

Ing. Sedláček

Katedra mechaniky a materiálů K312

dobrý hodit na přednášky - ve skupinách dle potřeb více

Hodnocení cvičení

max 30 b.

Písemná zk. 50 b.

Ústní 20 b.

1	> 85
2	> 70
3	> 50

zápočet na docházku na cvičení a 3 lab. práce

Lit. Hampl, Lipták, Sedláček, Štápl: Materiály pro elektrotechniku,
(CVUT, Praha 2000)

seznam os. k ústní zk. vydá před koncem přetomným

Bezpečnost práce

vold. feld. cout. vz/vyuka/sdo

elková impedance lidského těla kolem 1-2 kΩ

fyziologický účinek střídavého sin proudu 15-100 Hz

do 0,5 mA bez účinku

<http://pitbul.wz.cz>

redakce @ fel. const. cz

- 1) Struktura atomu
 planetární model (Rutherfordio)
 malé jádro - většina hmotnosti
 - nukleony - protony, neutrony
 kolem - elektrony
 $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As (C)}$
 v orbitálech - vnější - vnitřní
 průměr atomu přibližně 1 Å , tj. 10^{-10} m

Protonové číslo Z Neutronové č. N Hmotnostní (nukleonové) č. A - počet nukleonů v jádře $A = Z + N$ $\begin{smallmatrix} A \\ Z \end{smallmatrix} X$ Izotopy - shodné protonové, odlišné neutronové č.
 odlišná hmotnost č.

Izobary - prvky se shodným. hmot. č. a odlišným prot. č.

Planck (Planckova) energie pakována po kvantech

$$E = h \nu \quad [\text{J}; \text{Js}; \text{s}^{-1}]$$

Einstein

$$E = h \nu + \frac{1}{2} m_e v^2$$

přebytek E káření po excitaci elektronu
 $\rightarrow$ kinetická E Bohrov model atomu (důležitý)

1. Elektron se pohybuje kolem jádra po kružnicích (kvant. dráhy), kde jeho moment hybnosti splňuje

$$mvr = nh / 2\pi$$

 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.. redukovaná Planckova konstanta

existují pouze dráhy o určitých poloměrech

2. Pohyb se elektr. pohybuje po kvant. dráze, nevysílá energii.
 (stacionární stav) $n \dots$ malé celé číslo (1, 2, 3, ...)

Absorpce nebo emise se uskutečňuje při přechodu z jedné kvantové dráhy na druhou, přechod se děje po kvantách $E_n - E_m = h\nu$

Celková energie elektronu - součet kinetické a pot. e.

UPE

$$E = E_k + E_p = \dots = \frac{m_e g^4}{8h^2 \epsilon_0^2 m^2} \dots \text{uvážujeme systém s jedním elektronem}$$

po dosažení $n=1$ dostaneme energii vzhledem k stavu vodíku $E = -13,59 \text{ eV}$ (nulovou E bereme v ∞)

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

De Broglie - elektron se chová jako částice i jako vlnění
 $mc^2 = h\nu$
 vlnový charakter - jako stojaté vlnění

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\lambda} = \lambda$$

Schrödingerova rel

popis pohybu elektronu pomocí vlnové rovnice
 řešení vlnové fce

(pro více než 2d. prakticky nerozlučelné)

vlnová fce popisuje pravděpodobnost ~~pro~~ výskytu elektronu v prostoru kolem jádra

Kvantová čísla

energetický stav el. popsán 4 kvant. čísly

hlavní k. číslo - hlavní celá čísla, $n = 1, 2, 3, \dots$

- charakt. velikost a kvantování

s. výším n roste energ. elektronu a
 jeon více vzdálený od jádra

$$E_n = -\frac{Z^2 \mu g^2}{8h^2 \epsilon_0^2 m^2}$$

μ - redukovaná hmotnost

- vedlejší kvantové číslo
nabývá hodnot $0, 1, 2, \dots, n-1$
určuje velikost a kvantování momentu hybnosti l
resp. magnet. momentu $l = h \cdot \sqrt{l(l+1)}$
- magnetické kvant. číslo
určuje velikost a kvantování složky momentu hybnosti
resp. magn. mom. do směru vnějšího mag. pole, pokud působí, nabývá hodnot od $-l$ do $+l$
prostorové uspořádání orbitalů
- spin m_s
hodnoty $+\frac{1}{2}$ a $-\frac{1}{2}$
popisuje možný energ. stav jednoho elektronu
na orbitalu

Výstavbové principy el. obalu

1. Minimum celkové energie atomu - nejdříve orbitaly s nejnižší energií (výjimky existují)
 2. Pauliho vylučovací princip - nemohou existovat 2 elektrony se stejnými kvantovými čísly
 3. Pravidlo maximální multiplicity (Hundova) -
Elektr. obsazují jednotlivé orbitaly tak, aby před tím, než dojde ke spárování el. s rovným spinem, bylo umístěno maximum elektronů s rovným magnet. číslem
- (prohlédnou si periodickou soustavu, co s ní najdeme)

Relativní at. hmotnost

$$A_r = \frac{m}{m_u} = \frac{m}{m_C} \cdot 12$$

hm. jednotka

$$M_r = \sum_{i=1}^n A_{r,i}$$

vztahová k $^{12}_6\text{C}$

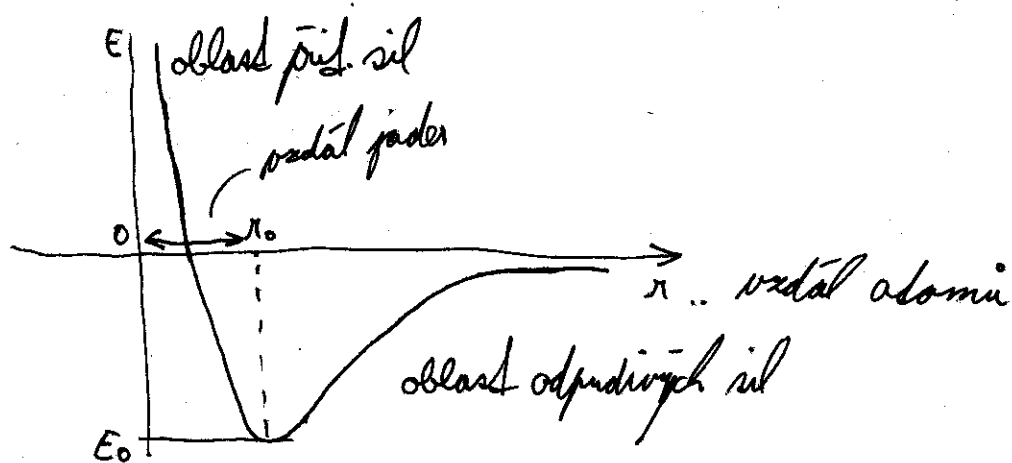
$$m_u = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Látkové množství 1 mol je mn. látek obsahujících počet atomů shodný s počtem atomů ve 12 g $^{12}_6\text{C}$

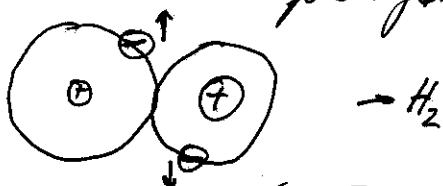
1 mol obsahuje $N_A = 6,0225 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

molekulární hmotnost - vyjadřuje hmotnost molu v gramech

Teorie chem. vazby



E_0 ... rovnovážná energie
 soustava se snaží snížit E na minimum
 Energie vazby (disociační) - jíž musí být dodána,
 aby se atomy vzdálily do nekonečna
 eV/vazbu; kJ/mol
 u silných vazeb stavby kJ/mol, slabě desítky kJ/mol
 překrytí orbitalů



grafické vyjádření



Koordinací číslo - udává počet chem. vaz. atomů

u molekule vzhledem k určitému atomu

Kratos - počet chem. vazeb atomů realizovaných u molekule

Elektronegativita - schopnost at. u molekule získat k sobě vazebné elektrony

určení (Pauling) rozdíl. el. neg. $\rightarrow$ paralelně E

$$(X_A - X_B)^2 = E_{AB} - \sqrt{E_{AA} \cdot E_{BB}}$$

geom. průměr

libovol. prvek

$$X_A = \sqrt{E_{AB} - \sqrt{E_{AA} \cdot E_{BB}}} + 2,1$$

s vyšším rozdílem elneg. roste ionizační energie

Oxidační číslo (formální mocnost) - náboj, který by získal atom, pokud by přestly jeho vazebné elektrony na atom s vyšší elektronegativitou

~~Homopolární~~

Homopolární molekula - atomy jednoho prvku

Heteropolární - " - " - " - více prvků

Polarizovatelnost

vanitá v molekulách s velkou diferencí elektronegativit

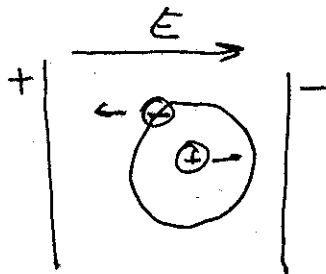
dipólový moment .. $\vec{p} = Q \cdot \vec{d}$ [C.m]

úřad. střed kladného a záporného náboje

vysvětluje dipól

Lorenzova síla - působí na částice atomu vložené do el. pole

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$



.. indukovaný dipól

Rozdělení vazeb

primární - iontová
kovalentní
kovová
sekundární - vodíkový můstek
van der Waalova

- disperzní
dipól - neutrální molekula
dipól - dipól

Ionová

mezi prvky s velkým rozdílem elektr.

přenos elektronu z jednoho at. na druhý, kationt, aniont
velmi stabilní, pokud vytvoří elektronovou
konf. jako mají vzácné plyny

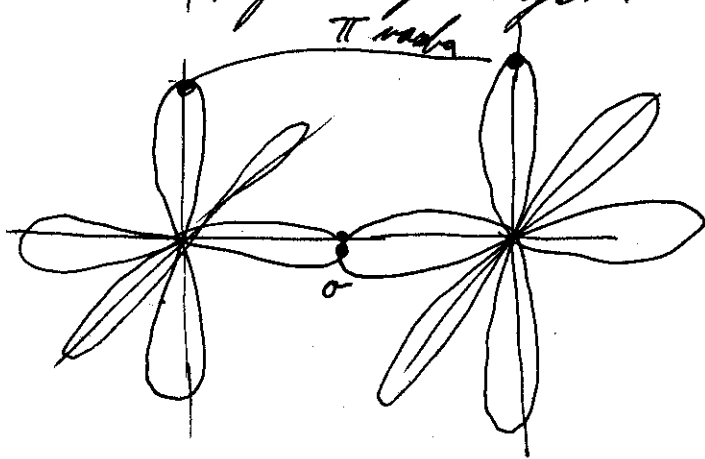
- je polární
- velmi silná - koval. E ve sloupcích kJ/mol
- všesměrová - pole náboje kulové, může přitahovat
další náboje

Kovalentní

mezi atomy s malým rozdílem elektr.,

sdílení elektronového páru mezi 2 atomy,
el. s opačným spinem

- nebo jeden prvek dodá dva elektrony donor-akceptorová
- velmi pevná, slouhy kJ/mol
- směrová (největší překrytí na spojnici jader)



