak elválasztható
 - öntöttvas: nagyon törékeny → kevésbé használható
 - acél: vas + szén



Fázisdiagram

- fázis: a rendszer állandó fizikai és kémiai paraméterekkel rendelkezés közre
- fázisdiagram: fizikai paraméterek függvényében ábrázolja, hogy melyik fázis van jelen meg

Fizikai paraméterek (fémek → lefnyomás)

- koncentráció (két komponens esetén 1 paraméter)
- hőmérséklet

Gibbs-féle fázis szabály: $Sz = K - F + 1$

komponens száma
szabadsági fok száma
fázisok száma
nem + 2, mert a nyomás rögzített

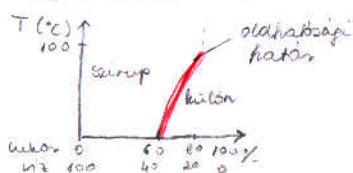
Pl) víz: 1 dimenziós fázisdiagramja 1 atmoszférán: $Sz = 1 - F + 1 = 2 - F$



$F = 1 \rightarrow Sz = 1 \rightarrow$ hőm. megválasztható

$F = 2 \rightarrow Sz = 0 \rightarrow T = 0^\circ C$ vagy $T = 100^\circ C$

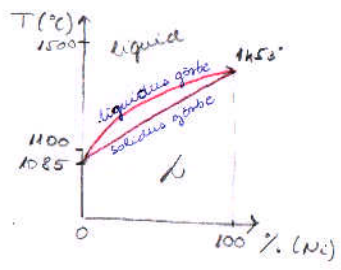
Pl. 1.: Cukros víz



- Mennyi cukrot tud feloldani az víz? → hőmérséklet függő
- Minél az összes cukor feloldódik, addig állandó fázis, mint a víz
- Maximal cukor → 2 fázis
- Csak cukor

$Sz = 2 - F + 1 = 3 - F \rightarrow F = 2$ mellett is van 1 szabadsági fok
→ hőm. megválasztható

Pl. 2 - Kéz-nikkel fázisdiagram

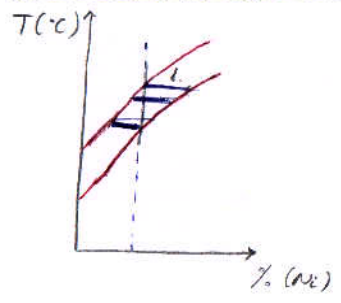


- Két komponensű rendszer
- Cu-Ni korlátlanul oldódik egymásba
- d_1 : Ni koncentráció \rightarrow kevesebb Cu, több Ni

$S_2 = 2 - F + 1 = 3 - F$

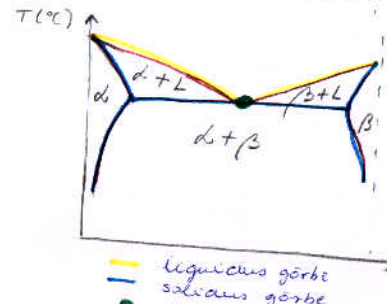
$F = 2 \rightarrow S_2 = 1 \rightarrow$ hóm. megvalósítható

- Dermedés folyamata



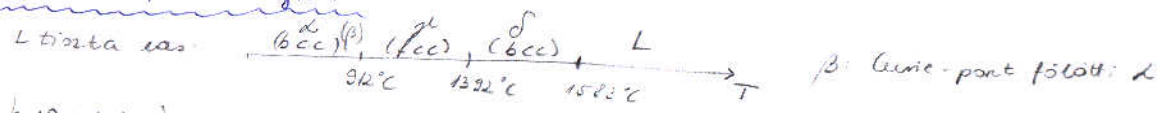
1. nagyobb koncentrációjú Ni darabok kiáznak
 \rightarrow folyadék koncentrációja csökken
 \rightarrow további hűtés
 L lassú hűtés: diffúzió \rightarrow egyenlítés \rightarrow homogén
 L gyors hűtés: ϕ megjelölés \rightarrow inhomogén $\rightarrow Ni$ koncentráció kifele csökken
- \Rightarrow savós tisztítás: 0: olvadni nem engedi meg a nicl
 \rightarrow bal oldalon sok Ni , kevés Cu
 \rightarrow Cu atomok összejárnak a jobb végén

- Pl. 3. - ólom-én fázisdiagram



- Két komponensű rendszer
- A: ólom: L fázisban kristályosodik ki
- B: d_1 : β
- Szubsztitúciós atomok: Sn belül a Pb helyére egy adott pontig
 \rightarrow kis Sn darabok megjelennek
- közepes tartomány: $S_2 = 2 - F + 1$
 $F = 3 (d_1, \beta, L) \rightarrow$ hóm. fix

- Vas-szén fázisdiagram



- L vas + szén: C intersticiális szennyező \rightarrow fcc-ben oktaéderes helyre bemegy
 • hibák \rightarrow diszlokációk nem tudnak mozogni
 • ha lehűtjük \rightarrow fcc \rightarrow bcc \rightarrow C kisebb helyen bekapad \rightarrow feszül a rács
 \rightarrow keményebb, mint a tiszta vas
- L 2 eutektikus pont

L Pl. hűtésre

- 2 eutektikus pont, szennyezés között eutektikus sávok
- különböző szerkezet és mechanikai tulajdonságok
 - cementit: károsít mentén törik
 - acél: kemény, de deformálható

L Nyersvas /öntöttvas

- nagyvasaságban feloldódik a szén az öntött vasban
 \rightarrow eutektikus pontba hull \rightarrow ~4% C
- megszilárdulás után magas C-tartalom \rightarrow cementit (Fe_3C) és grafit kioldódik
 \rightarrow kemény, de rideg \rightarrow törik
- buccavasgyártás: vas nem olvad meg \rightarrow szilvasos szerkezet
 \rightarrow szén kiegészítő beöle

Acélgyártás

L szén oxidálódása a nyersvasból (oxigén a vashoz): $Fe + C + O_2 \rightarrow Fe + CO_2$

- kavárfésszítés (szélen)
- Martin kemence (50-100 t/é)
- konverter: kibuborítókodás (most)

