

Pregled fizike 20. stol.

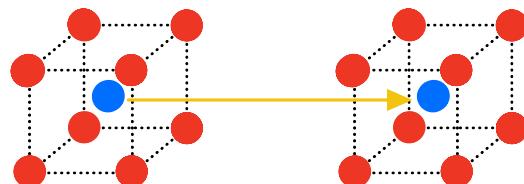
- od počasnega k hitremu: Galilejeva kinematika \rightarrow Lorentzova kinematika
- od velikega k malemu
- od enostavnih sistemov k kompleksnim: atomi in molekule \rightarrow kristali, plini, tekočina

Kristali

- mikroskopska struktura trehnih snovi
- atomi tesno zloženi v urejeno ponavljajočo se kristalno strukturo (neurjeni so stekla, soračna tekočina)
- ohranijo obliko, strižne deformacije so elastične (do določene mere) (pravijojo stično strižno napetost)
- izotropni ali anizotropni
- atomi so kvazi-statični: v notranji energiji prenadvija potencialna energija med atomi

Kristalna struktura

- periodična razpolitev atomov



enak atom v enaki okolici

- kristalna mreža: mrežica vseh periodično razporjenih točk na katerih se nahajajo enake skupine atomov. Položaj jo trije med seboj linearno modriški vektorji od ene do naslednjih točk - tvojih bazo: parallelepiped = osnovna celica mreže

Primeri osnovnih celic

- triklinična - vsi trije osnovni vektorji različnih dolžin in med seboj ne-pravokotni
- kubična - vsi trije vektorji so enake dolžine in med seboj pravokotni
- Ostali: monoklinična, ortorombska, tetragonalna romboedrična, heksagonalna

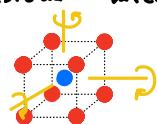
- Čgorjim enostavnik osnovnih celicam lahko dodamo ekvivalentne gradnike:

- v središču osnovne celice - telesno centrirana mreža
- v središču plastične osnovne celice - plastično centrirana mreža

- Kristalna mreža je neobčutljiva na premike za mnogokratni vektorji mreže - translacijska simetrija

Dodatne simetrije odvisne od osnovne celice.

Primer: kubična mreža



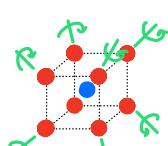
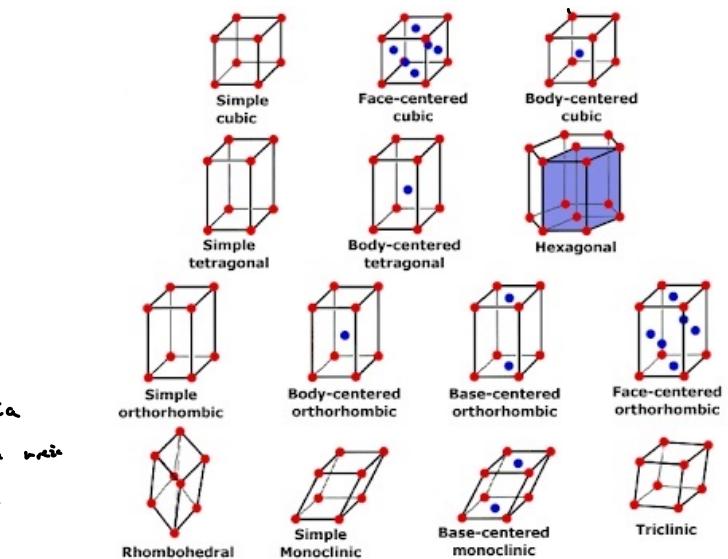
je neobčutljiva na vrtenje za

90° okoli osi skozi središča ploskev

Ima tri simetrične simetrijske osi.

Tre simetrije popolnoma določajo kubično mrežo.

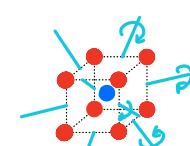
- Triklinična mreža nima nobenih simetrijskih osi:



ime šest trištevne

($2 \times 120^\circ$) simetrijske

osи skozi klesne diagonale.



ime šest dvoštevne

simetrijske osi skozi sredine

nasprotnih robov

- Rotacijske simetrije kristala določa (ne) isotropnost lastnosti kristala (dielektrična konstanta, magnetna susceptibilnost, topotermična in električna preoddost).
- Kristalna struktura je odvisna od velikosti atomov oz. ionov v strukturi ter usmerjenosti vez med njimi.

Primer: Ionski kristali

Najugodnejša struktura, ko so ioni najbolj tenuko zloženi:

- plaskovno centrirane kubične ter heksagonalne mreže (primer: zlato)

Vez v kristalih

Ionska vez

- primer: alkalni halogenidi (NaCl)
- elektrostaticna sila med ioni je izotropna
- elektronske legije ionov so krogelne simetrične, zato je izotropna tudi oddaja sila, ki je posledica Paulijevoga izključitvenega principa (ko se elektronske legije ionov začnejo prekrivati)
- ioni najboljši skupaj in glede na smer zverne med njima.
- Pri ionih pristopno enake velikosti pričakujemo plaskovno centrirano kubično mrežo (NaCl)
- Pri zelo različno velikih ionih pričakujemo eno stavno kubično mrežo (CsCl)

Elektrostatska sila

- izračunamo podobno kot za molekule
- upoštevati moramo vpliv električnega polja vseh ostalih ionov
- Primer: NaCl

- Vseh Na⁺ imam

- 6 najbljžjih sosedov Cl⁻ na razdalji $\frac{a}{2}$

- 12 sosedov Na⁺ na razdalji $\frac{\sqrt{3}}{2}a$

- 8 Cl⁻ na razdalji $\frac{\sqrt{2}}{2}a$

:

$$\bullet W_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{a} \left(-6 + \underbrace{\frac{12}{\sqrt{3}} - \frac{8}{\sqrt{2}} + \dots}_{d_R = 1,75} \right)$$

Modeliravna konstanta

- Skupna elektrostatska energija kristala $\sum_i W_e$

\uparrow elektrostatske energije na ionski par

$$\bullet \text{Za } \text{NaCl}: a \approx 0,56 \text{ nm} \Rightarrow W_e = 10 \text{ eV}$$

Ionizacijska energija Na $\rightarrow 5 \text{ eV}$

Elektronska afiniteta Cl $\rightarrow 3 \text{ eV}$

Kohezijska / vezavna energija NaCl $\rightarrow 2 \text{ eV}$

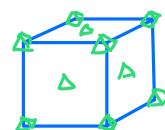
Razlike med energijama je posledica Paulijevga nad. n. m.

