F11 konduktivitet i halvledare Tors Lv5

$T \neq 0$: elektroner i ledn.bandet
hål i valensbandet

E-fält $\rightarrow$ ström!

För elektroner: $m_e^* \frac{dV_e}{dt} = -\cancel{m_e^*} \frac{V_e}{\tau_e} - eE$

kollisions-tid

$\hookrightarrow$ stationärt: $V_e = \underbrace{\frac{-e\tau_e E}{m_e^*}}_{\text{drift hastighet}}$

$\rightarrow$ ström: $j_e = -en_e V_e = \frac{e^2 n_e \tau_e}{m_e^*} E = \sigma_e E$

σ_e

~~ne~~ n_e - elektron-täthet

För hålen: $m_h^* \frac{dV_h}{dt} = -m_h^* \frac{V_h}{\tau_h} + eE$

$\left\{ \frac{dV_h}{dt} = 0 \right\} \rightarrow V_h = \frac{e\tau_h E}{m_h^*}$

motsatt tecken mot elektronerna!

ström: $j_H = en_h V_h = \frac{e^2 n_h \tau_h}{m_h^*} E = \sigma_h E$

σ_h

{ samma tecken på strömmen men olika tecken på drifthastighet och laddning! }

Sätt: $n_e = n$ elektrontäthet ("negativ")

$n_h = p$ håltäthet ("positiv")

Kan skriva totalströmmen enligt:

$$j = j_e + j_h = (\sigma_e + \sigma_h)E$$

där $\sigma_e = ne\mu_e$, $\sigma_h = pe\mu_h$ } μ_i – MOBILITET, ej kemisk potential!

Mobilitet $\mu = \dfrac{\text{flödeshastighet}}{\text{elektriskt fält}}$

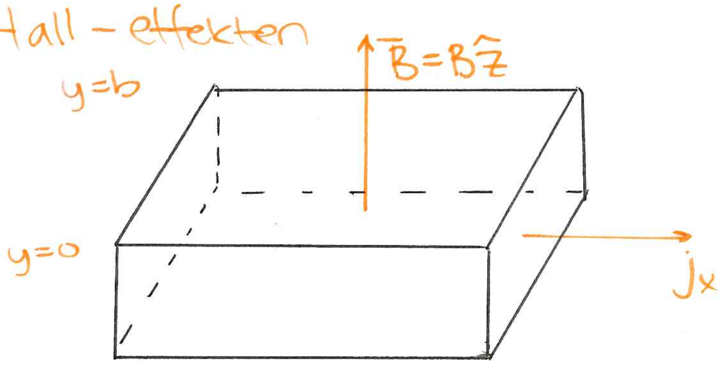
$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_e = \dfrac{e\tau_e}{m_e^*} \\ \mu_h = \dfrac{e\tau_h}{m_h^*} \end{array} \right.$$

→ Beskriver kvalitéten på halvledaren!

Kond: $\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h$

↳ Två typer av laddn.bärare, hur vet man vilken som leder ström?

Hall-effekten



spänning i x-led → ström $j_x > 0$

B-fält $\to$ kraft

$$q\vec{v}\times\vec{B} = \left\{\left[\vec{v} = v_q\hat{x}\right]\right\} = -qv_qB\hat{y} \qquad q = \begin{cases} e & \text{hål} \\ -e & \text{elektr.} \end{cases}$$

$$v_q = \begin{cases} q>0: & \dfrac{e\tau_h}{m_h^*}E > 0 \\ q<0: & \dfrac{-e\tau_e}{m_e^*}E < 0 \end{cases}$$

{kraften blir i $-\hat{y}$-riktning oberoende av om vi har hål eller elektroner}

Laddningsuppbyggnad vid $y=0$

$\to$ elektriskt fält E_y, spänning $V_y = BE_y$

Vi tar inte ut någon ström j_y $\to$ vi får jämvikt där nettokraften i $\hat{y}$-led $\equiv 0$

$$qE_y - qv_qB = 0 \to E_y = v_qB = \left(\frac{j_x}{n_q q}\right)B$$

Hall-koefficienten: $R_H = \dfrac{E_y}{j_xB} = \dfrac{1}{n_q q}$ $\left(n_q = \begin{cases} n & q<0 \\ p & q>0 \end{cases} \right)$

Tecken på R_H: $\begin{cases} >0 & \text{om hål} \quad \text{p-typ halvledare} \\ <0 & \text{om elektroner} \quad \text{n-typ halvledare} \end{cases}$

Magnitud: $\sim \dfrac{1}{n}$ eller $\dfrac{1}{p}$

{ om vi har både n och p, då fås

$$R_H = \frac{1}{e}\,\frac{p - n\left(\frac{\mu_e}{\mu_H}\right)^2}{\left(p + n\left(\frac{\mu_e}{\mu_H}\right)\right)^2}$$ }