L ötvöztetés + a megfelelő mikrostruktúra kialakítása

L öntés + hengerezés

L hőkezelés:

- edzés: hirtelen lehűtés hideg vízben. C beárad, nem nő a cementit sziget
 - megereztes: visszamelegítés elválasztás
- } kemény és szívós szerkezet

L Gazdaságosság:

- klasszikusan 4 keletés
- ma csak 1 keletés
- V folyamat 1 helyen

L Damaszkuszi acél

- kemény és szívós
- felületén jellegzetes mintázat
- technológiája elveszett
 - 1000°C-ra hevítési (fekelő nap a sütőpóban)
 - 800°C-ra lehítési (király bíbor színe)
 - 31°C-os vízben edzési (sávosága teste)
- magas C tartalom (2%)
- mintázat: cementit hálót
- szívósság: hideg kovácsolás (650-850°C) → cementit hálót felbontás

L Modern acélok

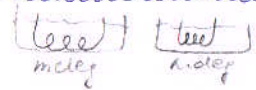
- rozsdamentes acél
 - min. 10,5% ötvöző
 - 18% króm, 10% nikkel
 - ált. fcc, nem mágneses
- ötvözők: Cr, Ni, V, Mo, Mg
 - hatással vannak a cementit kialakulására
 - eltávolítják az óxidokulási hőmérsékletet

Kísérletek

- L Rezdőt + kulcs - Rezdőt elbija a kulcsot
 - Felhevítve már nem bírja el
 - Deformálás után ismét elbija

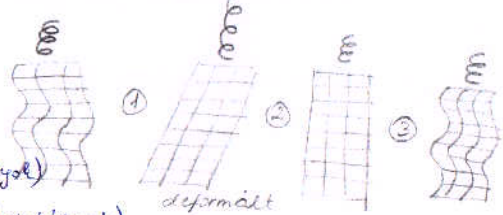


- L Nikkel-titánium ötvözet: - nygó
 - meleg vízben kinyúlik, hidegben összehúzódik



Videók

- L Emlékerészekből készült nygó: - kihajtogatással → hajszelvények hatására újra nygódó készlet össze
- L Oxoszi műszer: - ebbe fektetve nygó alakú lesz
 - korábban a tok miatt nem
- L Nitinol hőerőgép: - a fémszal alja forró vízbe ér → „emlékerik” (megnyúlás v. összehúzódás)
 - forgatónyomatékokat fejt ki



acél (nikkel-titánium ötvözet hasonló)

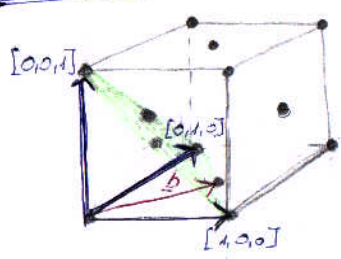
Martenzites átalakulás

- 1) martenzit: BCC (tűkristályok)
- 2) felmelegítve: FCC (∅ tűkristályok)
- 3) újra lehűtve: BCC (tűkristályok v. u. ott)

Állományok

- L Oxoszi, ártéchnológia
- L Repülés
- L Nitinol hőerőgép

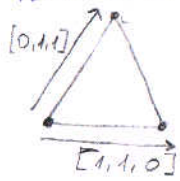
Diszlokációk FCC anyagban



L Bázisvektorok: $\underline{a}_1 = \frac{a}{2} \cdot [0, 1, 1]$; $\underline{a}_2 = \frac{a}{2} \cdot [1, 0, 1]$; $\underline{a}_3 = \frac{a}{2} \cdot [1, 1, 0]$

L Burgers-vektor: $\underline{b} = \frac{1}{2} [1, 1, 0]$ (12 irány van)...

L Lejövő síkon mozgások? A szomszédos illeszkedési sík az $\{111\}$ sík
 Utlővektor $[0, 1, 1] \times [1, 1, 0] = -a_2, a_1, a_3$



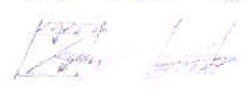
- $\{111\}$: (111) ; $(\bar{1}\bar{1}1)$; $(\bar{1}1\bar{1})$; $(1\bar{1}\bar{1})$
- $\langle 110 \rangle$: $[110]$; $[1\bar{1}0]$; $[10\bar{1}]$; $[\bar{1}01]$; $[011]$; $[0\bar{1}1]$...

L ifjú $\{111\}$ síkok

- ABCABC szerkezet
- rétegszerű hiba pl. ABCBCABC

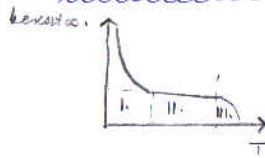
L Csúszási rendszerek FCC-ben

- Thomson-tetraéder: $4 \times 3 = 12$ csúszási rendszer (bordába rajzolt tetraéder)
 - 4 síkban a 6 $\frac{1}{2}$ (mert a mozgások a diszlokációk)
- parciális diszlokációk: szalagszerű diszlokációs szerkezet (diszlokációs felrakódás)
- keresztcsúszás: diszlokációval akadályba ütközött
 - öszenyomás v. meleg hatására összehúzódik ismét egy irányba, ami kettéválik
 - továbbhaladás más irányba
- lőmér-lőtérrel akadály: 2 különböző síkon mozgó diszlokáció összehúzódik az él mentén (páruja és a közöttük lévő rétegszerű hiba megmarad)
 - az így keletkező akadály más nem tud mozogni, de van feszültsége



11 sík → 3 s mozgás

L hőmérséklet hatása



- I. Alacsony hőmérsékleten: termikusan aktívak folyamatok GÁTORVA vannak
- II. A diszlokációk könnyen mozognak
- III. Magas hőmérsékleten a diszlokációt nagyon könnyen mozognak
→ diffúzió és diszlokációs mozgás

L FCC anyagok plaszticitása

- folyásfeszültség: gyengén függ a hőm.-től és a deformáció sebességétől
→ diszlokációs mozgás SEM termikusan aktív
- alakítás: 2. szakasz kezdete függ a hőm.-től
→ keresztmetszés termikusan aktív