Kovalentna vez

- tvorijo jih e^- v superpoziciji stavljenih valenčnih elektronov posameznih atomov
- zaradi geometrije atomskih orbitalov so te oblike usmerjene \Rightarrow določajo strukturo kristalov
- Primer: diamantna struktura
 - Ogljik tvori 4 vez iz hibridiziranih $2s$ in $2p$ orbitalov usmerjenih v ogljičnih tetraedra



- tuorijo plaskovno centrirano kubično mrežo
- podobno tudi npr. Si, Ge, ... (polovalovalni)



- Primer: molekulski kristali

- kovalentne organske molekule in tudi žlahtni plini tuorijo kristalne strukture preko Van der Waalsovi vezi med električnimi dipolnimi momenti.

Kovinska vez

- v kristalih kovin se e^- (skoraj) prosti giblijo po celotnem kristalu \Rightarrow vez je elektrostatična privlačna sila med pozitivnimi ioni in skoraj enakomerno porazdeljenimi negativnimi nabojem (plini) elektronov.

Elektroni v kristalih

- večine lastnosti kristalov je odvisna od zvezilnih elektronskih stanj.

Enelektronska stanja

- Primer: elektron v potencialu 6 enakovrednih ravnanjuvih vodilnikov jedra (p^+)
 - če so p^+ delči nečeleni, so osnovna stanja e^- v sklopu enega izmed p^+ z energijo $W_0 = -13,6 \text{ eV}$ (verzna energija)
 - Tunnelski pojav: e^- lahko "presekajo" med ravnanjimi p^+
 \Rightarrow Verzne funkcije osnovnega stanja: linearne kombinacije osnovnih stanj vodilnega atoma (ϕ) s srednjim pri \vec{r} :

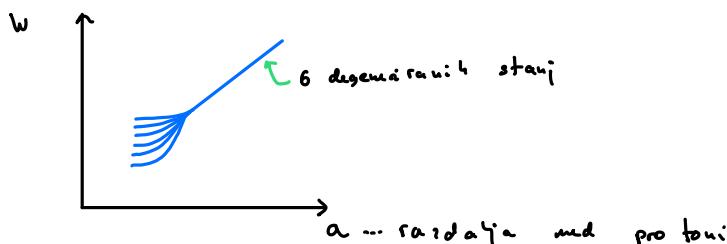
$$\Psi(\vec{r}) = \sum_{i=1}^6 c_i \phi(\vec{r} - \vec{r}_i)$$

↑

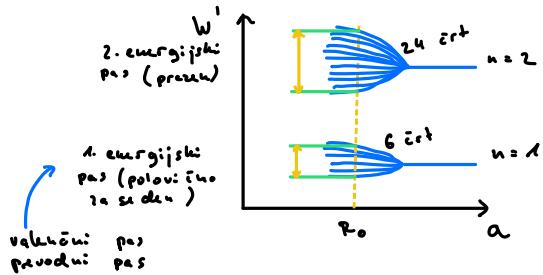
Verzne funkcije mora biti sode ali lene in zamenjava poljednik delč jedra (p^+).

\Rightarrow 6 degeneriranih reziter

- Ko zunanjšnjemu razdalji med protoni se začnejo verzne funkcije na sosednjih p^+ prekrivati.
- Bolj simetrične (sodi sode) verzne funkcije dajo manjšo energijo (bolj verzne stanje) (manj nizel \Rightarrow "nižji površinski drgi odvod" \Rightarrow "nižji površinski kinetički energije e^- ")



- Osnovna stanja vodilnega atoma se razcepijo na 6 stanj
- Enako tudi pri verznih stanjih: ker je $\langle r \rangle$ večji \Rightarrow so večje prekrivanje \Rightarrow večji razcep
- V kristalu z N atomi se atomske stanje razcepijo na N stanj. Pri tem ostane razlike energij med nujnostim (simetričen) in nujnosti stanjem (antisimetričen, z nujno nizeljnostjo)
- Za $N \gg 1$: energije so skoraj zvezno porazdeljene in tuorijo energijski pas
- Pauliovo izključitveno načelo: v vsakem elektronskem pasu je lahko 2N elektronov (2 je paritec spina)



Model Kovinskega vodika (v izolatorjih in poluprovodnikih je polu)

Gibanje elektronov v periodičnem potencialu

- Lastnosti e^- v potencialu enodimenzionalne verige atomov (ekvivalentno gibanje e^- preko ne meje ravni)

- Skupna potencialna energija $V_{\text{tot}}(x) = \sum_{j=1}^N V(x - ja) = \sum_{i=1}^N V_i$

- Skupaj s kinetičnim operatorjem \hat{T} določimo celoten Hamiltonian

$$\hat{H} = \hat{T} + \sum_{i=1}^N V_i \quad \text{izčrpa lastne stanje} \quad \hat{H}\Psi = W\Psi$$

- Dostavlj. so Ψ , zvezni periodični

$$\Psi(x) = \sum_{j=1}^N c_j \phi(x - ja) = \sum_{j=1}^N c_j \phi_j$$

- Ta bomo stvari ϕ_i označili verane stanje izolirancega atoma - približek teme veri

- Če so atomi delčki načrti verja $W = W_n$ W_n ... lastne energije valenčnega e^- v izolirancem atomu

- Poizvedemo koeficiente razvoja c_i

$$(\hat{T} + \sum_{i=1}^N V_i) \sum_{j=1}^N c_j \phi_j = W \sum_{i=1}^N c_i \phi_i$$

ϕ_i podajo ekspozitno = oddajnostjo od atoma
 \Rightarrow zamejimo $V_i \phi_i$ za vse $i \neq j, j \neq 1$
 Približek nejščljivih so sicer

$$\underbrace{\sum_{i=1}^N (\hat{T} + V_i) c_i \phi_i}_{W_n} + \sum_{i=1}^N (V_{i-1} + V_{i+1}) c_i \phi_i = W \sum_{i=1}^N c_i \phi_i$$

Množimo enčdo z ϕ_i^* in integriramo (potencialno obrazimo le približek nejščljivih sicer)

Dobimo:

$$\begin{aligned} \int \phi_i \phi_i^* dx &= 1 \\ \int \phi_i \phi_{i+1}^* dx &= I \\ \int V_{i-1} \phi_i \phi_i^* dx &= -Q \quad Q > 0 \\ \int V_{i+1} \phi_i \phi_i^* dx &= -J \end{aligned}$$

Sledi: $(W_n - 2Q) c_i + (I - J)(c_{i-1} + c_{i+1}) = W c_i$
 $W_n \gg Q$ približek teme veri (globoč potencial)
 $I \approx J$

$$\Rightarrow W_n c_i - J(c_{i-1} + c_{i+1}) = W c_i$$

Vzamemo ciljni ročni pogoje $c_n = c_0$.