Kovová

kationty ($10^{28}/\text{m}^3$), prostor vyplněn elektronovým
plynem (delokalizované elektrony), mohou se
volně pohybovat

- všesměrová
- nenasytitelná
- koval. E trochu nižší než u kovalentní a iontové vazby

- Vodíkový můstek

vazba velmi slabá, desítky kJ/mol

- van der Waalovy

- dipól-dipól  coulombovská interakce
- dipól-neutr. molekula - dipól indukce v molekule
- disperzní

krátkodobé interakce, působí na velmi malou vzdálenost,
v jednotkách kJ/mol

Formy existence látek

Klasifikace dle skupenství

- plynné
- kapalné
- pevné (tuhé)
- plazmatické

Skupenství plynné

velká vzdál. atomů nebo molekul,
a neovlivní silně chem. vazby

srážky - vzájemné silové působení (Coulombovské síly),
změní se původní vektor rychlosti



ideální plyn

- nevytváří vzájemné sil. působení kromě srážek
- částice zanedbatelné rozměry

reálné plyny se takto chovají při nízkých tlacích a
malých atomech ($H, He, \dots$)

Hlavová rovnice ideálního plynu

$$pV = nRT$$

$\left. \begin{array}{l} \text{l. množ.} \\ \text{stoj} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{termodynamická konstanta} \\ \text{univerzální plynová konstanta [J/mol·K]} \end{array}$

na standardních podmínkách

$$T = 273, \quad p = 101325 \text{ Pa}$$

je objem 1 molu plynu 22,4 l

Daltonův zákon

Celkový tlak směsi id. pl. v uzavř. prostoru o konst. V je ^{roven} součtu parciálních tlaků jednotlivých plynů.

$$p_i = \frac{n_i RT}{V}$$

$$p_{\text{TOT}} = \frac{RT}{V} \sum_i^n n_i = n_{\text{TOT}} \frac{RT}{V}$$

Raoultův zákon

Parciální tlak i -té složky $p_i = x_i \cdot p_{\text{TOT}}$; $x_i = \frac{n_i}{\sum n_i}$ (molarní zlomek)

van der Waalova rozšířená rovnice

$$\left(p + a \frac{n^2}{V^2}\right) \cdot \left(V - \frac{n}{b}\right) = nRT$$

re skutečným plynem, hlavně na menších podmínkách

Kapaliny

molekuly se sdružují do slov. klastrů, = jsou vůči sobě volně pohyblivé → kapaliny sestávají z tekuté mezí klastry van der Waalsovy vazby

odpařování - v uzavřeném systému se tlak páry zvyšuje až k rovnovážnému stavu

- v otevřeném systému se kapalina odpařováním ochlazuje

vaz kapaliny ...

povrchové napětí kapaliny

způsobeno působící v rovině povrchu kapaliny,

každá částice v prostoru působí s nejmenším povrchem

kapaliny mírně - převažují atraktivní síly mezi molekulami různých kapalin

- nemírně - převaž. atr. síly mezi molekulami stejných kap.

- smáčivost ...

- kapilární elevace a deprese

Viskozita - důsledek vzájem. působení atrakt. sil mezi klastry

$$\eta_D = \frac{d}{dx} = \tau = \frac{F}{S} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad \text{dynam. v.}$$

$$\eta_K = \frac{\eta_D}{\rho}$$

ideální kapalina - bez vnitřního tření (viskozita nulová)

Tuhé látky

klasifikace dle stupně uspořádanosti struktury
(vzdál, po kterém je uspořádání uspořádána pravidelně)

- amorfni (sklovité)
 - pravidelné uspořádání po velmi krátkou vzdál (tak 2, 3 atomů),
~~pro krátkou vzdál. měření~~
anizotropie (různé fyz. vl. v různých směrech)
neexistuje
- polykrytalické - uspořádání na μm až mm
- monokrytalické - uspořádání až v celém objemu
 - anizotropie výrazná

Strukturní skel

někdy viskózní kapaliny

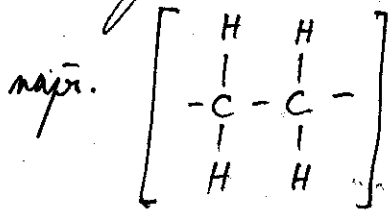
kovová skla - vznik prudkým ochlazením roztav kovu,
ten se nestíhá vytvořit pravidel. strukturu,
velmi tvrdá

- není přesně definovaná teplota tání
(nejednotlivě se pohybují vlny mezi jednotlivými
koordinačními obaly, pak další)

amorfni struktura vyšší energie než krytalické,
v čase probíhá vnitřní fázová transformace

Makromolekulární látky

vznikají navázáním monomerních jednotek
- polymerace -



vázány kovalentní vazbou
velmi dlouhé řetězce

stupně polymerace $k = \frac{M_{\text{pol}}}{M_{\text{mono}}}$

kopolymer - vázány různé monomerní jednotky
mezi jednotlivými řetězci působí van der Waalovy síly
řetězce mohou být lineární nebo cyklické

Kapalné krystaly

dlouhé ^{molekuly} tyčinkovité molekuly, silně polární
- působením vnějšího pole se může stát
kříd (molekuly vůči sobě velmi pohyblivé)
molekuly sdruženy do vrstev, v nich stejné
orientovány

kovalentní krystaly
nejdužnější

Koové krystaly

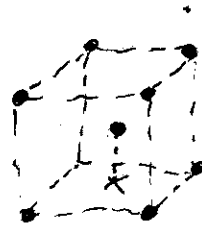
svařeny atomy jednoho typu, bylo lze uspořádat 3 typy

A-B-A

struktura BCC - body centered cube
2 atomy / buněk

$$Z = 8$$

$$k_{\text{bcc}} = 0,68 \quad \left(= \frac{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{a_0\sqrt{3}}{4}\right)^3}{a_0^3} \cdot 2 \right) \quad (\text{koef. naplnění})$$



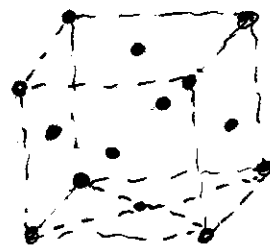
např. ~~Al, Ni, Cu, Ag, Pt, Au~~ V, Cr, Mo, W, α -Fe

A-B-C

FCC - face centered cube
4 atomy / buněk

$$Z = 12$$

$$k_{\text{fcc}} = \frac{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{a_0\sqrt{2}}{4}\right)^3}{a_0^3} \cdot 4 = 0,74$$



ve středu
stěn

např.: Al, Ni, Cu, Ag, Pt, Au, γ -Fe ($912 \rightarrow 1394^\circ\text{C}$)

HCP hexagonal close packed (šesterčina)

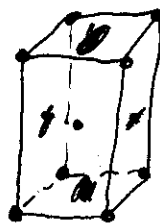
A-B-A-B

2 atomy / buněk

$$k = 0,74$$

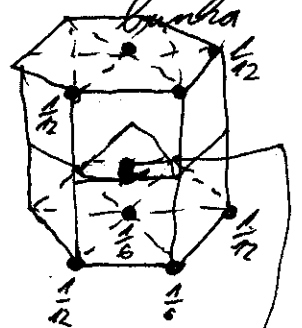
pr. Be, Mg, Ti, Zn, Zr

primitivní
buněk



radši
si můžete
přesvědčit

elementární
buněk



ani
sčítání
→
uprostřed
hexagonu
roviny

iontové krystaly
záleží na vlastnostech iontů
uspořádání

kovalentní



trojhlavá
 $Z=3$

čtyřlístek
 $Z=4$

osmičlístek
 $Z=6$

oktáedr
 $Z=8$

většina izolanty

Poruchy krystalové mřížky

- a) bodové
- b) čárové
- c) plošné

vyskytují se při tvorbě krystalu,
mech. namáhání, ozáření...

a) bodové poruchy

vakance - v průběhu nukleace a růstu fáze (při tuhnutí)

- tepelnými kmity mřížky

- dodáním vysoké energie

- plastická deformace mřížky

typy b. poruch - vakance - v mřížce chybí atom

- intersticiál - do mezery se vepře atom
(vlastní / cizí - příměs)

při natívání se atom může přesunout do jiné vakantní polohy nebo maximální polohy

Tepelná závislost koncentrace vakancí

$$N_v = N \cdot e^{-\frac{E_m}{kT}}$$

důležitým pohybem poruch

1. Fickův zákon

$$j = -D \text{ grad } N$$

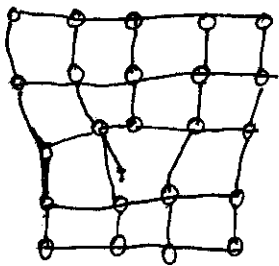
$$[\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad [\text{m}^2\text{s}^{-1}] \quad [\text{m}^{-3}]$$

2. Fickův zákon

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2}$$

$$D = D_0 e^{-\frac{E_d}{kT}}$$

Čárové poruchy krystalové mřížky



dislokace - hranová
- šroubová

přesunutí poloviny atomů do pravidelné b. mřížky

Burgersova smyčka odděluje neporušenou oblast b. mřížky od oblasti poničené slazenou dislokací

Burgersův vektor - vektor uzavírající B. smyčku

Pohyb dislokací krystalovou mřížkou

- skluz - elastická deformace kovů realizována pohybem b. dislokací po rovině skluzu

zplh (předpokladem existence vakancí v sous. polohách poctel. d. čáry)

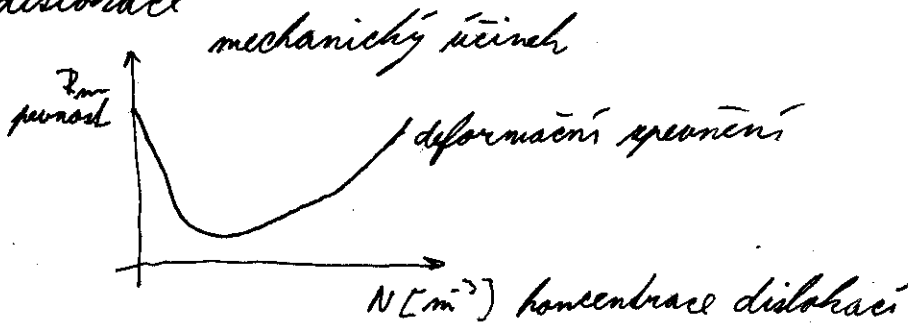
Plošné poruchy b. mřížky

- krystal tvořen zrnny, v nich různá orientace kryst. rovin
- vrstevné chyby
 - hranice zrn
 - povrch kryystalu

Vliv poruch na vlastnosti kryystalu Důležité!