Diszlokációk BCC-ben

L Burgers-vektor: $b = \frac{1}{2} \langle 111 \rangle$

L Kétszintű (200s illeszkedési) csúszási sík

- lehet $\{110\}$ $\{123\}$ $\{112\}$

→ nagy a rétegződési hiba energia → nincs felhasadás parciális diszlokációkra (energetikailag kedvezőbb lenne)

L Diszlokációs mozgás kiterjedt

L Termikusan aktív mozgás: diszlokációk nehezen mozognak → magas hőm. kell
→ kényes-pár mechanizmus

L BCC anyagok plaszticitása

- folyásfeszültség: erősen függ a hőm.-től és a deformáció sebességétől
- keményebbek, mint az FCC anyagok

Anomális folyás

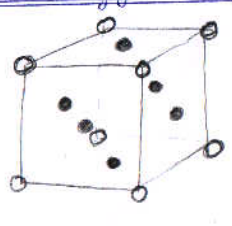
L Leptöbb kristályos anyag melegítés hatására puhul

L Anomális folyás: az anyag melegítés hatására keményebb lesz

- Pl. Ni_3Al , $NiTi$ intermetallikus ötvözet

L Alkalmazás: nagy szilárdság kell magas hőm.-en (600-1000°C)

L $\frac{1}{2}$ (elepkettő) szerkezet



● Ni
○ Al

- Pontosság: egyszerű köbös síkmezret: Al atomok úgy helyezkednek el, hogy minél messzebb legyenek egymástól

- Rétegződési hibák az $\{111\}$ síkon:

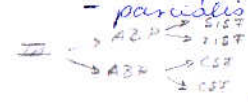
- APB
- CSF
- SISF

L Diszlokáció szerkezet

- Burgers-vektor: $b = \langle 110 \rangle$ (kettő kell a $\frac{1}{2}$ felosztásból)

- parciális diszlokációk: $[-101] = \frac{1}{2}[-101] + \frac{1}{2}[-10\bar{1}]$: felhasad két APB-ra

$\frac{1}{2}[-101] = \frac{1}{6}[-211] + \frac{1}{6}[-1\bar{1}2]$: felhasad két CSF-re vagy SISF-re



Anomális folyás oka

- L CSF és SISF keresztmetszetei
 - termikusan aktív
 - immobil diszlokációt eredményez
 - energetikailag kedvezőbb

L Kear-Wilsdorf akadály: magas hőm. megújul → anyag meleg hatására keményebb lesz

• Szuperötvözet: olyan fém, ami nagyon magas hőmérsékleten is nagyon kemény (által. FCC)

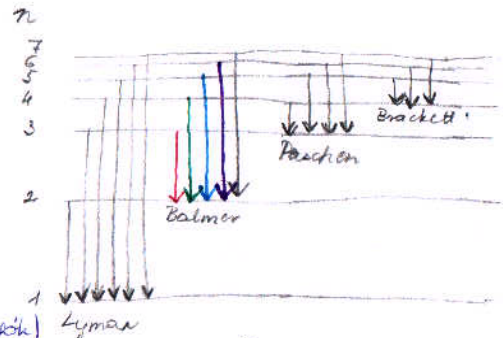
Színkép

- L gázol. ionális színkép
- L folyadékok és szilárd anyagok: folytonos } mi okozza a különbséget?
- L Hidrogén színképe
 - diszkrét vonalok (gázkiürülésben)
 - abszorpció (elnyelés) } komplementerek
 - emisszió (kibocsátás)

Diszkrét energiaszintek

$E(n) = - \frac{m \cdot e^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = - \frac{Ry}{n^2} \rightarrow 10^5 \text{ eV leba}$

- n: főkvantumszám
- Ry = 13,6 eV : Rydberg
- lehetséges átmenetek: $E_{ij} = E(i) - E(j)$



Atomi állapotok

L Schrödinger - egyenlet (ha a relativisztikus hatások elhanyagolhatók)

$\hat{H} \psi(r) = \left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \right] \psi(r) \rightarrow \text{megoldás: } \psi_{nlm}(r) = A \cdot e^{-\frac{r}{n a_0}}$

Ell. $-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta (A \cdot e^{-\frac{r}{n a_0}}) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \cdot A \cdot e^{-\frac{r}{n a_0}} = E \cdot A \cdot e^{-\frac{r}{n a_0}}$

$r = |r| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

$\frac{\partial}{\partial x^2} \cdot (A \cdot e^{-\frac{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}{n a_0}}) = \dots = \frac{A}{n a_0^2} \cdot e^{-\frac{r}{n a_0}} \cdot \frac{x^2}{r} - \frac{A}{n a_0} \cdot e^{-\frac{r}{n a_0}} \cdot \left(\frac{1-x^2}{r^2}\right)$

$\Rightarrow \Delta (A \cdot e^{-\frac{r}{n a_0}}) = \frac{A}{n a_0^2} \cdot e^{-\frac{r}{n a_0}} - \frac{A}{n a_0} \cdot e^{-\frac{r}{n a_0}} \cdot \frac{2}{r}$

$\Rightarrow \text{behelyettesítés: } E = - \frac{m}{2\hbar^2} \cdot \frac{e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2}$

- n: főkvantumszám (1, 2, ...)
- l: mellékvantumszám (0, 1, ..., n-1)
- m: mágneses kvantumszám ($\pm l, \dots, 0$)
- \rightarrow az energia csak n-től függ!
- ms: spin kvantumszám ($1/2, -1/2$)

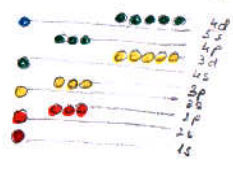
L Pauli-elv: azonos kvantumszámokkal max. 1 db e^- rendelkezhet

Atomi pályák

- L megtalálási valószínűség $\propto |\psi|^2$
- L pályák:
 - 1s: n=1, l=0 \rightarrow 2 db ($m=0, m_s = \pm 1/2$)
 - 2s: n=2, l=0 \rightarrow 2 db
 - 2p: n=2, l=1 \rightarrow 6 db ($m=0, \pm 1; m_s = \pm 1/2$)
 - 3s: n=3, l=0 \rightarrow 2 db
 - 3p: n=3, l=1 \rightarrow 6 db
 - 3d: n=3, l=2 \rightarrow 10 db ($m=0, \pm 1, \pm 2; m_s = \pm 1/2$)