Rabni pogoji so neponemšni za $n \gg 1$.

Nastavek za ravne valove: $c_j = A e^{ikz}$ mrežna razdalja

$$\Rightarrow \omega_n - J(e^{-ikz} + e^{ikz}) = \omega$$

$$\Rightarrow \omega_n = \omega_1 - 2J \cos ka$$

\hookrightarrow energija odsivne od
valovne frekvencije

$$\text{Položaj pogoj: } e^{ikz} = e^{ikz_0}$$

$$\Rightarrow k a N = 2\pi n$$

$$k = \frac{2\pi}{aN} n \quad -\frac{N}{2} \leq n \leq \frac{N}{2}$$

$\Rightarrow -\frac{\pi}{a} \leq k \leq \frac{\pi}{a}$

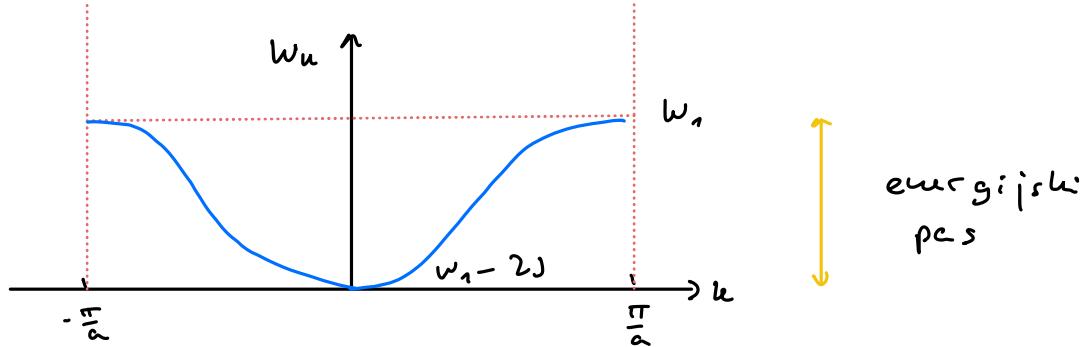
prva Brillouinova konusa

št. međusobnih fukcija Φ_{jn}

Valovni vektori k izven prve Brillouinove konusa?

$$\text{Primer: } n > \frac{N}{2}: \quad e^{i \frac{2\pi}{a} n j} = e^{i \frac{2\pi}{a} (n-N+N)j} = e^{i \frac{2\pi}{a} (n-N)j} \cdot 1$$

\Rightarrow Stanje $k = k + \frac{\pi}{a}$ je enako stanju $k' = k - \frac{\pi}{a}$ znatnoj prve Brillouinove konusa.



Razvoj ω_k za možne k :

$$\omega_k = \omega_1 - 2J + J a^2 k^2$$

spremenljivi del energije $a^2 k^2$ kot pri
prostih mešavinih delceh.

\Rightarrow Elektron v bližini dne pasu se vede kot prost delci v elektronski mreži

$$m^* = \frac{t^2}{2Ja^2}$$

\hookrightarrow obratno sorazmerno $= J$ (prikupljanje sosednjih atonov)

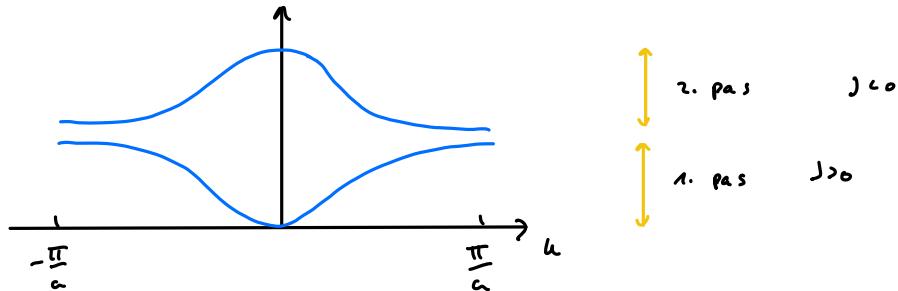
Pasove dobimo iz vseh atomskih stanij

\Rightarrow stanje pod valovnim imajo zamešljivo prekrivanje \Rightarrow črno pasu zelo majhne

\Rightarrow Višja stanje tronijo zbirčne pasove

J je lahko negativna, če Φ med sosednjimi spremenji predzah

$$J = - \int v_i \phi_j \phi_{j+1}$$



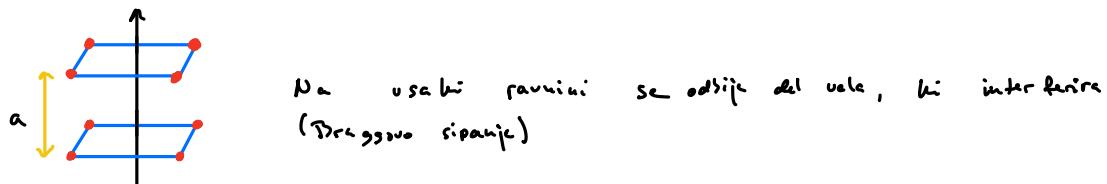
\Rightarrow negativna efektivna masa?

Elektronskega pasova v kristalih lahko obrazujemo diki v (nespravni) prilikeh skoraj prostih elektronov.