- b. poruchy
 - n° kovů - zvyšují resistivitu (hlavně intersticiální)
 - polovodiče - změna typu a velikosti vodivosti

- dislokace



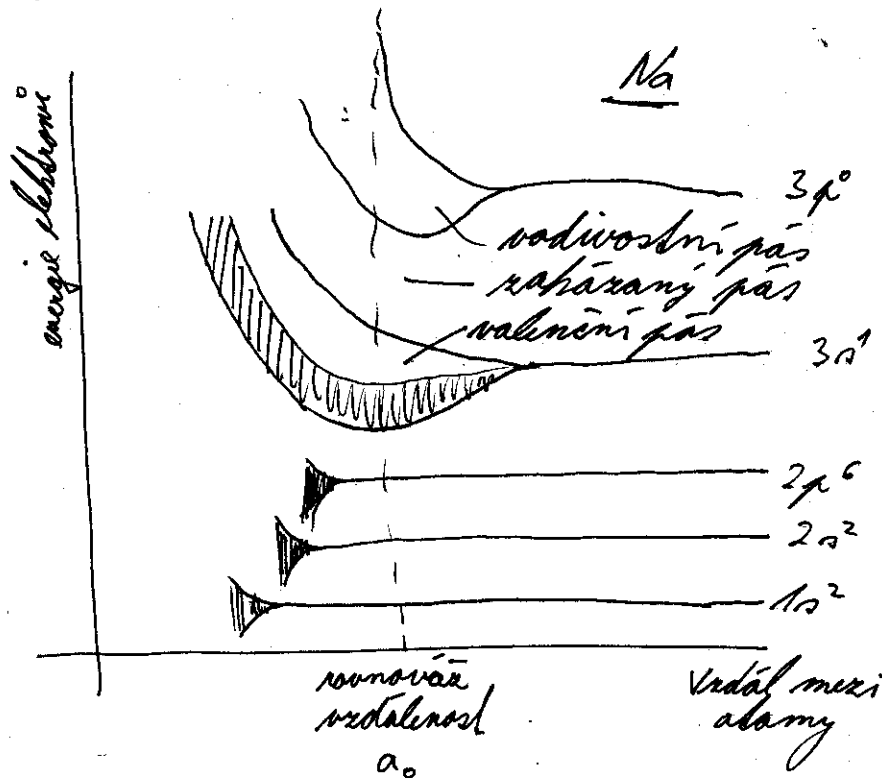
vytváří polovodiče typu P

- plošné poruchy

mění magnetické vlastnosti materiálů

Pásová struktura tuhých látek

v systému atomů neexistují atomy se stejnými kvant. čísly
→ vytvoří se nepatrně vzdál. energetické hladiny
při N atomech se vytvoří pásy e. hladiny - pásová struktura



vytváří se pás možných energ. stavů, který nemusí být znova obzrěn

při OK obrazeno do skupin val. páru

zaháraný pás - není zde žádná možná e. hladina

vodivostní pás - OK neobzrěn, s rostoucí

teplotou se sem mohou některé elektrony dostat

pohyb elektronů v jednorozměrném krystalu
 model volných elektronů (nacházejí se nad potenciálovou bariérou)

$$\psi_k(x) = e^{\pm i k x} \sim \sin k x \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{plano})$$

$$m \lambda = 2L \quad \boxed{k = \frac{\pi n}{L}}$$

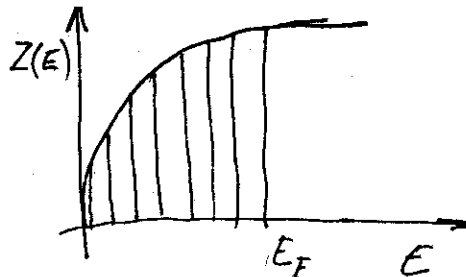
volné el. - celková energie je rovna kinetické

$$E_k = \frac{\hbar^2}{2m} k^2 \Rightarrow \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

$\frac{\hbar^2}{2m}$ hmotnost elektronu ve 3D případě

hustota kvantových stavů

$$Z(E) = k \sqrt{E}$$



vytvoření této energ.
 hladiny v sáv na E

Fermiho energie E_F (chem. potenciál)

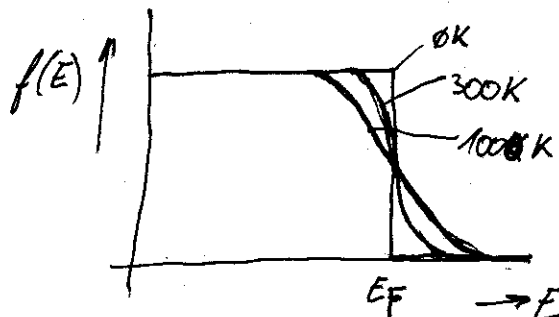
představuje veličinu číselně rovnou maximální
 energii elektronu (nejvyšší obsazená en. hladina)
 v láti při $T=0K$

Fermi - Diracova rozdělení (statistika)

pravděpodobnost obsazení energ. hladiny E elektronem

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

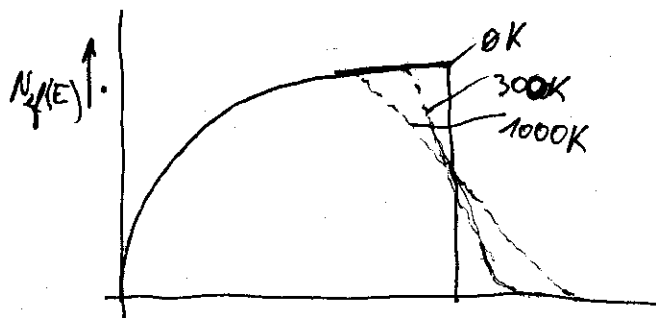
k - Boltzmannova konst.



Hustota obsazených energ. stavů

(ef. hustota prost. stavů)

$$N_f(E) = Z(E) \cdot f(E)$$



při 0K

$$N_f(E) = Z(E) \cdot f(E)$$

$$N = \frac{L^3}{2\pi^2} \cdot \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} \int_0^{E_F} E^{\frac{1}{2}} dE$$

$$N = \frac{L^3}{3\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} E_F^{\frac{3}{2}}$$

přes

koncentrace
volných
elektronů

$$n = \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} E_F^{\frac{3}{2}}$$

$$\Rightarrow E_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3m\pi^2)^{\frac{2}{3}}$$

klidová hustota elektronů
přímá
pozn. není závislá na teplotě,
pouze při změně se koncentrace
změní (změna objemu)

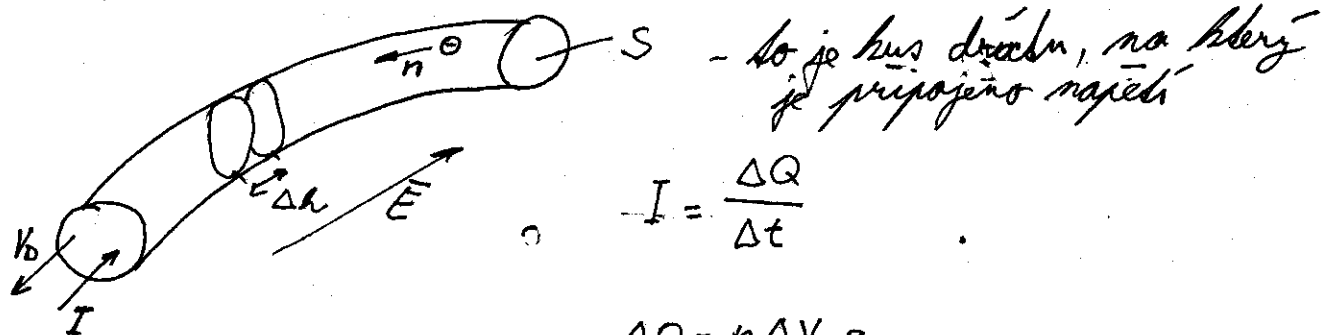
My považujeme za konstantní

Volné elektrony mají $E \leq E_F$, jsou delokalizovány,
jejich celk. energie je e. kinetická $E_F = \frac{1}{2} m v^2$

$$\Rightarrow \sqrt{\frac{2E_F}{m}} = v_F \sim 10^6 \text{ m.s}^{-1}$$

maximální rychlost elektronů při $T=0 \text{ K}$
v mřížce kovů

elektron se pohybuje mřížkou, při srážkách (interakcích)
s atomy se mění vektor rychlosti, jejich součet
je nulový



$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

$$\Delta Q = n \Delta V \cdot q$$

$$\Delta Q = n \Delta l \cdot S \cdot q$$

driftová rychlost

$$I = \frac{n \cdot \Delta l \cdot S \cdot q}{\Delta t} = n S \cdot v_D \cdot q \quad | : S$$

$$\bar{j} = q n \bar{v}_D \quad \text{prúdová hustota}$$

$\frac{A}{m^2} \quad \frac{1}{As} \quad m^{-3} \quad (m/s)$

driftová rychlost - rychlost transportu náboje prostředím, je kolem $10^{-5} m \cdot s^{-1}$

pole, které vyvolá pohyb náboje, a šíří téměř rychlostí světla - NE TY ELEKTRONY!!

na všechny elektrony působí pole, rychlost šíření vlny je blízká rychlosti světla

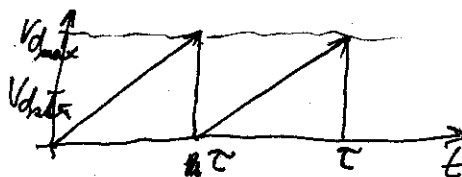
Ohmův zákon (v diferenciálním tvaru)

El. pole na elektron působí Lorenzova síla $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$, vyvolává přírůstek rychlosti elektronu do doby Δt

$$m_e \frac{dv_x}{dt} = q E_x$$

ne úchoz $dv_x = \frac{q E_x}{m_e} dt$

přírůstek driftové rychlosti:



$$v_d = \frac{qE}{m_e} \int_0^{\tau} dt$$

τ .. doba mezi 2 srážkami, relaxační doba

$$v_{d, \text{dr}} = \frac{1}{2} v_{d, \text{max}} = \frac{q\tau E}{2m_e}$$

$$j = q n v_{d, \text{dr}} = \frac{q^2 n \tau}{2m_e} \cdot E$$

$$\boxed{j = \sigma \cdot E}$$

A/m² S/m V/m

σ - konduktivita

$\rho = \frac{1}{\sigma}$ [$\Omega \cdot m$] rezistivita

ohmů zákon

musí platit $v_d \ll v_F$ (a ková nehozi)

El. odpor je mírou počtu srážek volných elektronů s atomy mřížky (nečistotami v mřížce)

Př. kus Al drátu

$$E_F = 11,3 \text{ eV}$$

$$a_0 = 4 \cdot \text{\AA}$$

$$S = 1 \text{ mm}^2, I = 10 \text{ A}$$

FCC, ~ 3 valence

$$v_F = \sqrt{\frac{2E_F \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{m_e}} = 2 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_d = \frac{j}{q \cdot n} = \frac{\frac{I}{S}}{q \cdot \frac{4 \cdot 3}{a_0^3}} = 7,34 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\downarrow$$

$$n = 18 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$$\tau = \frac{2m_e}{q^2 n \rho} = 1,43 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

$$l = v_F \cdot \tau = 2,89 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

(střední volná dráha
přibližně 72 mřížkových parametrů)

s rostoucí teplotou se zvyšuje rezistivita -
 atomy v mřížce kmitají - zvyšují středový poloměr
 vysoká vodivost kovů způsobena vysokou koncentrací
 volných elektronů
 to také způsobuje vysokou tepelnou vodivost
Tepelná vodivost