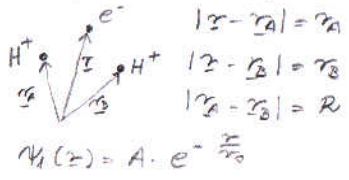
Több elektron esetén

- L $E(n) \sim 4 \cdot \frac{Ry}{n^2}$: jelentős $e^- \cdot e^-$ kölcsönhatás (1. e^- : 24,6 eV ; 2. e^- : 54,4 eV = $4Ry$)
- L Energiaszintek módosulnak \rightarrow azonos kéjron lévő pályák energiája nem azonos
- L Schrödinger - egyenlet jó $s < p < d$



Hidrogén molekula ion (H_2^+)

L két p^+ kerében egy $e^- \rightarrow$ Schrödinger egyenlet megoldása alapállapotban



$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(r) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r_A} \psi(r) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r_B} \psi(r) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{R} \psi(r) = E \cdot \psi(r)$

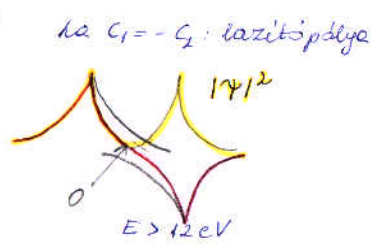
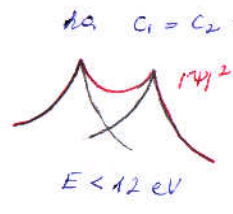
\rightarrow bizonyult \rightarrow eredmény megsejtése

- elvároljuk a 2 mozgót: $\psi_A(r) = C_1 \cdot e^{-\frac{|r-r_A|}{a_0}} = C_1 \cdot \psi_1(r-r_A)$
- $\psi_B(r) = C_2 \cdot e^{-\frac{|r-r_B|}{a_0}} = C_2 \cdot \psi_2(r-r_B)$

$\rightarrow \psi_1$ jó, de a középpont nem az origóban van

$\Rightarrow |C_1| = |C_2| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ (lehet komplex is) vagy az e^-)
 \Rightarrow belátható, hogy $\Psi(x) = C_1 \cdot \Psi_1(x - x_A) + C_2 \cdot \Psi_2(x - x_B)$

Kötő és lazító pályák



- \rightarrow kötőpálya energiája kisebb $\Rightarrow H_2^+$ stabil
- $\rightarrow H_2$ két e^- -ja be tud élni az alacsony energiaszintre \rightarrow molekula ként kedvezőbb

Energiaszintek

- H_2^+ : - 2 e^- a kötőpályán
 - alacsonyabb energia \rightarrow stabil
- He_2^+ : - 2 e^- kötőpályán, 2 e^- lazítópályán
 - magasabb energia \rightarrow instabil (+ magok taszítása)

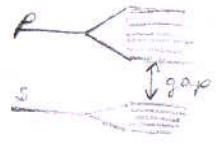
- Molekula pályák:
- Az atomok s pályái 2 σ pályára hasadnak fel, egy kötőre és egy lazítóra
 - Hasonlóan p pályák 2 π pályára (kötő és lazító)

Nagy atomszám esetén

- N atom esetén 1 atomi pálya N molekula pályára hasad fel
- \rightarrow szilárd testekben az energiaszintek \sim folytonosak helyeskednek el \Rightarrow folytonos sávok

Sávszerkezet

- Az s és p pályák folytonos sávokká szélesednek, de nem feltétlenül fednek át
- \rightarrow sávok közötti "lyuk": gap
- \rightarrow energiaszintek valamennyire be vannak töltve (Fermi energia)
- vezető: nincs gap a Fermi energia fölött
- szigetelő: van gap - σ -
- félvezető: kicsi gap



- Li : 1 e^- a külső héjra \rightarrow kiszélesedett s sáv felépítésre \rightarrow jó vezető
- Be : betöltött s héj \rightarrow dielektromos, de p és s átfed \rightarrow vezető
- B : 1 e^- a p héjra \rightarrow elvileg vezető, de a kristályszerkezetben egy cellában páros söt B atom van \rightarrow szigetelő
- C : gyémánt szerkezet: gap 5,5 eV, átlátszó

Elektronos áramlás

↳ Homogén $\rightarrow e^-$ magasabb energiájú állapotba ugrik (vándorol) \rightarrow lyuk keletkezik $v \oplus$ töltés
(a Pauli-elv már nem akadályozza a mozgásban)

↳ Áramsűrűség: $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$ az $U=I \cdot R$ lokális megfelelője ($\sigma = \frac{1}{\rho}$; $\rho = \frac{\rho \cdot l}{A}$)

↳ Fémek fajlagos ellenállása (ρ)

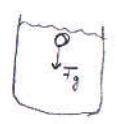
- Ellenállás oka: rándkibát (szennyezőáramok, vakanciók, stb...)
 \rightarrow minél rendezettebb, annál jobb vezető \rightarrow szupravezetők: tisztán periodikus szerkezet
- Hőmérséklet-függés: $\rho(T) = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$ ρ_0 ellenállás 0K-en (maradék ellenállás)
- Pl.: fűtőhuzal erősen szennyezett \rightarrow nagyobb ellenállás
• üllanykörte: betáplálásakor meggy bönkít, mert kicsi az ellenállás
(áram összehúzza a fűtőhuzal vezetéket \rightarrow nem bírja bírni)
- Ötvözés hatására az ellenállás nő, külön p-vezetők, de egymást szennyezik
 \rightarrow szilícium ötvözeteknél minimuma van ($B=Cu, A=Ag$)

↳ Drude-modell

rossz, mert golyóként kezeli az e^- -okat \leftrightarrow kvantummechanika
Szabad e^- -ok mozgása E -ben és a \oplus töltésű atommagok területén
 $\leftarrow E$ -ben az e^- -ok jobbra haladnak, ütköznek a \oplus -kal, pattognak, de
összeségében jobbra haladnak



- Hasonló, mint golyó mozgása viszkózus közegben (pl. víz)