Valovne f. prostih e^- - ravni valovi

$$\Psi = A e^{i(kz - \omega t)} \quad ; \quad \omega = \frac{k^2}{2m} = \frac{q^2 k}{2m}$$

Pozorno si poglimo 1D primer ~ sipejce e^- na pravokotnih ravninah



$$\text{Vrh sipejce interferenca pri } 2a \sin \frac{\theta}{2} = n\lambda \quad \lambda = \frac{2\pi}{n}$$

$$\text{Nas zanima } \theta = \pi \Rightarrow n a = n \pi$$

Pri drugih k je interferenca zamešljiva ob sipejcih čar nosi ravnih. Valovna funkcija upadnega in sipejega vala v obeh smeri pri $k = \frac{n\pi}{a}$ imo due rezultati

$$\Psi_{\pm} = \frac{1}{2} A \left(e^{i \frac{n\pi x}{a}} \pm e^{-i \frac{n\pi x}{a}} \right)$$

↑ predzah ni določen

$$\Psi_+ = A \cos \frac{n\pi x}{a} \quad \Psi_- = A \sin \frac{n\pi x}{a}$$

↑ Normalizacija določimo

na celici kristala

$$\int_0^a |\Psi_{\pm}|^2 dx = 1 \Rightarrow A = \frac{1}{\sqrt{a}}$$

Vpliv potencialne energije polje atomov na ti dve e^- stavi:

$$(V_{nn}(x) = \sum_j V(x - ja) \propto 0)$$

$$\langle V_{kr} \rangle_{\pm} = \int_0^a V_{kr}(x) \Psi_{\pm}^2 dx$$

V_{kr}, Ψ_{\pm} so periodični f. s periodom a , Ψ_{\pm} je normalizirane na intervalu $0 \leq x \leq a$

$$\int_0^a \Psi_{+} V_{kr} \Psi_{-} = 0 \quad \dots \text{zatočva po ortogonalnosti}$$

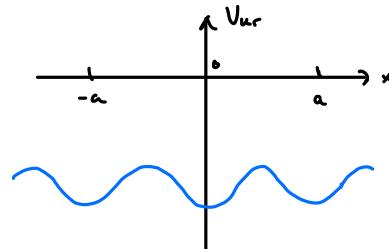
Ψ_{\pm} ste lastni stanje V_{kr}

Če izberemo koordinatni sistem tako, da ležijo atomske ravni pri $x = 0, a, 2a, \dots$ potem

$$\langle V_{kr} \rangle_{+} < \langle V_{kr} \rangle_{-}$$

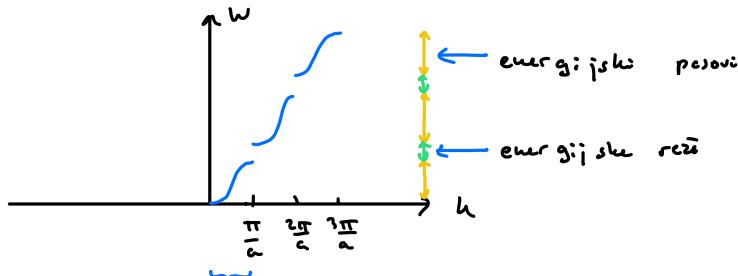
$\Rightarrow \Psi_{\pm}$ niste degenerirani

$$(W = T + V_{kr})$$



Pri vrednostih $k = \frac{n\pi}{a}$ došimo energijsko rezonančno

$$\Delta W = \langle V_{kr} \rangle_{-} - \langle V_{kr} \rangle_{+}$$



1. Brillainova cone

Močne stanje e^- v parovih. Znotriji parni stanje e^- dobro opisujejo ravni valovi (e^- štejejo prosti delci)

Efektivna masa elektrona:

$$m^* = \frac{dW}{dk^2}$$

V vrhnu paru je negativna

Gibanje e^- v zunanjem polju

$$\begin{aligned} \text{Hitrost prostih elektronov} \quad v &= \frac{p}{m} = \frac{t k}{m} \\ \text{Kinetična energija} \quad W_{kin} &= \frac{t^2 k^2}{2m} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow v = \frac{1}{t} \frac{dW_{kin}}{dk}$$

"klasična hitrost delca" \approx grupna hitrost vale verjetnostne amplitudne"

Relacijsko lahko uporabimo za e^- v kristalu.

Kristal postavimo v zunanjje polje (sila F)

$$\Rightarrow \text{Spremenjena energija} \rightarrow \text{stav} \quad dW_{\text{kin}} = F ds = F v dt = \frac{1}{t_0} F \frac{dW_{\text{kin}}}{du} dt$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{du}{dt} = \frac{F}{t_0}} \quad \text{"Newtonov zakon za elektron v kristalu"}$$

Primer: zunanje elektro magnetno polje

Približno je dober, da $\frac{dW_{\text{kin}}}{du} \ll 1$ (majhna sprememba polja) ter $k \ll \frac{m}{a}$
(globočko znotraj 1. Brillouinove cone $\approx e^-$ se obnove kot klasičen delec =
maso m in gibalno količino $p = tk = m v$)

Prevodniki in izolatorji:

Popoljuje energijskih pasov z elektronami. Tadnji pas, ki je delno ali v celoti
zaseden rečemo valencni pas.

Primer: kristal Na

- atom Na ima en valencni ($2s$) elektron
- valencni pas lebko sprejme $2N$ elektronov (n...gr. atomov, 2... zaradi spina)
- \Rightarrow pas zaseden le do polovice

Pri viski temperaturi so zasedene vse stanje do velike energije (Fermijeva
energija W_F).

če je valencni pas v celoti zaseden, je Fermijeva energija ujemna s valencnim
in nasednjim (visjim) pasom.

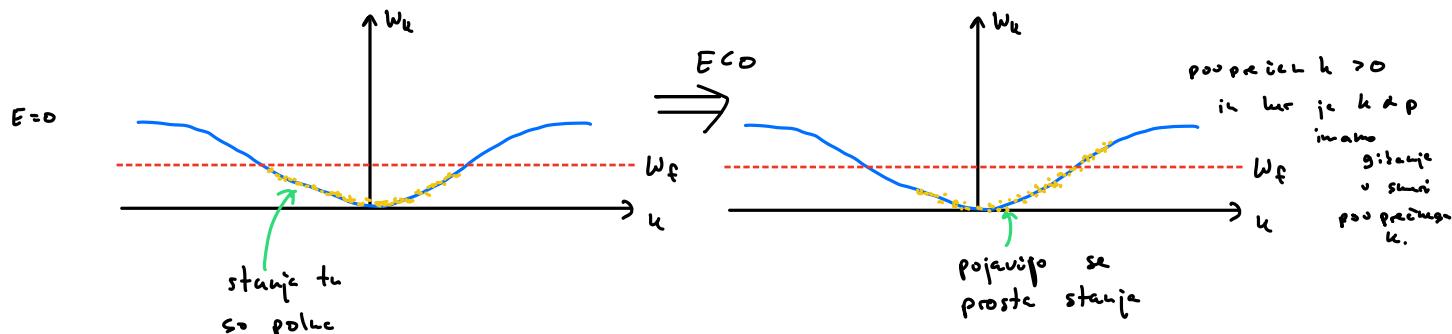
Slov z delno zapolnjim valencnim pasom v zunajem el. polju \Rightarrow sila $\vec{F} = -e\vec{E}$

