

תרגיל 1

(1) נפתור בעזרת המשוואה:

$$E_i = (E_c + E_v) / 2 + \left(\frac{kT}{2} \right) \ln (N_v / N_c)$$

$$= (E_c + E_v) / 2 + (3kT / 4) \ln \left[(m_p / m_n) (6)^{2/3} \right]$$

בטמפ' 77 K

$$E_i = (1.16/2) + (3 \times 1.38 \times 10^{-23} T) / (4 \times 1.6 \times 10^{-19}) \ln(1.0/0.62)$$

$$= 0.58 + 3.29 \times 10^{-5} T = 0.58 + 2.54 \times 10^{-3} = 0.583 \text{ eV.}$$

בטמפ' של 300 K

$$E_i = (1.12/2) + (3.29 \times 10^{-5})(300) = 0.56 + 0.009 = 0.569 \text{ eV.}$$

ובטמפ' של 373 K

$$E_i = (1.09/2) + (3.29 \times 10^{-5})(373) = 0.545 + 0.012 = 0.557 \text{ eV.}$$

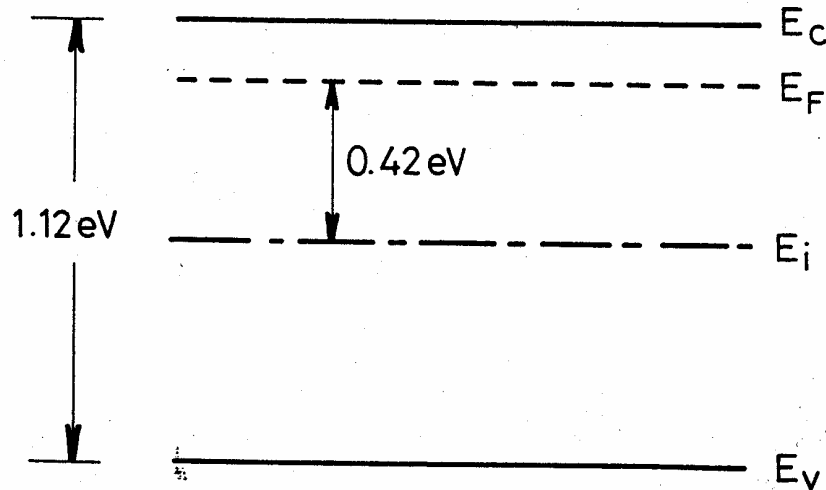
מכיוון שהתוספת כתלות בטמפ' היא זניחה יחסית לאמצע רוחב הפס האסור מכאן שזו הנחה סבירה.

(2) מכיוון ש- $N_D \gg n_i$ נוכל להניח בקרוב כי $n_0 = N_D$ ולכן:
 $p_0 = n_i^2 / n_0 = 9.3 \times 10^{19} / 10^{17} = 9.3 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$

מהקשר $n_0 = n_i \exp \left(\frac{E_F - E_i}{kT} \right)$ נקבל כי

$$E_F - E_i = kT \ln (n_0 / n_i) = 0.0259 \ln (10^{17} / 9.65 \times 10^9) = 0.42 \text{ eV}$$

אפשר לראות זאת בשרטוט המצורף



(3) מה ההתנגדות הסגולית של סיליקון וגליום-ארסניד אינטרינזים בטמפרטורת החדר?

נתונים:

$$\text{Si, } \mu_n = 1450, \mu_p = 505, \text{ and } n = p = n_i = 9.65 \times 10^9$$

$$\text{GaAs, } \mu_n = 9200, \mu_p = 320, \text{ and } n = p = n_i = 2.25 \times 10^6$$

$$(4) \quad \text{מכיוון ש-} \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2}$$

$$\text{ומכאן נקבל } \mu = 100 \text{ cm}^2/\text{V-s} \quad \frac{1}{\mu} = \frac{1}{250} + \frac{1}{167} \therefore$$

$$(5) \quad \text{בניח כי } N_D - N_A \gg n_i \text{ ומכאן נקבל כי המוליכות הסגולית}$$

$$\sigma \approx qn\mu_n = q\mu_n(N_D - N_A)$$

$$16 = (1.6 \times 10^{-19})\mu_n(N_D - 10^{17}) \quad \text{ונקבל}$$

מכיון שהמוביליות היא תלויה בריכוז הזיהום המיין או צריכים להשתמש בגרף שמקשר בין היחסים (לדוגמא בספר של sze בעמ' 51)