$F = m \cdot a = F_g - k$
 $m \cdot \dot{x} = m \cdot g - k \cdot x$

$\ddot{x} = g - \frac{k}{m} \cdot x \xrightarrow{\frac{k}{m} = \lambda} \ddot{x} = g - \lambda \cdot x$
keresni feltétel: $v(t=0) = 0$
 $x(t) = A \cdot e^{-\lambda t} + \frac{g}{\lambda}$ } $A = -\frac{g}{\lambda}$
homogén + inhomogén egy. megoldása

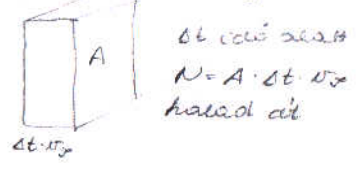
$\Rightarrow x(t) = \frac{g}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda t})$ [T]-s $\tau := \frac{1}{\lambda} \Rightarrow v(t) = g \cdot \tau \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = v_{\infty} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$
 $g \cdot \tau = v_{\infty}$ mert, ha már nem gyorsul, akkor $0 = m \cdot g - k \cdot v_{\infty} \rightarrow v_{\infty} = \frac{m \cdot g}{k} = \frac{1}{\lambda} \cdot g = \tau \cdot g$

- Hasonló, mint szabad e^- súrlódó mozgása E -ben

• $F = m \cdot a = e \cdot E - k \cdot v$ rándkibát okozta súrlódás arányos v -vel $\frac{m}{k} = \tau$
 $\rightarrow e \cdot E = k \cdot v_{\infty} \rightarrow v_{\infty} = \frac{e \cdot E}{k} = \frac{e \cdot E \cdot \tau}{m}$

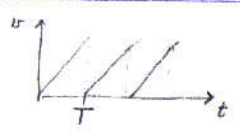
• Elektromos áramsűrűség: $\vec{j} = e \cdot n \cdot v_{\infty} = \frac{e^2 \cdot n \cdot \tau}{m} \cdot \vec{E}$ n : töltéssűrűség [$\frac{1}{m^3}$]
 $1.6 \cdot 10^{19} C$ $9.1 \cdot 10^{-31} kg$

• Elektromos vezetőképesség: $\sigma = \frac{e^2 \cdot n \cdot \tau}{m}$
• Fajlagos ellenállás: $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{e^2 \cdot n \cdot \tau}$



$\Rightarrow j = e \cdot \frac{N}{A \cdot \Delta t} = e \cdot n \cdot v_{\infty}$

\rightarrow az ütközési idő: τ



$v(t) = a \cdot t = \frac{e \cdot E}{m} \cdot t \rightarrow v_{max} = \frac{e \cdot E}{m} \cdot T$
 $\langle v \rangle = \frac{v_{max}}{2} = \frac{e \cdot E}{2m} \cdot T$ } $T = \frac{2 \cdot m \cdot \langle v \rangle}{e \cdot E} = 2 \tau \rightarrow T \sim \tau$

\rightarrow Pl.: klasszikus számcsenni adatai:
↳ jó: átlagos szabad úthossza

nem jó: hőmérséklet-függés

- Matthiessen-szabály: a többféle akadályból fajlagos ellenállás összeadódik

$m \cdot a = e \cdot E - \frac{m}{\tau_1} v - \frac{m}{\tau_2} v - \dots ; \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \dots ; \rho = \rho_1 + \rho_2 + \dots$

- Wiedemann-Franz törvény

$\frac{\kappa}{\sigma T} = L = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left(\frac{k}{e}\right)^2 = 2.45 \cdot 10^{-8} \frac{W \Omega}{K^2} \pm 10\%$ κ : hővezetési egy. hány; L : Lorenz szám

- Drude modell korlátai

- kiindulás csöke \neq fizikai megfigyelés
- e^- nem golyó, hanem hullám is

Kémiai potenciál

- ↳ $\mu = \frac{\partial F}{\partial N}$ a szabadenergia részecskeszám szerinti deriváltja
→ megmondja, mennyivel változik a szabadenergia egy részecske beiktatása esetén
- ↳ if részecskét a magasabb kémiai potenciál felől az alacsonyabb felé áramlanak
→ a teljes rendszer szabadenergiaja csökken
→ egyensúly esetén a kémiai potenciál közel ugyanaz → intenzív term. din. változó

Hőmérséklet hatása

- Fermi - Dirac eloszlás: Ha a rendszer egy rögzített T hőmérsékleti tartállyal van kapcsolatban, akkor az E_i energiájú állapot betöltöttségének valószínűsége arányos $e^{-\frac{E_i - \mu}{kT}}$ -vel. ($f_0(E_i)$)
 - N db részecske, melyre érvényes a Pauli-féle kizárás elv (fermionok): $f_0(E_i) = \bar{n}_i = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu}{kT}} + 1}$
 - \bar{n}_i : az i állapotban lévő részecskék száma az elérhető ciklusok
 - OK - ca a Fermi-energia éppen μ → ha hozzáadot egy részecskét, a részecske energiája μ lesz
 - szabadhőmérsékletek $kT = 25$ meV (a sávok tipikus energiaszélességei (2-5 eV) képest kicsi)

Állapotsűrűség $D(E)$ vs $S(E)$: Egyfajta térfogatban hány E energiájú állapot van

→ az energiaszintek eloszlása nem biztos, hogy egyenletes

- Egyfajta térfogatban összesen N db e^- van
$$N = \int D(E) \cdot f_0(E) dE \rightarrow \mu(T) \text{ meghatározható}$$

↘
E energiájú állapot betöltöttségének valószínűsége

Kontakt potenciál

- ↳ 2 különböző semleges fém vezeték a kémiai potenciál különböző
→ összeköttetésük → e^- áramlás a kisebb kémiai potenciál felé → a két fémdelel fém potenciálra megindulnak → feszültség alakul ki
- ↳ függ a hőmérséklettől
- ↳ Termofeszültség: $U = \alpha \cdot (T_2 - T_1)$ α : 10-100 $\mu V/K$

Bevezetés

↳ Félvezető: Olyan anyag, mely vezetőképesség alapján a fém és a szigetelő közé esik

Alkalmazások

- Dióda
- Transzisztor
- LED
- Fénydetektorok (CCD)

} → a 20. és 21. század egyik meghatározó technikája

Vezetési sáv és gap

↳ Félvezetőkben és szigetelőkben gap van a vegértéksáv és a vezetési sáv között (E_g)