\Rightarrow elektronom se poveča k (v smere \vec{E})

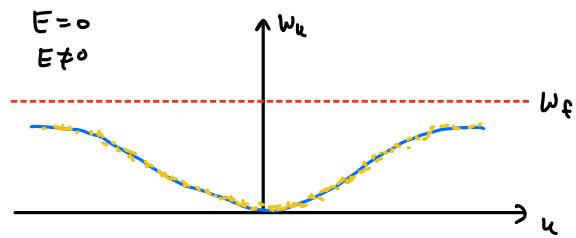
\Rightarrow pospešujejo lebko le e^- pri W_F

\Rightarrow posledično če se sprostijo stanje pri manjših k , ki so nato zapolnjita itd.

\Rightarrow dobitno električni tok: prevodnik - krovna



Snow je zasedenim vakuuum pasom: kjer je nima prostih sosednjih stanj. Ni el. tolke - izolator



V teh dimenzijah je struktura elektronskih pasov lahko bolj zapletena.

\Rightarrow pasovi v nekaterih smereh ki ne imajo Brillouinove zone razlike visoki

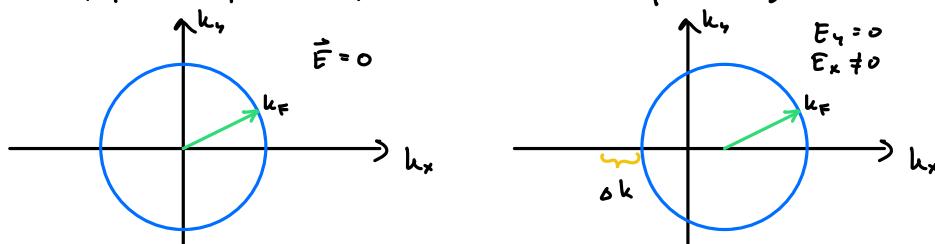
\Rightarrow Stanje s Fermijevim energijskim točkoje plastični - Fermijevi površini

\Rightarrow V enostavnih hrovinih je ta površina površina krogla. Velja za kristalni krog $W_F = \frac{\pi}{2} k_F^2$,

$W_F = \frac{\pi}{2} k_F^2$

C velikost valovnega vektorja pri W_F

\Rightarrow Zmanjšaj pole \vec{E} povzroči premik celotne Fermijeve krogle



Prosti elektroni bi v zunanjem E enakovredno pospeševali. V kristalu (pri končni temperaturi) je prisotno sisanje na kristalni uravni zaradi termičnega vibriranja in prisotnosti mešavice.

Skupni efekt: $\frac{d\langle p \rangle}{dt} = -eE - \frac{\langle p \rangle}{T}$

C pospešni čas med tolki
na mešavinih

Pomenljivo: sisanje na periodni (periodični) in statični kristalni uravni upoštevamo že v opisu pasov (pojav disperzije, energijske reči).

$\langle p \rangle$ meni premik celotne Fermijeve krogle. Gibalna kolobina in s tem hitrost posameznih e- se kaže zanesljiva.

V stacionarnem stanju: $\langle p \rangle = n^+ \langle v \rangle = -e \gamma E$

$$\Rightarrow \langle v \rangle = -\frac{e \gamma}{n^+} E$$

β_e ... gibaljivost elektronov v pravodniku

Gostota električnega tolka

$$j_e = -e n_e \langle v \rangle = -\underbrace{\frac{e^2 n_e \gamma}{n^+}}_{\downarrow} E$$

štvidljiva gostota σ_e ... pravodnost hrovine
e- v pravodniku

$$\sigma_e = e n_e \beta_e$$

Primer: kristal Na

$$\sigma_e = 2,4 \cdot 10^7 \text{ } (\Omega \text{m})^{-1}$$

$$n_e = 2,6 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$$\tau_e = \frac{m^* \sigma_e}{e^2 n_e} \approx 3,2 \cdot 10^{-14} \text{ s} \quad (m^* \approx m_e)$$

Povprečna hitrost e^- pri $j_e = 10^6 \frac{A}{m^2}$

$$\langle v \rangle = \frac{j_e}{e n_e} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

\Rightarrow zelo majhen odnik od ravnotežje

Ocene preuđnosti: povprečna prosta put e^-

$$l_e = \frac{v_F}{\tau_e} \quad ; \quad v_F = \sqrt{\frac{2 \omega_F}{m^*}}$$

sipajo se le e^- na površini Fermijevih sfir

Sipanje znači: tehničnih merenih miknih atonov u kristalu

$$l_e = \frac{1}{\pi R_t^2 n_e}$$

presek za

sipanje na
posameznih
atomih

R_t^2 - povprečni kvadrat odnika atomov iz ravnotežne legi

za dovolj visoke temperature ($T > T_d$; T_d - Debyeova temp.)
uporabimo eliptičnični izrek

$$\frac{1}{2} k_B T = \frac{1}{2} \mu \langle v^2 \rangle = \frac{1}{2} \mu \omega^2 R_t^2$$

kinetična
energija
miknih
atomov

$\omega \approx \omega_0$
 ω_0 ... Debyeova frekvencija
značilna frekvencija
miknih

$$\Rightarrow R_t^2 = \frac{k_B T}{\mu \omega_0^2} \Rightarrow l_e = \frac{\mu \omega_0^2}{\pi k_B T} \text{ ?}$$

$$\text{specifična upornost } \delta = \frac{1}{\sigma_e} = \frac{\pi m^* \sigma_F}{e^2 n_e \mu \omega_0^2} \text{ ?}$$

linarna
odvisnost
od temperature

$$\text{Primer: Na: } \omega_0 = \frac{k_B T_D}{\hbar} = 1,9 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$$