Laddningstäthet, n och p

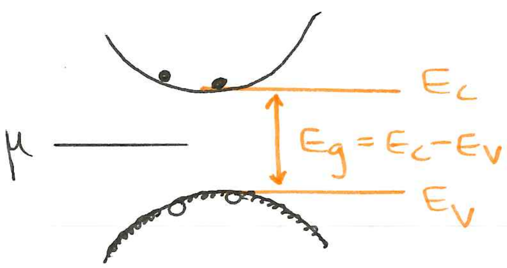
Två typer: $\begin{cases} \text{Intrinsisk halvledare – lika många elektr. som hål!} \\ \text{Dopad halvledare – stoppat in atomer med fler/färre valenselektr.} \end{cases}$

$n = p$

Ex. Dopad halvledare

As (5 valens) i Ge (4 valens) - kristall!

Beräkna laddningstäthet



gapet är stort!

$E_g \gg k_B T$

typiska $E_g \simeq 0.1 - 1 eV$

$\frac{E_g}{k_B} \simeq 1000 - 10000 K$

- Vi antar att μ ligger ungefär i mitten av gapet

$$\begin{cases} E_c - \mu \gg k_B T \\ \mu - E_v \gg k_B T \end{cases}$$

Antal elektroner, täthet:

$$n_{\vec{k}} = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_c + \frac{\hbar^2}{2m_e^*}\vec{k}^2 - \mu}{k_B T}\right) - 1}$$

Fermi-Dirac fördelning med $E = E_c + \frac{\hbar^2}{2m_e^*}\vec{k}^2$

För $E_c - \mu >> k_B T$ får vi

$$\exp\left(\frac{E_c + \frac{\hbar^2}{2m_e^*}\vec{k} - \mu}{k_B T}\right) >> 1$$ glöm 1:an i $\frac{1}{(\dots)+1}$

$$n_{\vec{k}} = \underbrace{\exp\left(\frac{-(E_c + \varepsilon_k - \mu}{k_B T}\right)}_{\text{vanlig Boltzmann}} \qquad \left\{ \varepsilon_k = \frac{\hbar^2}{2m_e^*}\vec{k}^2 \right\}$$

$$\underbrace{n}_{\substack{\text{total}\\ \text{täthet}}} = \frac{1}{V}\sum_{\vec{k}} \underbrace{n_{\vec{k}}}_{\substack{\text{antal } \cancel{\text{täthet}} \text{ med}\\ \text{vågtal } k}} = \left\{ \varepsilon_{\vec{k}} \text{ bara beror på } |k| \right\} =$$

$$= \int \underbrace{D(\varepsilon)}_{\frac{3}{2}\frac{N}{\varepsilon_F^{3/2}}\sqrt{\varepsilon}} \underbrace{n(\varepsilon)}_{\exp(-\beta(E_c+\varepsilon-\mu))} = \exp(-\beta(E_c - \mu)) \int d\varepsilon \frac{3}{2}\frac{N}{\varepsilon_F^{3/2}}\sqrt{\varepsilon}\exp(-\beta\varepsilon) =$$

$\beta = (k_B T)^{-1}$

$$= \{x = \beta\varepsilon\} = \exp(-\beta(E_c - \mu)) \cdot \frac{3}{2}\frac{N}{\varepsilon_F^{3/2}}(k_B T)^{\frac{3}{2}} \underbrace{\int_0^\infty dx\sqrt{x}\exp(-x)}_{I = \frac{\sqrt{\pi}}{2}}$$

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m_e^*}\left(3\pi^2\frac{N}{V}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$n = \underbrace{2\left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}}}_{\sim 10^{20}\ /cm^3 \text{ vid rumstemp.}} \underbrace{\exp\left(\frac{-(E_c - \mu)}{k_B T}\right)}_{<<1} \approx 10^{10} \sim 10^{15}\ /cm^3$$

att jämföra med metall $n \cong 10^{23}\ /cm^3$

För hål: $p_{\vec{k}} = 1$ sannolikhet för elektron

$$\to \quad p = 2\left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} \underbrace{\exp\left(\frac{E_v - \mu}{k_B T}\right)}_{\ll 1}$$

Intrinsisk halvledare:

$$n = p$$

$$2\left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right) \exp\left(\frac{-(E_c - \mu)}{k_B T}\right) = 2\left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right) \exp\left(\frac{E_v - \mu}{k_B T}\right)$$

$$\exp\left(\frac{2m}{k_B T}\right) = \left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{E_v + E_c}{k_B T}\right)$$

$$\mu = \frac{E_v + E_c}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)$$

$E_v + \frac{1}{2} E_g$ typiskt liten $\sim k_B T$

mitt i gapet

{ Ju plattare band / mindre krökning $\to$ större m^*

$\to$ skift av kemiska potentialen! }