$1.5 \text{ eV} < E_g < 3 \text{ eV}$ pl. Si, Ge,

↳ Melegben egyre több e^- gerjesztődik a vezetési sávba:

- Uved: üveg vezetése



Szilícium

Gyémánt szerkezet

- kovalens kötéssel
- 4 atomnak 4 szomszéda van
- tetraéderes szerkezet

↳ Vezetési tulajdonságok: Intrinszik (tiszt, tökéletes) félvezetők

- Fermi-Dirac statisztika: $f_0(E) = \bar{n}_E = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{kT}} + 1}$

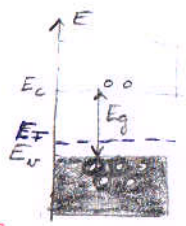
→ ha $E - \mu \gg kT$: $f_0(E) \approx e^{-\frac{E-\mu}{kT}}$

→ ha $E - \mu \ll -kT$: $f_0(E) \approx 1 - e^{\frac{E-\mu}{kT}}$

- Gerjesztett e^- -ok száma: $n = N_C \cdot e^{-\frac{E_C - \mu}{kT}}$

- Lyukak száma: $p = P_0 \cdot e^{-\frac{\mu - E_V}{kT}}$

$n = p \rightarrow n = \sqrt{n \cdot p} = \sqrt{P_0 \cdot N_C} \cdot e^{-\frac{E_C - E_V}{2kT}} = C \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ → a vezető elektronok száma az E_g függvényében változik



→ $E_C - E_V = E_g$

- Drude-modell alapján: $\sigma = \frac{e^2 \cdot n \cdot \tau}{m} = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$

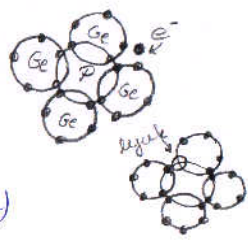
- A lyukak is vezetnek, de a lassabbak, és így a drift sebesség kisebb lehet

↳ Vezetési tulajdonságok: Extrinsic félvezetők

- Tiszta félvezetőbe adalekanyagot keverünk (dope-olás)

• n-típusú vezetők: extra e^- -t ad
↳ elem az V. oszlopból: P, As (donor atom)
↳ interkoncentráció

• p-típusú vezetők: extra lyukat ad
↳ elem a III. oszlopból: B, Al, In (akceptor atom)



• hasonló hatás, ha GaAs-ben Ga és As nem pont 1:1 arányban van

- Az e^- -donor ill. lyuk-akceptor kötés^o + Si/Ge szilícium hálójára

→ 10-20 MeV gerjesztés → e^- → vezetési sáv (n-típusú) → e^- vezet

→ vegyérték e^- → lyuk (p-típusú) → lyuk vezet

- A donor és akceptor energiaszintek lokalizáltak → nem járulnak hozzá a vezetéshez

Hall - effektus: feltételekben áram → sebesség → potenciális sebesség

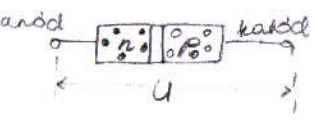
L Hall - feszültség: $U_H = -\frac{IB}{qnd}$

d: a vezetési B-vel // vastagsága

L Hall - ellenállás $R_H = -\frac{1}{qn}$ → $U_H = R_H \cdot \frac{B}{d}$

L töltés - sűrűség kölcsönhatás → R_H módosul. $R_H = -\frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{qn}$

Dióda = n-p átmenet:



- $U < 0$: á kiüresített tartomány nő → zár (U kisebbége töltéshozadék vezetnek, de kevesek vannak)
- $U > 0$: á kiüresített tartomány keskenyebb lesz, az e^- -ok átjutnak, majd rekombinálnak a lyukakkal → nyit (U többségi hordozók vezetnek)

L áramerősség: $J = J_s \cdot (e^{\frac{eU}{kT}} - 1)$

LED (Light-Emitting Diode)

L e^- és lyuk találkozására → energia szabadul fel. $E \approx E_g$

- nyitott állásban $e^- \rightarrow p$ -rétegbe

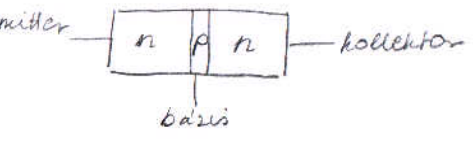
L látható fény: 1,7 - 3,4 eV

- Gap energia: Si - 1,1 eV; GaAs - 1,4 eV; GaP - 2,26 eV; GaN - 3,4 eV
- fehérek: fotonvesztékó réteg: kék + sárga = fehér
- infravörös: zöld
- kék

Tranzisztor

L Bipoláris tranzisztor

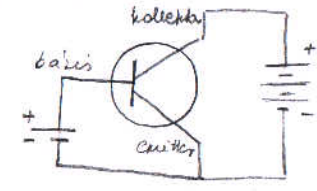
- n két szembekapcsolt dióda, ahol a p réteg nagyon vékony (d: diffúziós hossz \gg l: vastagság)



- emitter: földelt
- bázis: - ha földelt → áram
- ha U → e^- -ok bejutnak a p rétegbe → kevés lyuk → nem e^- rekombinálnak → U hatására továbbmennek a kollektorba

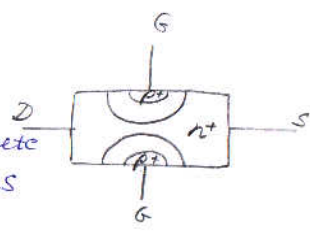
- kis kapcsoló

- Erősítés: - $U_{bázis} < U_{kollektor}$
- $I_{bázis} \ll I_{kollektor}$
- bázis feszültséggel a kollektoráram kapcsolható
- Előnyök: - kicsi
- más anyagok alkalmazás
- megbízható
- olcsó