Franz-Kliewemannův zákon

$$\frac{\Lambda}{\sigma} = 3 \left(\frac{h}{g} \right)^2 T = 2,24 \cdot 10^{-8} T$$

podíl tepelné a elektrické vodivosti
 poměr pro všechny kovy přibližně stejný a
 přímo úměrný teplotě

$$\left(\Lambda = \frac{3\pi k^2 \tau T}{2m_e} \quad \sigma = \frac{q^2 \tau n}{2m_e} \right)$$

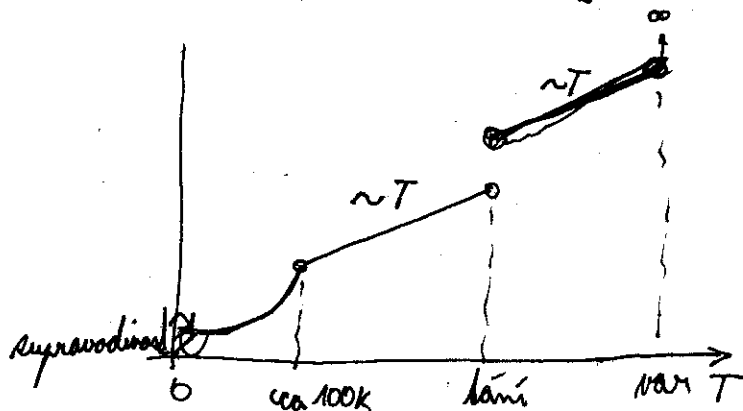
Tepelná závislost rezistivity kovů

s rostoucí teplotou roste amplituda kmitů
 mřížky, zkracuje se volná dráha elektronu

závislost u teplotách nad 100K

$$\rho_T = \rho_{T_0} [1 + \alpha_{R1}(T - T_0) + \alpha_{R2}(T - T_0)^2]$$

[K⁻¹]



Kontaktní potenciál kovů

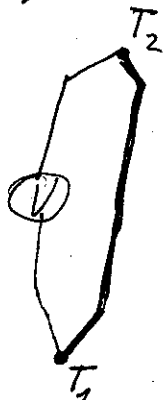
je důsledkem rozdílné polohy Fermiho energie dvojice kovů, které tvoří fyzický kontakt. Působí rovnání Fermiho energie v kovech přechodem elektronů. Po přechodu elektronů se jedna mřížka nabitá kladně, druhá záporně.

$$U_K = \frac{\chi_A - \chi_B}{2} \quad \text{kontaktní napětí}$$

$$U_{ATB} = \frac{\chi_A - \chi_B}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{m_A}{m_B} \quad \text{při uvážení teplotní závislosti}$$

Termoelektrický jev

při rozdílných teplotách



$$U_{T(ATB)} = \frac{k}{2} \Delta T \cdot \ln \frac{m_A}{m_B} \Rightarrow \alpha_{AB} \Delta T$$

kde α_{AB} je Seebeckův termoelektrický součinitel (V/K)

Dů: přepočítat si všechny materiály a kovy, rozkladní parametry
nebo obecné charakteristické skupiny

Polovodiče

Pracovní struktura polovodičů
energetické hladiny v systému atomů rozděleny do pářů

valenční pás

gap + zakázaný pás - žádná povolená energ. hladina

vodivostní

šířka zak. pásu - nejmenší vzdálenost mezi valenčním a vodivostním pásem

přímá pracovní struktura - elektron při přechodu mění pouze energii

nepřímá p. s. - elektron mění energii a souřadnici

Efektivní hmotnost nosičů m^*

$$m^* = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2 E}{dk^2}}$$

káží na zakázaný energ. pás

(lehké / těžké elektrony / díry)

Vlastní polovodič (intrinzeční)



šířka zakázaného pásu
polovodičů 0-2,5 eV

Podmínka neutrality

$n_e = n_p = n_i$ - konc. nosičů vol. pol. (intrinzeční)
koncentrace děr

vlastní polovodič - neobsahuje cizí příměsi

při absolutní nule dokonale izolant (el. pouze ve val. pásu)

při vyšší teplotě mohou některé el. přejít do vodivostního pásu, aby se po něm dila (transportují náboj proti elektronům)

Pridānām piemēsi polovodītē tipu P nebo N

3. sk. - akceptor

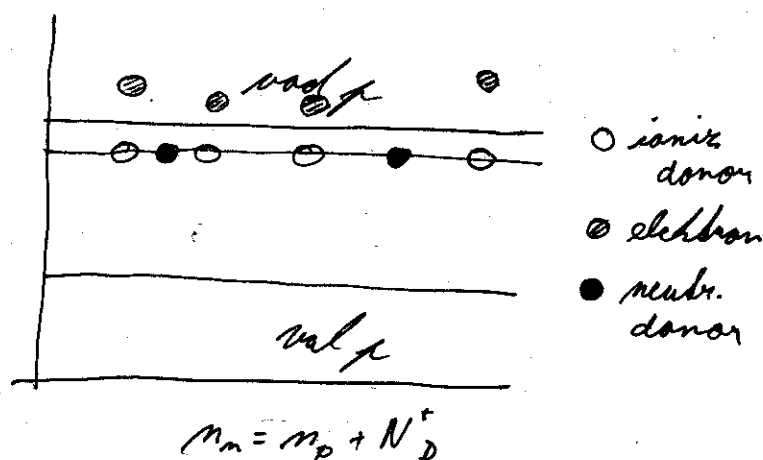
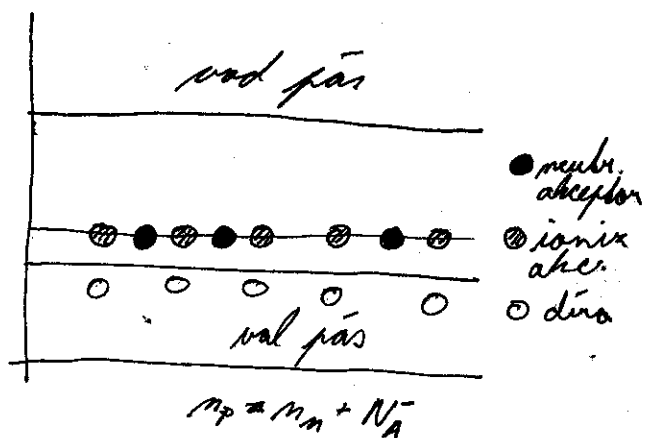
5. sk. - donors

kur pirms enerģētiskā poskenu jinde

3. sk. - bor, Al, galium

5. sk. - fosfor, arsen

tip P

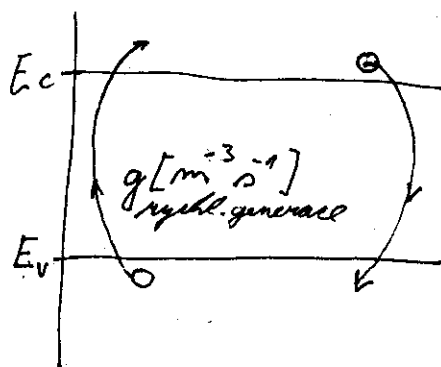


pri 0K izolants

pidāna energ. klādina piemēsi

malg energ. rozdēl, stāci nīzēi kēplaba
na pērsēp (derēty K)

Generace - rekombinace



$T > 0 K$

$R = n_p n_n r$ - pavadēp rekombinace
rekomb. rekombinace

el. sūāsthami atēāci energ., vātēi rēda val. pāsū

$$g = R \Rightarrow n_p n_n r / r = \frac{g}{r} = n_n \cdot n_p = n_i^2$$

$$n_i = \sqrt{n_n \cdot n_p}$$

Konzentrace nosičů ve vlastním polovodiči

(nebo podle skript odvození)

v polovodičích volné nosiče - energie a dírky

koncentrace těch dána integrací přes všechny hladiny
průběžného pásu

$$n_m = \int_{E_c}^{E_c} Z_c(E) \cdot f(E)_m dE$$

a Fermi-Dirac * hustota nosičů

$$n_p = \int_{E_v}^{E_v} N_v(E) \cdot f(E)_p dE$$

a dírky pravidel opačná

$$f(E)_p = 1 - f(E)_m$$

$$n_m = 2 \underbrace{\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}}_{N_c} \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

$$n_p = 2 \underbrace{\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}}_{N_v} \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$$

Při OK Fermiho hladina uprostřed zak. pásu.

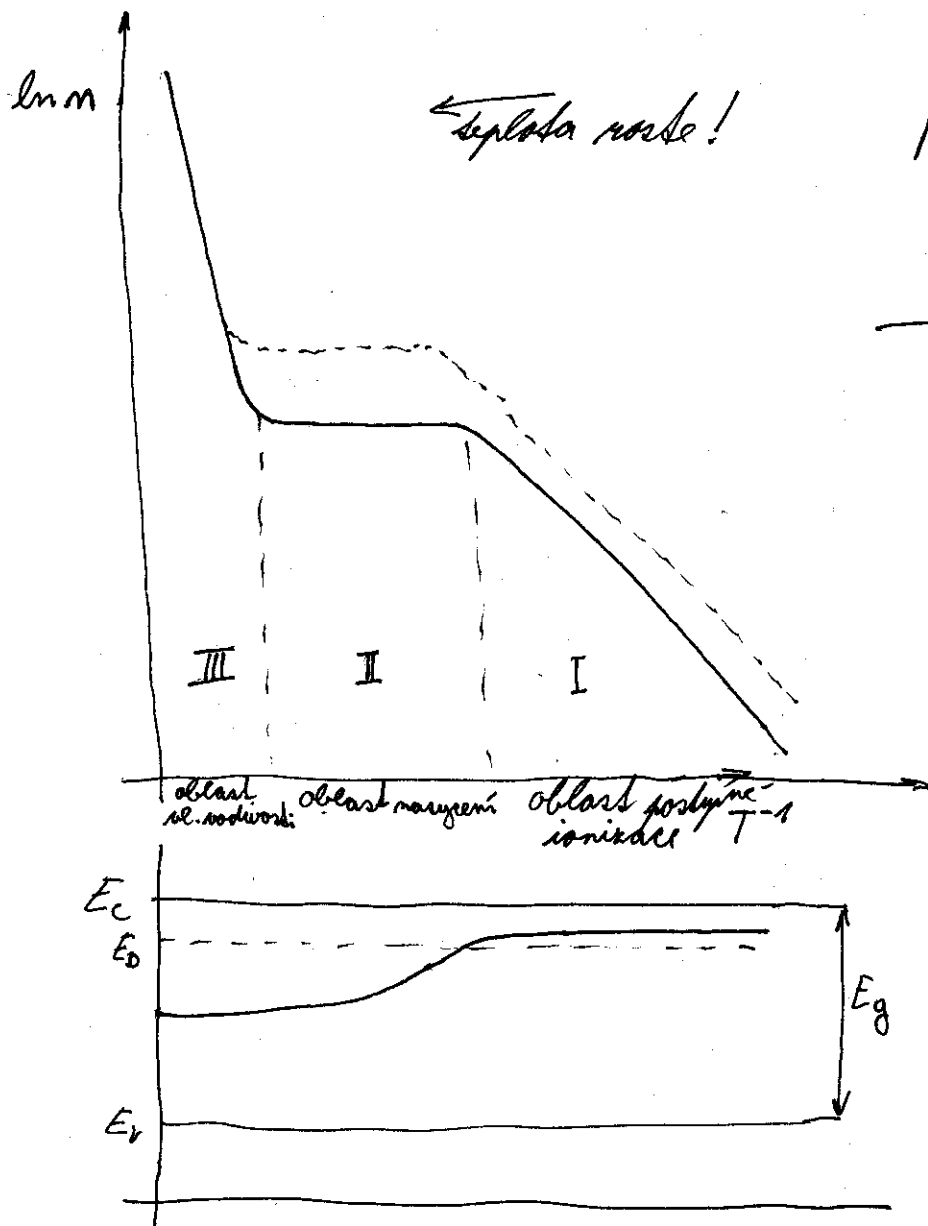
$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)$$

$$n_i = \sqrt{n_m n_p} = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_n^* m_p^*)^{\frac{3}{4}} \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{2kT}\right)$$

$$n_i = A \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$E_g = E_c - E_v \text{ (šírka zak. pásu)}$$

stačí rovnici odvození



oblast I
$$n_m = \left(\frac{N_c N_v}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{\Delta E_D}{2kT} \right)$$