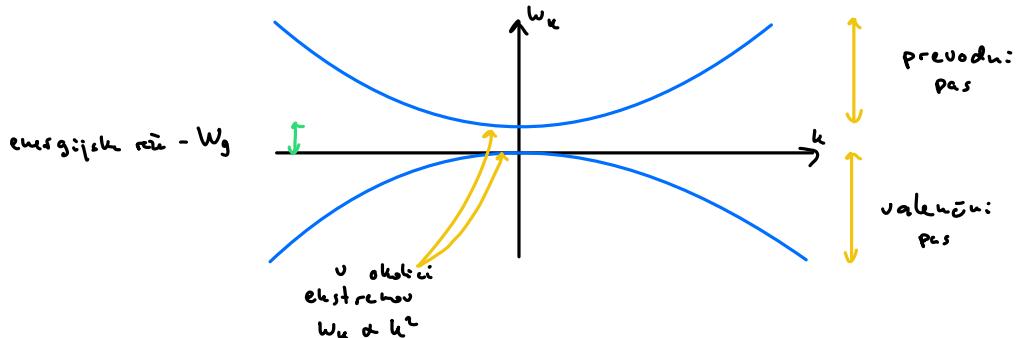
$$\Rightarrow l_e = 40 \text{ nm}$$

$$v_F = c \sqrt{\frac{2 \omega_F}{m^*}} = 7,6 \cdot 10^7 \text{ m/s} = 1,3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

$$\Rightarrow \tau_e = \frac{l_e}{v_F} = 4 \cdot 10^{-14} \text{ s}$$

Polprevodniki

Polprevodniki so izolatorji pri katerih je energijski razpon dovolj majhen, da je pri zaneseni temperaturi del elektronov v energijskem pasu nad valenčnim. Ta je le delno zaseden in prevozi električni tok \Rightarrow prevodni pas.



$$\text{Primer: Si: } W_g = 1,1 \text{ eV}$$

$$\text{Ge: } W_g = 0,7 \text{ eV}$$

$$\text{C: } W_g = 5 \text{ eV} \quad (\text{u diamantni oblike})$$

Cisti polprevodniki

Število elektronov v prevodnem pasu: v bližini: dne pasu obrazenega c in v približku prostege Fermijevoga plina

$$N_c = \int_{W_g}^{\infty} f(W) d g_p \quad d g_p = \frac{4\pi (2m_e)^{3/2}}{\pi^3} \sqrt{W-W_g} dW = A_p \sqrt{W-W_g} dW$$

energijski stepljen od verjetnost za vrha valenčnega pasu zase dobrost stanja

$$f(W) = \frac{1}{e^{\beta(W-W_F)} + 1} \quad \beta = \frac{1}{k_B T}$$

Fermijev razdeljeni število

Potrebujemo vrednost Fermijeve energije W_F : pogoj ohranitve števila vseh elektronov.

$$N = N_v + N_c$$

število vseh elektronov c v = št. e- v prevodnem valenčnem pasu

$$N_v = N - N_c = \int_{-\infty}^0 d g_v - \int_{-\infty}^0 f(W) d g_v = \int_{-\infty}^0 1 - f(W) d g_v = \int_{-\infty}^0 1 - \frac{1}{e^{\beta(W-W_F)} + 1} d g_v =$$

št. stanje v valenčnem pasu = N

$$\begin{aligned} &= \int_{-\infty}^0 \frac{1}{e^{-\beta(W-W_F)} + 1} d g_v = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{e^{-\beta(W-W_F)} + 1} \frac{4\pi (2m_e)^{3/2}}{\pi^3} \sqrt{-W} dW = A_v \int_{-\infty}^0 \frac{1}{e^{-\beta(W-W_F)} + 1} \sqrt{-W} dW \\ &\Rightarrow N_v = A_p \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{W''}}{e^{\beta(W''+W_g-W_F)} + 1} dW'' \end{aligned}$$

Pogoj: št. e- v prevodnem pasu = št. e- v valenčnem pasu

$$N_c = N_v$$

\therefore št. $A_p = A_v$ (efektivna števila elektronov in vrhovi v kristalu enaki)

$$\Rightarrow W_F = W_g - U_F$$

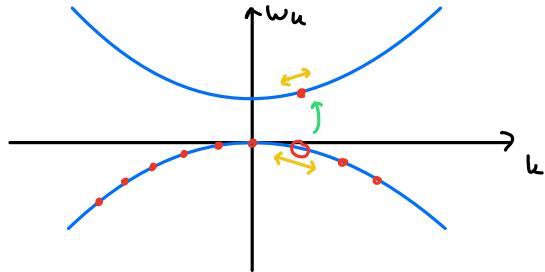
$$\Rightarrow W_F = \frac{1}{2} W_g \quad \text{Fermijevs energijo se sestavi ena gjishe reie}$$

$$\text{Cil } n_e^e \neq 1/n_e^v : \quad W_F = \frac{1}{2} W_g + \frac{3}{4} k_B T \ln \left(\frac{1/n_e^e}{n_e^v} \right)$$

Temperaturno odvisno efektivna Fermijeva energija je realna vrednost.

Električni tok v polprevodniku

Električni tok v polprevodniku nosijo e⁻ v presegu posm ter vredni v elektricnih posm.



V zunanjem polju se pravno nista premakne k |k|=0 ⇒ Skupna energija posm se poveča

$$\Delta W = W_v \approx 0 - \left(-\frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \right) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

↑ približno kvadratna disperzija
v bližini ekstrema posm

Dosežimo konutično energijo delce z nato $|k_v|^2 = -m^*$

\Rightarrow Gibelna holičina posm z veliko pri $k=0$: $p=0$

$$\text{pri } k \neq 0 : \quad p = -\hbar k$$

↑ pravno nista se giblje v nasprotni smeri od e⁻.

