

1. Piinäytteessä on $8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ arseeniatomia ja $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ booriatomia. Laske elektroni- ja aukkokonsentraatiot termisessä tasapainossa. Laske myös Fermi-tason paikka E_F suhteessa intrinsiikkiseen Fermi-tasoon E_{Fi} ja suhteessa johtavuusvyön minimiin E_c . Si ($T = 300 \text{ K}$): $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ja $N_c = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

Oletetaan, että kaikki seostusatomit ovat ionisoituneet.

Arseeni on donori: $8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ elektronia

Boori on akseptori: $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ aukkoa

\Rightarrow Nettovaraus on elektroneja $n = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} - 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

$$pn = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}{6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}} = 3750 \text{ cm}^{-3}, \quad \frac{n}{n_i} = \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right)$$

$$E_F = E_{Fi} + kT \cdot \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) = E_i + 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot \frac{\text{eV/J}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 300 \text{ K} \cdot \ln\left(\frac{6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}}{1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}}\right)$$

$$= E_i + 0,39 \text{ eV}$$

$$E_F = E_c - kT \cdot \ln\left(\frac{N_c}{n}\right) = E_c - 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot \frac{\text{eV/J}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 300 \text{ K} \cdot \ln\left(\frac{2,8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}}{6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}}\right)$$

$$= E_c - 0,16 \text{ eV}$$

2. Kromi synnyttää GaAs:ssa syvän tilan lähelle energia-aukon puoliväliä kohtaan $E_c - E_{Cr} = 0,70 \text{ eV}$. Tällöin Fermi-taso takertuu siihen, jos kromin pitoisuus on paljon suurempi kuin muut seostustiheydet. Laske kromilla kompensoidun (puolieristävän) GaAs:n elektroni- ja aukkotihetydet, kun $T = 300 \text{ K}$.

$$E_F \approx E_{Cr} \Rightarrow$$

$$n = N_c e^{\frac{E_{Cr} - E_c}{kT}} = 4,45 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot e^{\frac{-0,70 \text{ eV}}{0,026 \text{ eV}}} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$p = N_v e^{\frac{E_v - E_{Cr}}{kT}} = 7,72 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3} \cdot e^{\frac{-(1,43 - 0,70) \text{ eV}}{0,026 \text{ eV}}} \approx 5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

Kompensoitu GaAs on siis lähes itseispuolijohde: $\sqrt{np} \approx 10^6 \text{ cm}^{-3} \approx n_i$.

3. Elektronien liikkuvuus InGaAs-kerroksessa on $10\,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, kun $T = 300 \text{ K}$. a) Laske elektronien ajautumisnopeus (drift velocity) sähkökentässä, jonka voimakkuus on 10 kV/cm . Tämä on tyypillinen kenttä puolijohdeissa. b) Oletetaan, että elektronien ja aukkojen törmäysten relaksaatioajat ovat yhtä suuret. Laske aukkojen liikkuvuus, kun $m_e^* = 0,050 m_0$ ja $m_h^* = 0,40 m_0$.

$$\mu_e = 10000 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad T = 300 \text{ K} \quad m_e^* = 0,050 m_0 \quad m_h^* = 0,40 m_0$$

a) $E = 10 \text{ kV} / \text{cm}$

$$v_d = \mu_e E = 10000 \cdot 10000 \text{ cm/s} = 1,0 \times 10^6 \text{ m/s}$$

b) $\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*}$ ja $\mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h^*}$, oletetaan: $\tau_e = \tau_h$

$$\Rightarrow \mu_h = \frac{e}{m_h^*} \frac{m_e^*}{e} \mu_e = \frac{m_e^*}{m_h^*} \mu_e = \frac{0,050}{0,40} \cdot 10000 \text{ cm}^2/\text{Vs} = 1250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

4. Heikosti *n*-tyyppisessä ($n = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) GaAs-kerroksessa elektronien ($m_e^* = 0,067 m_0$) liikkuvuus on $200\,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ kun $T = 77 \text{ K}$. a) Laske termisesti liikkuvan elektronin ($E = \frac{3}{2} k_B T$) keskimääräinen törmäysten välinen matka l_e ja aika (relaksaatioaika) τ_e ? b)

Laske näytteen johtavuus 77 K :ssa, kun aukot voidaan jättää huomiotta.

a) $n = 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \quad \mu_u = 200000 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad m_e^* = 0,067 m_0 \quad T = 77 \text{ K}$

$$\frac{1}{2} m^* v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT \Rightarrow v_{th} = \sqrt{\frac{3kT}{m^*}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 77}{0,067 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}} \text{ m/s} = 2,3 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*} \Rightarrow \tau_e = \frac{m_e^* \mu_e}{e} = \frac{0,067 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 200000 \text{ cm}^2/\text{Vs}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} = 7,6 \text{ ps}$$

$$l_{mfp,e} = \tau_e v_{th} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1,7 \text{ } \mu\text{m}$$

b) $\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) \approx en\mu_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \cdot 200000 \text{ cm}^2/\text{Vs} = 0,32 \frac{1}{\Omega\text{cm}}$.