II
$$n_p = \text{const}$$

III
$$n_i = \sqrt{n_m n_p} = 2 \underbrace{\left(\frac{2k\pi kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_m^* m_p^*)}_{\text{maly A}} \exp \left(-\frac{\overbrace{E_g}^{E_c - E_v}}{2kT} \right)$$

Mechanismy rozptylu

- mřížkový - realizován pružnými srážkami elektronů s tepelnými kmity mřížky (s teplotou roste)
- rozptyl na ionizovaných příměsích
změna poh. ochoty realizována působením Coulombovského pole
- rozptyl na neionizovaných příměsích a strukturních poruchách - v elektr. minimum poruch, nemají tedy větší vliv

Pohyblivost nosičů náboje

Při aplikaci el. pole vyvolá Lorentzova síla příměsí rychlosti elektronu

$$m_n^* \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = -qE_x$$

x čísel

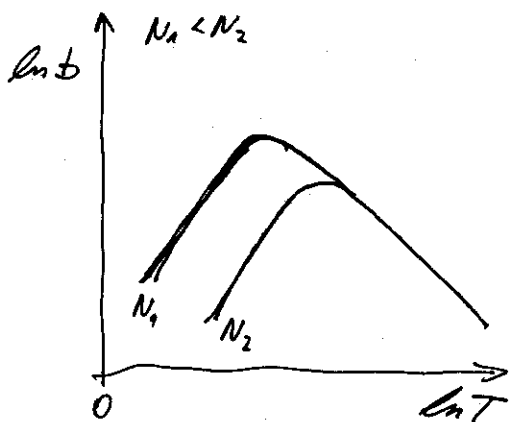
$$\Delta v_x = - \frac{qE_x}{m_n^*} \Delta t$$

$$v_d = - \frac{q\tau}{m_n^*} \cdot E_x$$

$$\boxed{\mu_n = \frac{q\tau}{m_n^*} = \frac{v_d}{E_x}}$$

.. pohyblivost elektronu

analogicky pro díry



při nízkých teplotách - rozptyl na ioniz. příměsích
 nejdříve se zvýší - roste energ. elektronu,
 pak se snižuje - roste tepelná hmota

Platnost Ohmova zákona pro polovodiče
pocítat pro el. proud

$$\bar{j}_c = \bar{j}_n + \bar{j}_p = q (n \mu_n + p \mu_p) \bar{E}$$

$$\sigma_i = q n_i (\mu_n + \mu_p)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= q n_i \mu_n N_A \\ \sigma &= q n_i \mu_p N_D \end{aligned} \right\} \text{úplná ionizace}$$

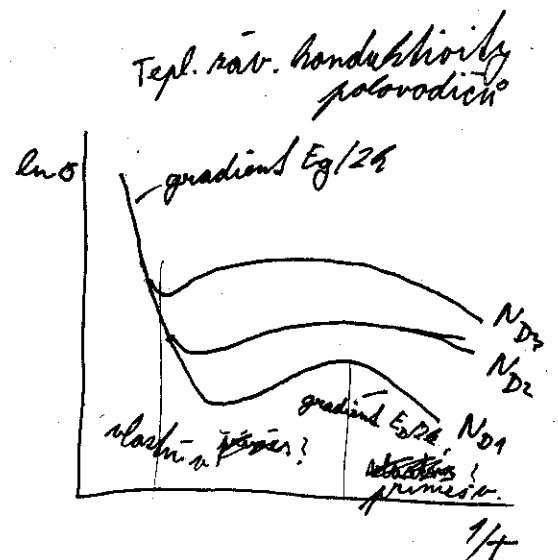
případem příklad

sl. vod.

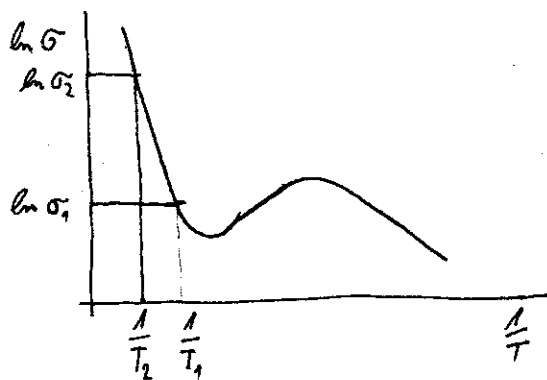
$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

příměs. vod.

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E_{AD}}{2kT}}$$



pri. $E_{A,D}$; E_g - sūka rad. pārsl, noārijuma konstante



$$\sigma_1 = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT_1}}$$

$$\sigma_2 = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT_2}}$$

$$\ln \sigma_1 = \ln \sigma_0 - \left(\frac{E_g}{2kT_1} \right)$$

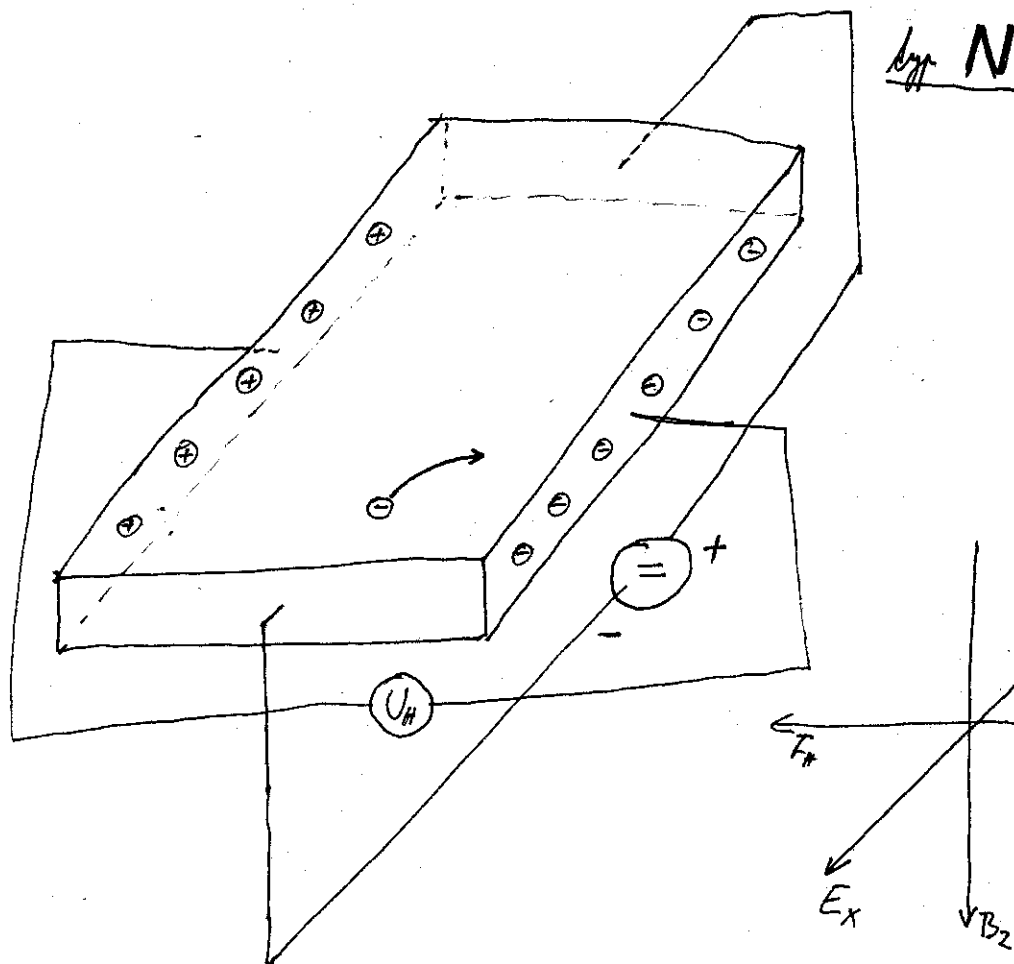
$$\ln \sigma_2 = \ln \sigma_0 - \left(\frac{E_g}{2kT_2} \right)$$

$$\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2 = \frac{E_g}{2k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

$$\frac{\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \cdot 2k = E_g \text{ [J]}$$

dce eV

Halliv jev



$N_D \gg n_m$

jestliže vložíme do mag. pole

→ Lorencova síla $F_L = q(\vec{v} \times \vec{B})$

přirodní orientace driftové rychlosti se stáčí,
elektrony se hromadí upravo

kvůli zachov. el. neutrality → separace nábojů
vznikne příčné Hallovo pole - od $\oplus$ k $\ominus$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}_H$$

$$F_H = F_L$$

$$qE_H = qv \times B_z$$

$$U_H = E_H \cdot y$$

$$j = q n v_d \Rightarrow v_d = \frac{j}{q \cdot n}$$

$$j = \frac{I}{dy}$$

$$U_H = \frac{1}{nq} \cdot \frac{BI}{d}$$

m... zde konc. volných el.
po přidání donorů

$$U_H = R_H \frac{BI}{d}$$

elektrony i díry se při stejné konfiguraci sdruží
vychylí na stejnou stranu

$$\text{typ P... } R_H^* > 0$$

$$\text{N... } R_H < 0$$

tedy lze také zjistit typ vodivosti
pomocí Hal. jevu lze měřit i další vlastnosti

$$\sigma = q n b \quad R_H = \frac{1}{q n} \quad \dots \text{ bude obtížné u skvělých}$$

(proto to nedělá)

Hal. jevem naměřená pohyblivost nižší, protože
el. se pohybuje po kružnici (delší dráha)

proto někdy $U_H = A \cdot R_H \frac{BI}{d}$
používají se malá pole (desítky mT)

místo: Hallovy sondy (měření malých mag. polí), měření velkých proudů,
spínače, klávesnice