Pravno nista vzel se veden kot (kvarč) delci s pozitivnim nabojem ter z nato $|k_v|$

Skupne gostote električnega toka: $j = j_e + j_v$

$$j_e = -e n_e \langle v_e \rangle = e n_e \beta_e E$$

↑ gibljivost e⁻ v presegu posm

$$j_v = +e n_v \langle v_v \rangle = e n_v \beta_v E$$

Primer: Si pri sodni temperaturi: $\beta_e = 0,16 \frac{V^2}{K}$, $\beta_v = 0,04 \frac{V^2}{K}$

Primesi

V S: kristal dodano pet-valentne primes (As, P). Atomi primesi su ugradjani u kristalnu mrežu, a e⁻ su atom primesi ostane, nema prostora u valenčnom paru. Pri niskim temperaturama ostane e⁻ veza u pozitivni ion primesi.

$$\text{Vezava energija (podudara slobodni energetski učinak atom) } W_0 = -\frac{e^4 m_e}{32\pi^2 (\epsilon \epsilon_0)^2 t_0^2}$$

$$W_g - W_d = \Delta W_d = -\frac{e^4 m_e^*}{32\pi^2 (\epsilon \epsilon_0)^2 t_0^2}$$

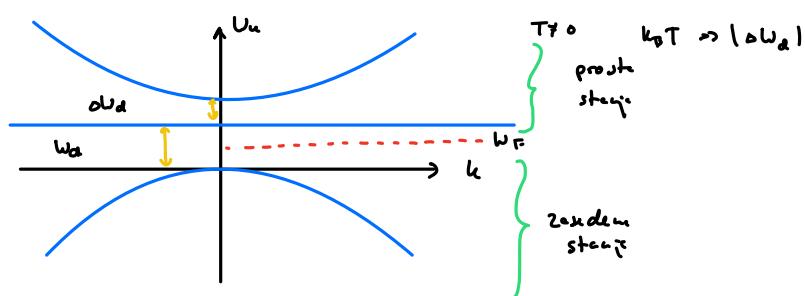
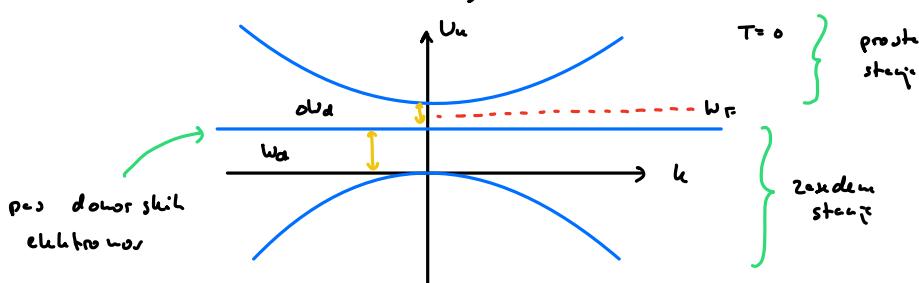
energijski stejnje
donorskoga e⁻ nabori induciraju polarnizaciju

$$\text{Primer: Si, } \epsilon \approx 10, m_e^* \approx 0,1 m_e \Rightarrow \Delta W_d \approx 10^{-3} W_0$$

$$\text{Za primjer As: } \Delta W_d = -0,05 \text{ eV}$$

\Rightarrow Polpravduh tipa n: donorstvo primesi

\Rightarrow Donorski elektroni su u stejnje s ΔW_d energijo pod pravduh parom



Prirodni efektivni Fermijev energiji od slobodne temperature zaredi primesi

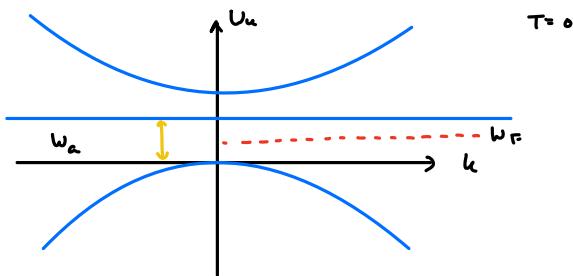
$$k_B T \ll W_g \quad ; \quad k_B T \gg |\Delta W_d|$$

V S: kristal dodano trivalentne primes (Al, Ga). Atomsi su gradjani u mrežu, a elektron primesi "manjki" \Rightarrow negativni rezuli. Vezave je u atom primesi i u zeleno u stejnje ned valenčnim parom. Negativni ion (prim + 4 okoliški e⁻) u pozitivno nesitu vrzel tvori u valenčnu atom podudar sistem:

$$W_a = \frac{e^4 m_e^*}{32\pi^2 (\epsilon \epsilon_0)^2 t_0^2}$$

$$\text{Za Al ali Ga u Si: } W_a = 0,06 \text{ eV}$$

\Rightarrow Trivalentni atom su akceptorstvo primesi: polpravduh tipa p.



Št. e⁻ in vrzeli v polprevodniku tipa n

$$n_e = A_p \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{v}}{e^{\beta(v+u_0-u_F)} + 1} dv = \dots$$

zrcali prisotnost donorstva
 stropu in spomeni $U_F (\rightarrow \frac{U_a}{2})$

$$\dots = A_p \int_0^{\infty} \frac{v}{e^{-\beta(v+u_0-u_F)}} dv = \underbrace{A_p (k_B T)^{1/2}}_{\propto u_0} e^{-\beta(u_0 - U_F)}$$

$$n_v = A_p \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{v}}{e^{\beta(v+u_0)} + 1} dv = \propto u_0 e^{-\beta U_F}$$

$A_v = A_p$
 $\propto \gg 1$

$$\Rightarrow n_e n_v = u_0^2 e^{-\beta(u_0 - k_B T)} \quad \leftarrow \text{Produžen od } U_F \text{ ter od gostote in tipa prisotnosti}$$

$$n_e = n_v + n_d (1 - g(U_d)) = n_v + \frac{n_d}{e^{-\beta(u_0 - U_F)} + 1}$$

Pri sobni temp. je večina donorstih atomov ioniziranih in vrzeli skoraj ni.

$$\Rightarrow e^{-\beta(u_0 - U_F)} \approx 1$$

$$\Rightarrow n_d \gg n_v$$

$$\Rightarrow n_e \approx n_d = n_0 e^{-\beta(u_0 - U_F)}$$

$$\Rightarrow U_F = U_0 - k_B T \ln \frac{n_0}{n_d} \quad \text{Uporabno pri } n_0 > n_d$$