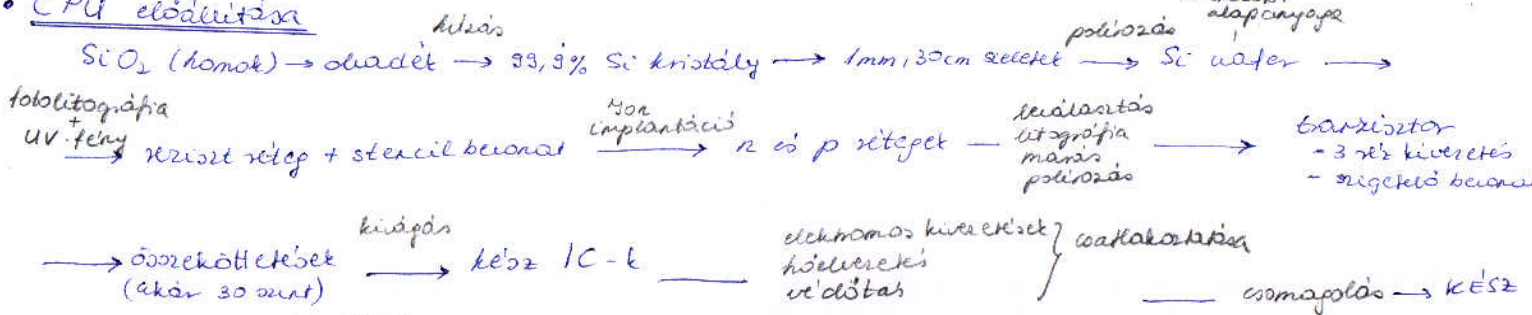


L FET (Field Effect Transistor)

- kapufeszültség → kiüresített tartomány mérete
- megfelelő értéknél a bázisztor eset D-S



CPU előállítás



L technológia fejlődése

- Moore törvénye: tranzisztorok száma az átkapált áramkörökben 2 évente megduplázódik
- méretskála: 22nm-es → akár: 5nm (alapít effektus)

Mágneses tulajdonságok

- L Diamágnes: mágnesség külső mágnesség tér hatására, kölcsönösen nem. Pl: Cu, Au, Hg, Pb
- L Paramágnes: mágnesség külső tér hatására, költönösen nem. Pl)
- L Ferromágnes: Külső mágnesség tér hatására mágnesség kelet és megnagyobb. Pl, Fe, Ni, ötv. elemek

$\chi < 0$ (diamág)
 $\chi > 0$ (paramág)

Alkalmazások:

- L Transzformátor
- L Elektromágnes
- L Elektromos motor
- L Adattárolás (HDD)
- L Hangfal

Maxwell - egyenletek

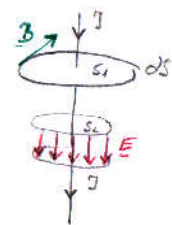
- $\text{div } \underline{D} = \rho_{sz}$ ρ_{sz} elektromos tér forrása a töltések
- $\text{rot } \underline{E} = -\frac{\partial \underline{B}}{\partial t}$ ρ_{sz} időben változó mágneses tér elektromos teret kelt
- $\text{div } \underline{B} = 0$ ρ_{sz} mágneses monopólus nem létezik, \underline{B} -nek nincs forrása
- $\text{rot } \underline{H} = \underline{j}_{sz} + \frac{\partial \underline{D}}{\partial t}$ ρ_{sz} áram és az időben változó elektromos tér mágneses teret kelt

\underline{E} : elektromos térerősség
 \underline{D} : elektromos eltolás
 \underline{B} : mágneses indukció
 \underline{H} : mágneses térerősség
 ϵ : permittivitás
 μ : permeabilitás

- L Vákuumban: $\underline{D} = \epsilon_0 \underline{E}$ $\underline{H} = \frac{\underline{B}}{\mu_0}$
- L Középen: $\underline{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \underline{E}$ $\underline{H} = \frac{\underline{B}}{\mu_0 \mu_r}$
- L Lorentz-erő: $\underline{F} = q \cdot (\underline{E} + \underline{v} \times \underline{B})$

Mágnesség

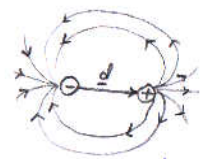
- L $\text{div } \underline{B} = 0$ ρ_{sz} mágneses erővonalaknak nincs forrása \rightarrow nincs mágneses monopólus
- L $\text{rot } \underline{H} = \underline{j}_{sz} + \frac{\partial \underline{D}}{\partial t}$: Változó elektromos tér körül mágneses tér indukálódik (jobbkezes sz.)
 ρ_{sz} mágneses térerősségvonalak megkerülik a áramok áramkörét: $H(z) = \frac{I}{2\pi r}$



2sáktételre integrálunk: $\oint \text{rot } \underline{H} \cdot d\underline{l} = 0 = H \cdot 2\pi R \cdot \pi \rightarrow$ kell az áram áram (D) külsőben felület függő
 Ha kikapcsoljuk az áramot \rightarrow állandó $\underline{E} \rightarrow \frac{\partial \underline{D}}{\partial t}$ kell
 Helyesen: $\text{rot } \underline{H} = \underline{j} \rightarrow \oint \text{rot } \underline{H} \cdot d\underline{l} = H \cdot 2\pi R = I$

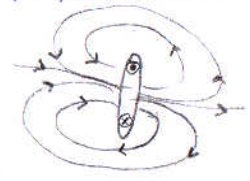
Elektromos köráram

- L Elektromos dipólus
- $D(z) = \frac{1}{4\pi} \cdot \left(\frac{3z(p \cdot z)}{r^5} - \frac{p}{r^3} \right)$
- momentum: $p = q \cdot d$
 p : töltés nagysága
 d : két töltés távolsága



Mágneses dipólus

- $H(z) = \frac{1}{4\pi} \cdot \left(\frac{3z(m \cdot z)}{r^5} - \frac{m}{r^3} \right)$
- momentum: $m = I \cdot f$
 f : áramerősség
 f : felületvektor

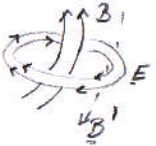


Momentumra káid' erő

- L Külső térben az áramú forgatónyomaték hat a Lorentz-erő miatt: $\underline{E} = -\nabla \phi$
- \rightarrow a mágneses dipólus a külső tér irányába áll be
- \rightarrow a m. et elforgatja B irányába
- \rightarrow Lorentz-erő szabad töltésen nem tud munkát végezni. De! Ha van kölypszer $\Rightarrow F_z$ komponense végezhet munkát
- Pl.) \rightarrow \rightarrow D gyűlni munkát végez a 2. gyűlni