$$\text{וכך מקבלים שעבור } N_D \approx 3.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad \text{מקבלים } \mu_n \approx 400 \text{ cm}^2/\text{V-s}$$

$$\text{שמתאים לתוצאה } \sigma \approx 16 \text{ } (\Omega\text{-cm})^{-1}.$$

(6) עבור מל"מ אינטרינזי שהמרחק הממוצע שאלקטרון עובר הוא 20 ננומטר וחור 13 ננומטר עד לפיזור. כאשר ריכוז החורים והאלקטרוניים הוא 10^{10} ומסת האלקטרון האפקטיבית היא רבע ממסת אלקטרון חפשי ומסת חור היא חצי. מה ההתנגדות הסגולית? ומה תורם יותר החורים או האלקטרוניים להתנגדות הסגולית?
נשתמש בקשר של המוביליות:

$$\mu = \frac{q\tau_c}{m} = \frac{q}{m} \frac{l}{v_{th}} = \frac{ql}{m} \sqrt{\frac{m}{kT}} = \frac{ql}{\sqrt{kTm}}$$

ומכאן שההתנגדות הסגולית היא:

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} = \frac{\sqrt{kT}}{q^2} \frac{1}{nl_n / \sqrt{m_n} + pl_p / \sqrt{m_p}}$$

תורמים יותר האלקטרוניים כי גם אורך הפיזור הוא ארוך יותר וגם המסה האפקטיבית קטנה יותר ולכן המוביליות שלהם תהיה גדולה יותר.

(7) א. משוואת צפיפות זרם האלקטרוניים היא $J_n = q\mu_n n(x)E + qD_n \frac{dn(x)}{dx}$ ומכיוון

$$\text{שאינן זרם בדגם } J_n = 0 \text{ ולכן נקבל } q\mu_n n(x)E = -qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$\text{ומכאן } E(x) = -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{dn/dx}{n} = -\frac{kT}{q} \frac{N_0(-a)e^{-ax}}{N_0 e^{-ax}} = +\frac{kT}{q} a$$

$$E(x) = 0.0259 (10^4) = 259 \text{ V/cm ב.}$$

8) עבור האלקטרונים יש זרם סחיפה וגם זרם דיפוזיה ועבור החורים ישנו רק זרם סחיפה.

$$J_{p, \text{drift}} = qp\mu_p E = q10^{10}1500E \text{ זרם החורים הוא:}$$

$$n(x) = \frac{10^{14} - 10^{12}}{0.1} x + 10^{12} \text{ הפונקציה של ריכוז האלקטרונים תהיה:}$$

$$J_{n, \text{drift}} = qn(x)\mu_n E \text{ מכאן נקבל זרם סחיפה:}$$

$$J_{n, \text{diff}} = qD_p \frac{dn}{dx} \text{ זרם דיפוזיה:}$$

$$J_{\text{total}} = J_{p, \text{drift}} + J_{n, \text{drift}} - J_{n, \text{diff}} \text{ וסך הזרם הוא:}$$

9) חשב את ריכוז החורים והאלקטרונים תחת הארה קבועה של סיליקון מסוג n-type, כאשר $\tau_n = \tau_p = 10 \mu\text{s}$, $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $G_L = 10^{16} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$. בזמן t_0 מפסיקים את ההארה איך ריכוז החורים והאלקטרוני משתנה בזמן?

במצב יציב נקבל:

$$\Delta n = \Delta p = \tau_p G_L = 10 \times 10^{-6} \times 10^{16} = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

$$n = n_{n0} + \Delta n = N_D + \Delta n = 10^{15} + 10^{11} \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_D} + \Delta p = \frac{(9.65 \times 10^9)^2}{10^{15}} + 10^{11} \approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}.$$

כשמפסיקים את ההארה ההתנהגות הולכת לפי:

$$n(t) = n_{n0} + \Delta n(t) = n_{n0} + \Delta n(t_0) \exp(-t/\tau_n) = 10^{15} + 10^{11} \exp(-t/10^{-6}) \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}.$$

$$p(t) = p_{n0} + \Delta p(t) = p_{n0} + \Delta p(t_0) \exp(-t/\tau_p) = \frac{(9.65 \times 10^9)^2}{10^{15}} + 10^{11} \exp(-t/10^{-6}) \text{ cm}^{-3}.$$