Elektron: so vedrinski nosilci načaja

$$\sigma \approx e_0 n_d \beta_v \quad \text{prevodnost e⁻ v prevodnem pasu}$$

$\Rightarrow U_F$ je premaknjena blizu U_0 , dokéti nad polovico reže

Število elektronov in vrzeli v polprevodniku tipa p:

podeljen razmikom kot je tip n:

$$\Rightarrow n_a \approx n_v = n_0 e^{-\beta U_F}$$

$$\gg n_e$$

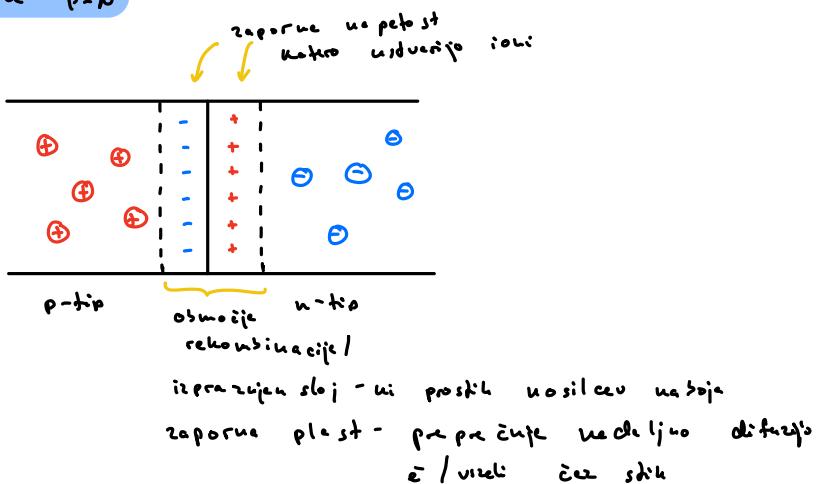
$$\Rightarrow U_F = k_B T \ln \frac{n_0}{n_a}, \quad \sigma = e_0 n_a \beta_v$$

Vedrinski nosilci načaji so vrzeli.

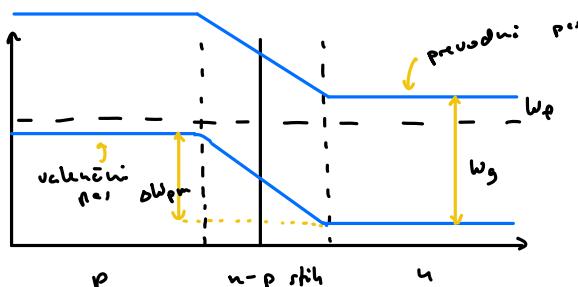
Skupno dopiranje polprevodnikom (tipa n ali p):

- prevodnik je pri sobni temperaturi se lekko znetra poveća
- primjeri tipa p i u uznatru istoga polprevodnika su kod redovne iznicanje

Stik P-N



Vezani nadoji: donorских / akceptorских ионов утвореного електричног поља ⇒ скок потенцијала ΔU .



$$\Delta W_{pn} = W_F - W_{F_p} \approx W_d - W_a$$

$W_F = V$ је највећији кога треба да је стик између две страни стика, сicer се електрони / ваздух не могу дифузирати чрез стик.

Auditive tokovi nadoji чрез стик p-n:

• Електрони: на страни p: manjinske nosilce

$$n_{ep} = n_0 e^{-\beta(W_g - W_{F_p})}$$

дифузија - ток против страни n

$$I_{ep} = A n_0 e^{-\beta(W_g - W_{F_p})}$$

на страни n: електрони користе прелажећи потенцијалне барје ΔW_{pn}

$$I_{en} = A n_n e^{-\beta \Delta W_{pn}}$$

$$= A n_0 e^{-\beta (\Delta W_{pn} + W_g - W_{F_p})}$$

Obranjujući nadoji: ток мораћи бити равнотеже

$$\Rightarrow W_g - W_{F_p} = \Delta W_{pn} + W_g - W_{F_n}$$

$$\Delta W_{pn} = W_{F_n} - W_{F_p}$$

Tok glikidom pred
u spustiti u
redukcijski

• Ваздух: $I_{on} = A' n_0 e^{\beta W_{F_n}}$

$$I_{op} = A' n_0 e^{-\beta (\Delta W_{pn} + W_{F_p})}$$

Stik p-n pod zunanjjo napetostjo

$V > 0$ (povidi se priključek na stran p)

⇒ stik pokrece energije in zmanjša za Ve

⇒ Tok večinskih elektronov in strani in na stran p (I_{np}) se poveča za $e^{Ve/kT}$.

Tok menjinskih elektronov se ne spremeni

$$\Rightarrow I_n = I_{np} e^{Ve/kT} - I_{pn} = I_{np} (e^{eV/kT} - 1)$$

Podobno je vrati

$$I_p = I_{pn} (e^{eV/kT} - 1)$$

$$\text{Skupaj: } I = I_0 (e^{eV/kT} - 1)$$

\uparrow
ustvarjujoči stik dioda

- Tok pri napetosti v odprtji stiki uverjajo eksponentno

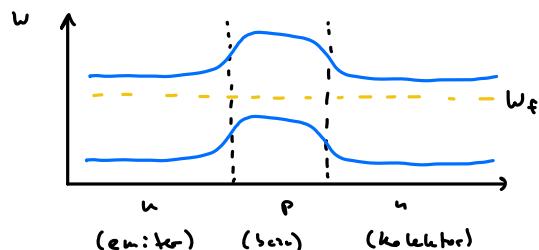
⇒ možemo podeliti napetosti pri velikih tokovih

- V rezorni steki je tok enakov na I_0 (zaznamršiv)

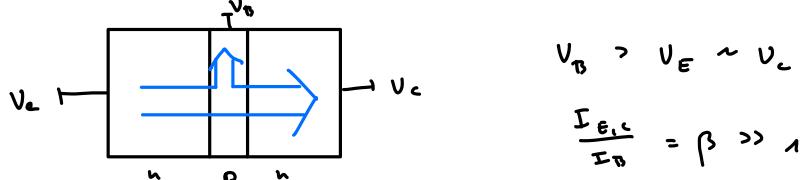
Transistor

Zgoraj je n-p-n ali p-n-p polprevodniški stik.

Stena energij sklik posou (brez zunanjih napetosti) za tip n-p-n:



Na emitor dana negativna napetost glede na bazo kot pri diodi, se tok poveča, vendar, če je na bazi ozka, vedno e^- z difuzijo preide v kolektor



$$V_B > V_E \approx V_C$$

$$\frac{I_{E,C}}{I_B} = \beta \gg 1$$

tokovski ojačevalnik

S spremembo napetosti med V_B in V_{CE} dobi se električno stikalo.
Osnove logičnih verij.