Hal. jev se častěji užívá u polovodičů

Hal. napětí nepřímá úměrnost koncentraci volných nosičů náboje

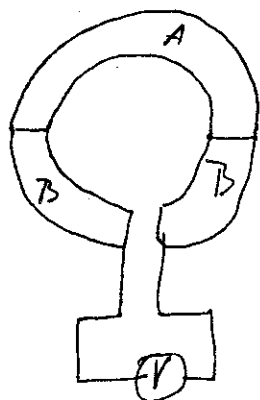
u kovů U_H prakticky neměřitelné

Termoelektrický jev

kontaktní napětí - stejné jako u kovů

s teplotou se koncentrace n nosičů náboje mění exponenciálně!

výroba toku náboje
podle 1. Fichova zákona

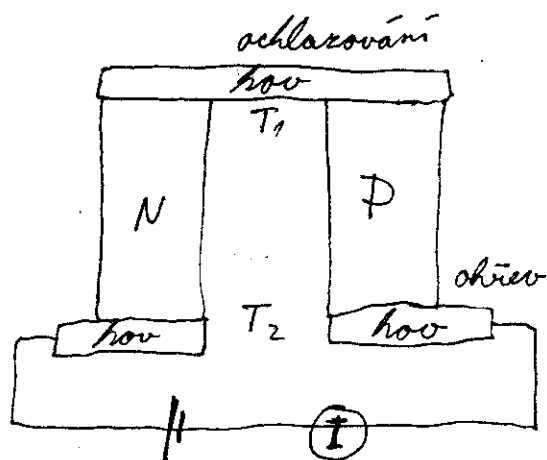


A... typ termoelektr. článků o 2-3 řádky
vyšší Seebeckův koef. $[V \cdot K^{-1}] (\alpha)$

$$U_H = (\alpha_A - \alpha_B)(T_1 - T_2) \quad \text{výstupní napětí}$$

u kovů - v obou větvích křivka stejná a nosičů
u polovodičů výrazný rozdíl
→ výrazně vyšší napětí

Peltierův jev



množství tepla generované/absorbované
kontaktem

$$Q = \pi \cdot I \cdot \Delta t \quad [J]$$

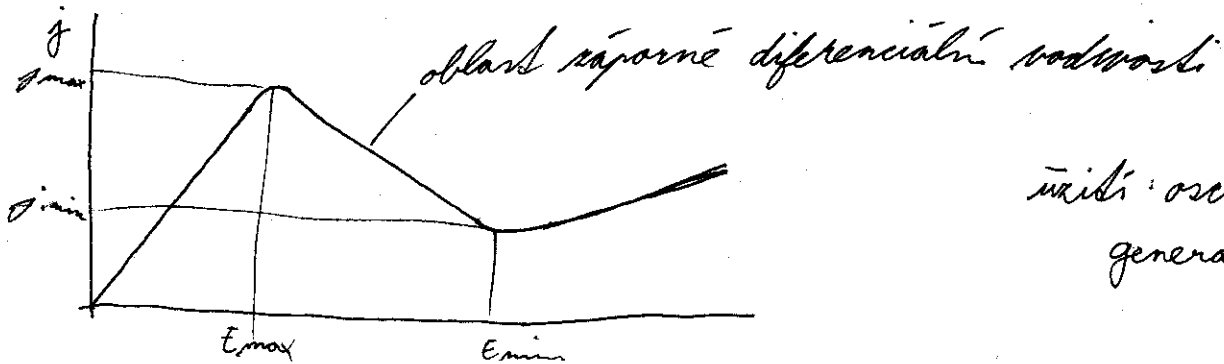
π ... Peltierův koeficient
 Δt ... čas

$$\pi = \alpha T \quad [V; V/K; K]$$

~~Elektr.~~ nosiče náboje na jedné straně přijímají energii,
 přeměňují ji na druhou stranu
 polovodič musí být dobrý vodič a přitom málo tepelně
 vodivý (propradi přívodu)

Gunnův jev

podstatu spočívá ve vzniku VF oscilací vys. kmitočtu (řádů GHz)
 v polovodiči, ve kterém je vyvořeno el. pole. vysoké intenzity
 ($E_k \sim 3 \cdot 10^5 \text{ V/m}$), přechod elektronů z hlav. do vedlejšího minima
 elektron je výrazně urychlován
driftová rychlost ^{podle domény křystalu} dosahuje hodnot $v_d = 10^5 \text{ m.s}^{-1}$



mixti: oscilatory,
 generatory..

Průlečná rychlost domény

Doba průletu domény křystalu

$$T = \frac{L}{v_d}$$

Prac. frekvence současnky při délce křystalu $50 \mu\text{m}$
 je asi 2 GHz.

v křystalu se vždy vytvoří doména - mixti na konci

podmínkou G jevu

v hlav. minimu - vysoká pohyblivost

ve vedl. - " - nízká pohyblivost

polovod. např. GaAs

che přiblí. co jsou, k čemu slouží

Optické jevy v polovodičích

dopadající záření - část se odrazí,
část proniká do polovodiče

Absorpce světelného záření

je důsledkem výměny energie pronikajících fotonů s prostředím

$$E_f = h\nu \quad \text{energie fotonu}$$

typy a. t.) valenčními elektrony

2) příměrovými atomy - foton je ionizuje

3) volnými elektrony

4) mřížkou (společně s teplotou mřížky)

Fotoelektrická vodivost

- polovodič má jinou vodivost v závislosti na osvětlení
- při osvětlení roste koncentrace nosičů

$$\Delta \sigma = \sigma_0 - \sigma_T = q (\Delta n_n b_n + \Delta n_p b_p)$$

- změna pohyblivosti nosičů - přestup na vyšší energ. hladinu

- podání nosiče postupně ztrácí energii (interakce s mřížkou)

- u vl. polovodiče elektron přestoupí do val. pásu - rekombinace

→ při přestupu se vyžáří záření

$$h\nu = E_g$$

↑
Elektroluminiscence

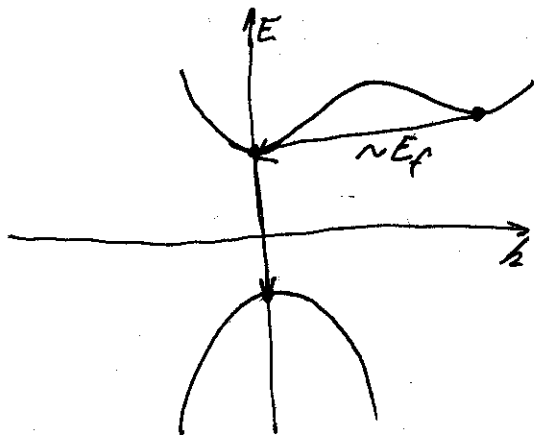
diody - přechod PN - volné nosiče vznikají fotoelektr. přestupem přes přechod

při rekombinaci několika přestupů, některé se vyžáří

ve viditelném světle - by s největším rozdílem hladin

při přestupech musí být zachováný zák. zach. energ. a hybnosti

$$\nu = (E_s - \Delta E_{AD} - E_f) / h \quad - \text{frekvence emitovaného záření}$$



všechny normální LED diody mají přímou pás. strukturu
(s nepřímou by měla daleko menší účinnost)

Elementární polovodiče

Si, Ge, (Diamond)

4 skupina v tabulce, diamond strukt., široká zak. pásu,
prvky dobaře (příměři) - 3, 5 skup

→ je velká široká zak. pásu, do oblasti vlasti
vodivosti přechází při ^(výřech) vysokých teplotách
dnes 00% polovod. prvků na bázi křemíku

Polovodičové sloučeniny: A^{III}B^{III}, A^{III}B^{VI}

sloučeniny prvků z III, V / III, VI. skupiny per. tabulky

III/V: GaAs..

- sfaleritová struktura (jako diamond, střídají se roviny
jednotl. atomů)

- široká zak. pásu 0,18 - 2,45 eV,
mohou pracovat při výřech teplotách

III/VI - prvky dále od středu tabulky - vzrůstá ionická vazba

široká zak. pásu: 0,08 - 3,6 eV (na výrobních klacích, vyprávě se
velmi obtížná výroba, většinou selže výrobci vodivosti typu P

- výroba optických generátorů pro komunikace
- každý polovodič má poskytuje určitou obnovou délku

Také rozlohy polovodičových sloučenin

podle poměru polovodičů se mění fyzikální parametry

- šířka zak. pásu, pohyblivost, mřížkový parameter
- stačí také na LED diody

laserové diody nízká účinnost - silně se zahřívají -
vrstvy se musí roztažovat stejně, aby se
neoddělily → musí mít co nejvíce stejný mřížkový
parameter

Kvartěrní také rozlohy

- lze vybrat mřížkový parameter i E_g
- nesmíme však vyřadit

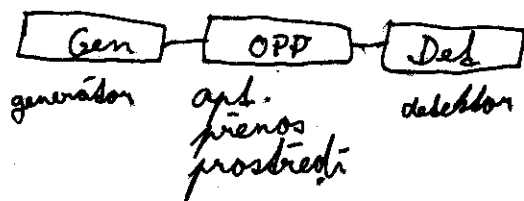
Polovodiče

SiC karbid křemíku

$E_g = 2,9 \text{ eV}$, vlastní vodivost při 1400°C
vojenské a kosmické využití
například modré LED

Materiály pro optoelektroniku

optické komunikace



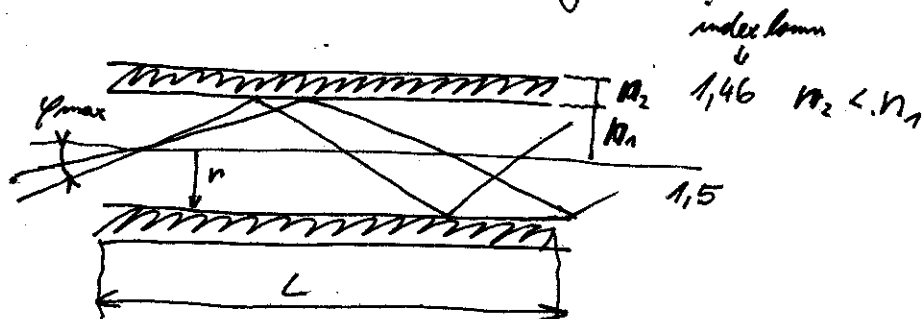
výhody - velká šířka přenos. pásma (oblasti 600-1400 nm)
(viditelné spektrum 400-700 nm)