Örnyékáramok \rightarrow Zeeman - törvény

L Indukció: Változó mágneses térer. indukál elektromos térer. indukál $\Theta \rightarrow$ balkezes szabály
 \rightarrow áramok indulnak meg, melyek mágneses térer indukálnak $\rightarrow \vec{B}$
 \Rightarrow az indukált mágneses térer ellentétes irányú mint az eredeti külső térer



Mágneses anyagok

L Anyagban kis áramok \rightarrow mágneses

L Kis mágneses momentumok nagy momentummá állnak össze $\underline{M} = \frac{m}{V}$ mágneses momentum-sűrűség $[\underline{M}] = \frac{A}{m}$

- $\underline{H} = 0 \rightarrow \underline{H} = 0$
- $\underline{H} \neq 0 \rightarrow \underline{M}(\underline{H}) = \chi \cdot \underline{H}$ χ : mágneses szuszceptibilitás

$\underline{B} = \mu_0 (\underline{H} + \underline{M}) = \mu_0 (1 + \chi) \cdot \underline{H} = \mu_0 \mu_r \underline{H}$

Diamágneses anyagok

- az atomoknak (e^- -nak) nincs eredő mágneses momentum \rightarrow nincs áram
- „Ön-áramokat” indukál a külső térer. $\chi < 0$
- Pl.: Bi, Ag, Víz, Grafit (nagy χ)
 L mintha szupravezetőben keringenének az e^- -ok
 \rightarrow ha a külső \underline{H} változása megpróbál indukálni áramot a mágneses térer megmarad
 \Rightarrow a grafit tud lebegni egy erős mágnes felett

Atom mágneses momentumok

e^- körpályán: ha $m_e \neq 0$ (mágn. kvantumszám) $\Rightarrow e^-$ -nek van impulzusmomentuma

$m_{pálya} = \underline{J} \cdot \underline{A} = \frac{-e \cdot v}{2\pi r} \cdot r^2 \cdot \pi = -\frac{e r}{2} \frac{p}{m_e} = -\frac{e}{2m_e} p r = -\frac{e}{2m_e} \hbar = -m_l \frac{e \hbar}{2m_e}$

\hbar : impulzusmomentum $\hbar = m_e \cdot \hbar$

Spin: $m_s = \pm 1/2$ spin kvantumszám

$m_{spin} = -m_s \frac{e \hbar}{m_e}$

Paramágneses anyagok

- az atomok elektronszerkezetük VAN mágneses momentum
- körmozgás miatt \neq kitüntetett irány
- külső \underline{H} hatására a momentumok beállnak a térer irányába $\chi > 0$
 - Lenz-törvény: saját indukált \underline{H}
 - Lorentz-erő: forgatónyomaték \rightarrow győz
- Pl.: Al: első elem, ahol $m \neq 0$ felesleges

Szilárd testek

- át pályamomentumok nem adhat mágneses járulékot (teljesen betöltött pályának \neq mágn. mom.)
- Főleg a 3d és 4f e^- -ok spinje számít (betöltetlenek)
- Peridanson rendszerben a középső fémeknek det. van mágneses momentum

Fém mágneses anyagok

- Spinek között pozitív csatlak \rightarrow egy irányba szeretnek állni
- Curie-tém. alatt spontán mágnesesreletté, felette paramágnes
- Pl. szobahőmérsékleten: Fe, Co, Ni

Mágnesezettség

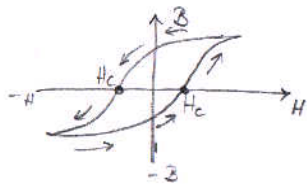
L $H = 0$: doméneket kioltják egymás tétlét az anyagon kívül

L Magnetostrikció: az anyag az átáramlás hatására alakváltozást szenved meg keresztirányban

L Anizotropia: különböző kristálytani irányokban különböző mágnesezhetőség

- Olyan irányban van a legkisebb, amikor forgatjuk, amit nem szeretnek
- Spinek forgása körben kitáplál és össze megy az anyag \rightarrow alakváltozó erő

L Histerézis: Ha visszahajlítjuk B -t, marad v. mennyi mágnesezettség



- Koercitív erő: doménfalak tolésa ellenes irányba, h. visszahajlítva
- Remanens mágnesezettség B_r
- Szaturációs mágnesezettség B_s

L H_2 átáramlás a doménfalak mozgásával valóban meg
- fennakad szemcséződéseken, kristályhibaikon, szemcséhatárokon

Videó: vas átáramlására
 \rightarrow kihasználás
Hansen-zaj
(reszef, akadályok)

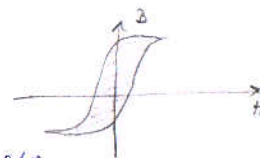
Transzformátor

L Indukált feszültség: $U_2 = \frac{d\Phi}{dt}$, $U_2 \cdot N_1 = N_2 \cdot U_1$

L Energia nem veszik el: $U_1 I_1 = U_2 I_2 \rightarrow I_1 \cdot l \cdot N_2 = N_1 \cdot l \cdot I_2$

L Veszteségek:

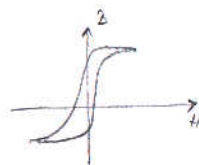
- tekercselés: Joule-hő
- önhajóáramok: vasmag vékony lamellákból
- histerézis: mágnesezés energiája: $W = \frac{1}{2} \cdot \int H \cdot dB$
- \rightarrow veszteség \sim histerézis görbe területe
- magnetostrikció: rugás: átáramlás \rightarrow ideköt a melle



Lágy és kemény mágnes

L Lágy mágnes

- domain falak súrlódása kicsi: kevés hiba; kis anizotropia; kis magnetostrikció
- könnyen átáramlatható nagy mágnesezhetőségre
- H_c koercitív erő kicsi
- B_r remanens mágnesezés és μ_r permeabilitás nagy
- pl: Al-Fe ötvözet; szilícium-acél



L Kemény mágnes

- nehezen átáramlatható, erős a tete
- H_c nagy
- B_r nagy