- imunita proti elektromag. a opt. rušení
- odolnost proti korozí, (plynům) chemikáliím
- přenos malého množství energie
- vysoká kvalita přenosu (10^{-11} proti 10^{-3} m drátu)
- nízká cena (při přenosu na delší vzdál)

nevýhody - velká difuze vodíku do struktury
vlákna - vytváří komplex OH - zvyšuje útlum
- nevodivost (někdy i výhoda)
- vysoká cena při malých vzdál
- nízká mech. odolnost

optické vlákno

SiO_2 křemen - musí být velmi kvalitní



Numerická apertura - max. úhel, pod kterým může světlo vstoupit do vlákna

$$A_0 = \sin \varphi_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Normovaný kmitočet

$$\nu = 2\pi \frac{nr}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

r ... poloměr vládna

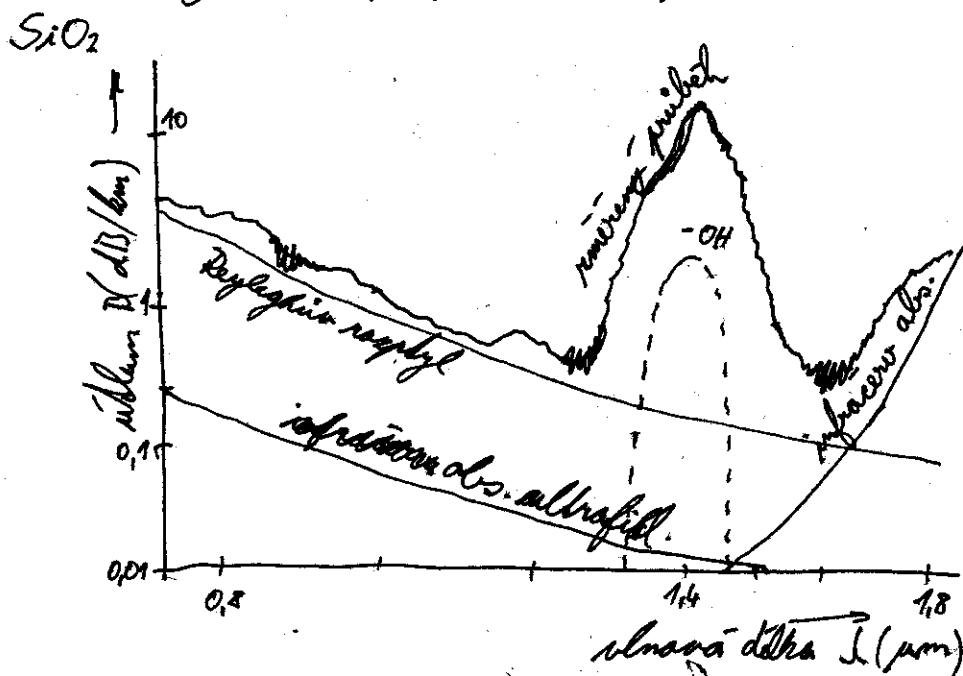
n ... z toho vyplývá přibližný počet vidin

$$N_v = \frac{\nu^2}{2}$$

Útlum opt. světlovodu

$$B = \frac{1}{L} 10 \log \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)$$

Materiály pro přípravu opt. světlovodů



ultrafial. absorpce - abs. na val. elektronech
infračerv. - " - na tepelných kmitech mřížky

OH - energie se spotřebovává na rotaci dipólů

R. rozptyl - na nehomogenitách materiálu

optimální vlnové délky?

850 nm, 1,33 μm, 1,55 μm - na to se vyrábí polovodiče

s přechodem E_g

útlum SiO_2 asi 0,2 dB/km

Pracovní vlnová délka generátorů světla

$$\lambda = \frac{1,24}{E_r} \quad (\mu\text{m}, \text{eV}) \quad \text{vyjde ze } h\nu = E_g$$

Dielektrika, izolanty

ideální izolant - látka nebo prostředí - neobsahuje žádné volné nosiče náboje

reálný izolant - nějaké volné nosiče obsahuje

dielektrikum - látka^(izolant), ve které může existovat el. pole, má schopnost polarizovat se

- vysoká rezistivita, ρ ϵ_r , nízké σ $\tan \delta$

- širší zak. pásu $> 2,5 \text{ eV}$
rezistivita $> 10^5 \Omega\text{m}$

$\tan \delta \sim 0,1 - 0,0001$

$\epsilon_r \sim 1 - 50000$ - rel. permisivita

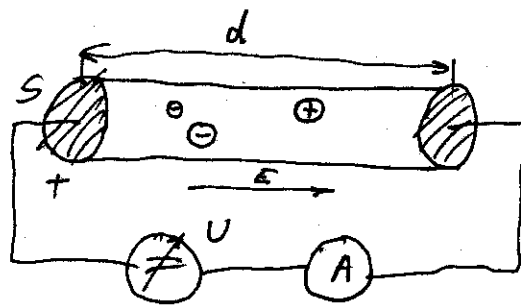
el. pevnost

- při aplikaci el. pole

- pohyb volných nos. náboje - el. vodivost

- " - vázaných " - el. polarizace

El. vodivost plyných izolantů



$$E = \frac{U}{d}$$

na probíhá generace a chůze nosičů
částice urychlovány Lorenzovou silou

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

na dané střední dráze ušetrí částice

$$E_{kin} = q \cdot E \cdot l_s$$

$E_k \approx E_i$ při nárazu do neutrální částice molekuly
bude ionizuje

- nebo osvětlit trubici.

$h\nu \approx E_i \rightarrow$ generace nosičů
- (katodová emise elektronů)
- chůze volných nosičů

- neutralizace - na elektrodách

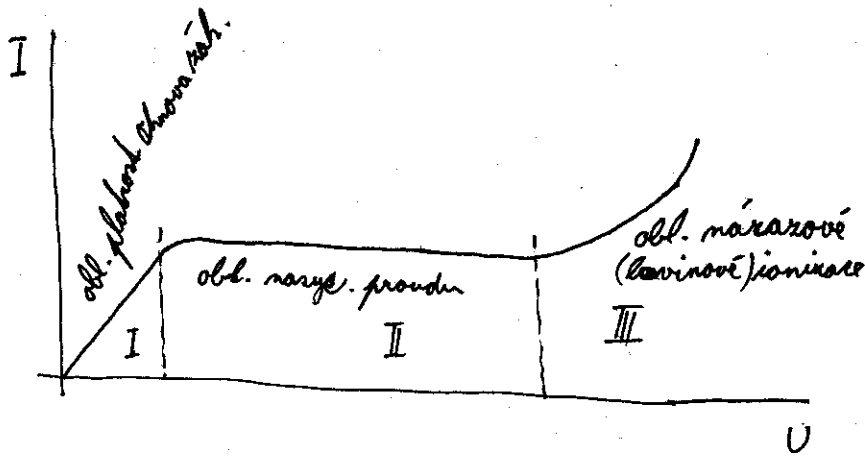
- rekombinace - kladný iont se spojí s elektronem

- vznik a chůze nosičů v rovnováze

$$\frac{dn}{dt} = \left(\frac{dn}{dt}\right)_{ion} - \left(\frac{dn}{dt}\right)_{neut} - \left(\frac{dn}{dt}\right)_{rek} = V\beta - \frac{I}{q} - V\alpha n^2$$

α - počet gen. iont párů
 β rekombinujících

na jednotku času
v jednotkovém objemu



I $v_B = v \propto m^2$

$\sqrt{\frac{\rho}{\alpha}} = m$

$j = q \cdot m \cdot b \cdot E$

~~$j = q \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\alpha}} \cdot (b_- + b_+) \cdot E$~~

$j = q \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\alpha}} (b_- + b_+) \cdot E$

I $v_B = \frac{I}{q} \Rightarrow S \cdot d \cdot B \Rightarrow j = q \cdot B \cdot d$

II vysoká rychlost iontů
lavinové násobení nosičů
nekontrolovatelně

Kapalně izolanty

Kapalina - molekuly shluk v blásky - ty mezi sebou pohyblivé

- mechanismy vodivosti

- iontová vodivost - ionizované celé blásky

- generace

= nárazem vytrženy částice do neutr. molekul,
působením ioniz. záření
disociace molekul

teplotní závislost konduktivity $\sigma = \sigma_0 \cdot \left(-\frac{E}{kT}\right)$

roztanci T - zvyšuje konduktivitu

- snižuje se viskozita, zvyšuje pohyblivost

Pevná dielektrika a izolanty

vodivost

- převážně iontová vodivost

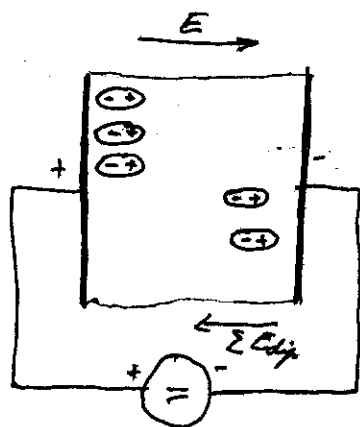
- při vysokých intenzitách el. pole a teplotách i elektronová

- disociace vl. molekul a příměsí a jejich difúze - iont se stěhuje ^{převážně} menší vahovými polohami v mřížce (dochází k transportu hmoty)

- tepl. závislost

$$\sigma = \sigma_0 e^{\left(-\frac{E_{\text{gen}} + E_{\text{dif}}}{2kT}\right)}$$

Polarizace dielektrik



při přivedení napětí vznikají dipóly - hradý zdrojem pole
- průběh elekt. polarizace
(atomová polarizace)  z-? ^{působí se soustředě} el. obal - " - ^{opracuje}

$$\vec{p} = Q \cdot \vec{d} \text{ [C} \cdot \text{m]} \text{ dipólový moment}$$

d tak 10^{-16} m, dipól velmi malý

$$\bar{P} = \frac{\sum p_i}{V} \quad [C \cdot m^2] \quad \text{dielektrická polarizace}$$

$$\alpha = \frac{p_i}{E} \quad [F \cdot m^2] \quad \text{polarizovatelnost}$$

(u některých
skupin chybí)

$$\bar{E}_{\text{lok}} = \bar{E} - \sum \bar{E}_{\text{dip}}$$

lokální pole
výsledné pole v oblasti
dielektrika

- pružná iontová polarizace
(vysunutí iontů a rovnováž poloh)

- polarizace orientací

brzděná rotace dipólů v polárních látkách
(např. voda) - velké dipóly

- polarizace spontánní

vzniká spontánní orientací dipólů v makroskopických
oblastech - doménách látek

klasifikace dle
povahy vnitřních sil

- pružné $\tau = 10^{-15}, 10^{-12} s$

- nepružné $\tau \sim 10^{-2} - 10^{-10} s$

relaxační doba τ - na jak dlouho se dipól nabačí
podle pole

atomová polarizovatelnost

$$\alpha_e = 4\pi \epsilon_0 R^3 \quad - \text{závisí na velikosti atomu (R^3)}$$

(odvození neplatí)

iontová

$$\alpha_i = \frac{Q^2}{\omega_0^2 \cdot m^*}$$

orientační (dipólová)

$$\alpha_d = \frac{p_i^2}{3kT}$$

nezávisí na teplotě

s rostoucí teplotou klesá

Relativní Permittivita

Maxwellovy rov.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$$

$$= \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi \vec{E}$$

χ .. dielektrická susceptibilita

$$\epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi \vec{E}$$

ϵ_r .. plyny kolem jedné
umělé struktury u sloupců

$$\boxed{\epsilon_r = 1 + \chi}$$

$$\vec{P} = \vec{D} - \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{V}$$

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E}$$

$$\boxed{\vec{P} = N \vec{p}_i = N \alpha_e \vec{E}_{\text{lok}} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E}}$$

$$\epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E} = N \alpha_e \vec{E}_{\text{lok}}$$

u plynu můžeme
sancellujeme $\sum \vec{E}_{ij}$

$\vec{E}_{\text{lok}}$ - intenzita lokálního pole
dipóly relativně daleko, neovlivňují se blízkými

$$\boxed{\epsilon_r - 1 = \frac{N \alpha_e}{\epsilon_0}}$$

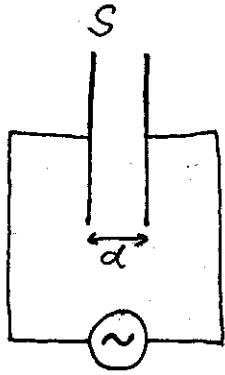
Zkouška - 4 nepopravené listy, tužku, možná kalkulačka
(podle toho, jestli naprogramuje)
otázky naprosto náhodně

Permittivita kondenzovaných látek (Clausius-Mossotti rec)

$$\boxed{\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{\sum N \alpha_i}{3 \epsilon_0}} \quad N(\alpha_e + \alpha_i + \alpha_o)$$

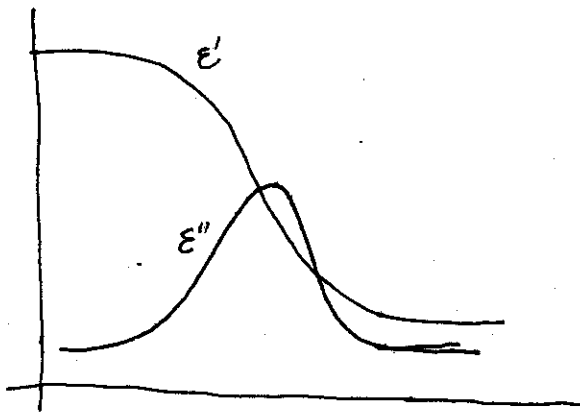
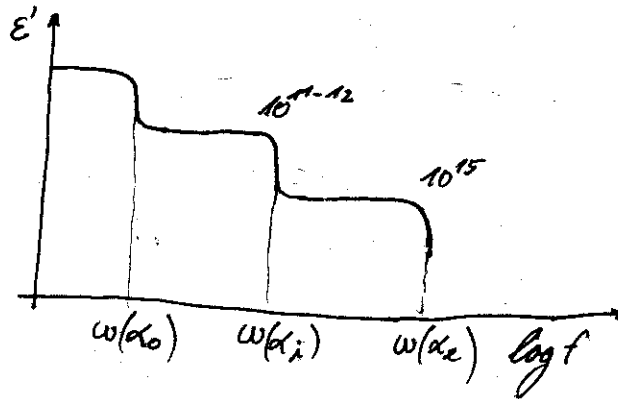
platí pro plyny a pro některé pevné látky

Relaxace permisividy



dipól se snaží udržet polohu vůči poli, aby jeho pot. energ. vůči pole byla minimální

zároveň dipól charakterizován relaxační frekvencí ω_r , při které už nestíhá rotovat
→ klesá kapacita (závislost ϵ_r na frekvenci)



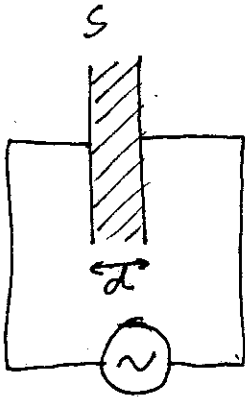
ϵ'' - ztrátová složka

díky energii odebrané dipólem z pole
vysoké při relaxační frekvenci

(ohřívání kupy v mikrovlnce)
(kupa je mixerný dielektrikum)

Dielektrické straty

naprosba nubyj!



$$U(t) = U_0 e^{j\omega t}$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon^* \vec{E}$$

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$$

Maxwell. mas. rovnice

indukce v kond / indukcia pole
komplex. rel. permitivita - bezrozmerne!
- vyjadruje se v komplex. tvaru

$$\text{rot } \vec{H} = j\omega \vec{D} = j\omega \epsilon_0 \epsilon^* \vec{E} = \sigma \vec{E} + \frac{d\vec{D}}{dt} =$$

$$\frac{C}{C_0} = \epsilon_r$$

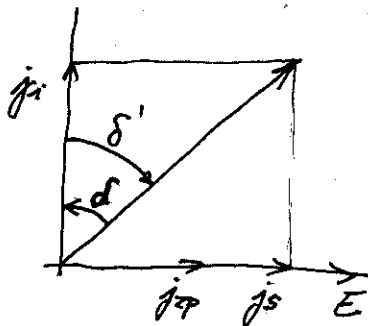
A roztokem

$$\frac{d\vec{D}}{dt} = \epsilon_0 \epsilon' \frac{d\vec{E}}{dt} - j\epsilon'' \epsilon_0 \omega \vec{E}$$

$$= \sigma \vec{E} + j\omega \epsilon_0 \epsilon' \vec{E} + \omega \epsilon_0 \epsilon'' \vec{E}$$

pradova hustota

$j\omega \epsilon_0 \epsilon'$ ideál posuv proudů
 $j\omega \epsilon_0 \epsilon''$ strat. polarizace



v ideálním dielektriku fázový posuv mezi U a I je 90°

$$\tan \delta = \frac{j\omega \epsilon_0 \epsilon''}{j\omega \epsilon_0 \epsilon'} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

i dielektrikum bez volných nabití vyjadruje straty

$$\tan \delta' = \frac{j\omega \epsilon_0 \epsilon'' + \sigma}{j\omega \epsilon_0 \epsilon'} = \frac{\epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}}{\epsilon'}$$

Ztrátový výkon

$$P' = j_{zp} \cdot E = \omega \epsilon_0 \epsilon'' E^2$$

$$\epsilon'' = \lg \delta \cdot \epsilon'$$

$$P' = \omega \epsilon_0 \epsilon' \lg \delta E^2$$

W/m³ měrný ztrátový výkon

1. Sd (objem kondenzátoru)

$$P = \omega C \lg \delta U^2$$

W ztráty v kondenzátoru
a ploše S a vzdál d

Elektrická pevnost dielektrik

$$E_p = \frac{U_p}{d} \text{ (V/m) podíl průměrného napětí a}$$

tloušťky dielektrika

je funkcí mnoha parametrů (průměrné napětí, tvar elektr. pol.,
závisí na podmínkách měření, výrazně
rozdílů

$$h\nu \geq E_i$$

$$\frac{1}{2} m v^2 \geq E_i$$

$$W_k = qE \cdot l_s$$

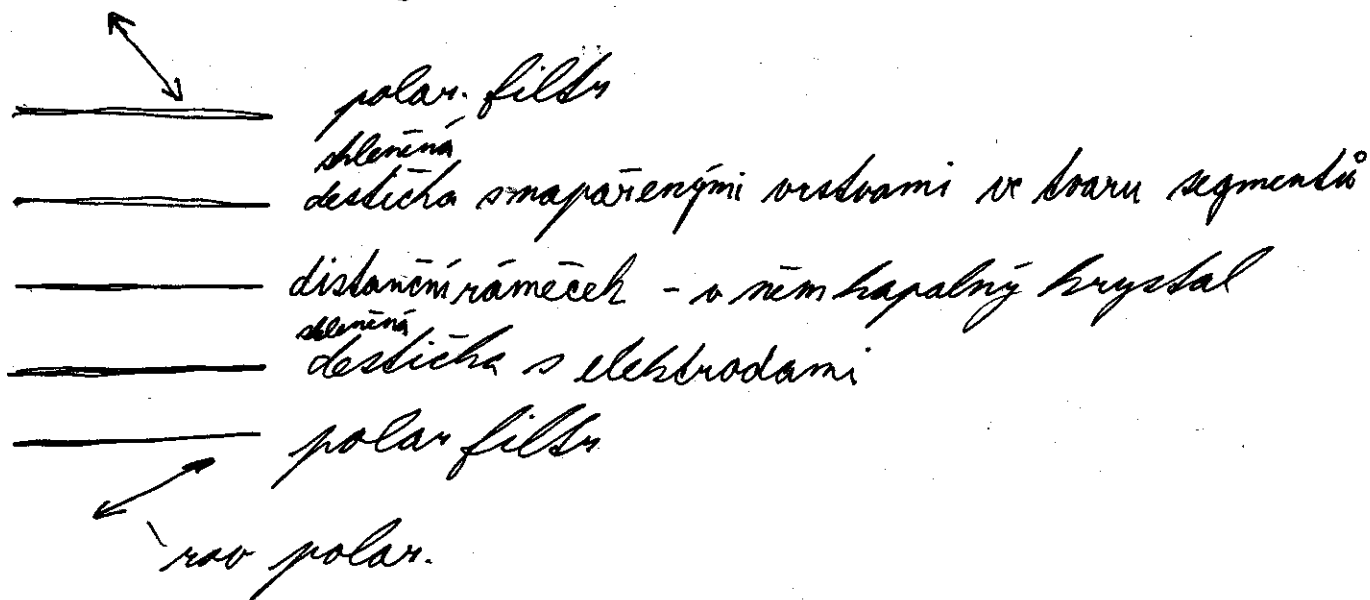
plyny - snadněji dochází k ionizaci - nejvyšší el. pevnost

kapaliny

pevné látky - nejvyšší el. pevnost

podíváme se na materiály dielektrik, nebude show

princip kapalného displaye



při přivedení napětí se molekuly
polarizují - mění se opt. vlastnosti krystalu

Kondenzátové keramiky

ϵ_r až 10 000

3 skupiny

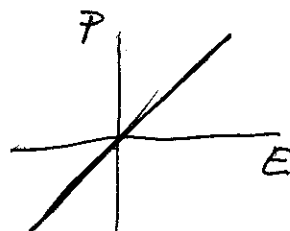
I. typ: nízkodielektrická, nízkotratová

ϵ_r do 100

lineární závislost mezi polarizací a int. pole.

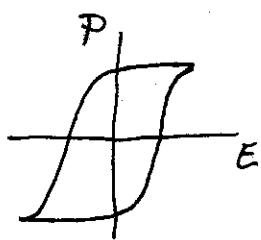
$\rho_g J$ max $0,8 - 1,0 \cdot 10^{-3}$

Negativní, stabiliz



I. typ.

látky se spontánní polarizovatelností



doménová struktura

atomy v elementární buňce

nejedná o přímé souřadnice, jejich

náboj se nekompenzuje

vzniká obrovská dielektrická polarizace

ϵ_r až 10000, ϵ_r při 47000

při přechodu přes Curieovu teplotu ϵ_r

výrazně klesá, (stovky procent)

je to různě kompenzováno,

III. typ

I. typ technologicky upravený,

vysvětluje se velmi tenkou vrstvou - větší kapacita
stejně vlastnosti při stejných rozměrech

nastudovat magnetika - obecně

Maxw. max. rovnice pro feromagnetika

tržby přechod správnosti

mag. vl. atomů, tržby magnetik

vztahy 8-8 až 10

magnetov. feromag

169 - vztahy při stud. mag

176 - energ. součin BH_{max}

kmmutp. feld. cvot. cz