Física dos Semi Condutores

TP7 - Energia de Fermi e Densidade de Estados

1.

$$E = 0{,}1\ eV = \frac{h^2 k^2}{(2\pi)^2\, 2m^*} = 0{,}1\ eV\ ;\ m^* = 0{,}1\, m_0$$

$$DOS = \frac{m^{*3/2}\ \sqrt{2}\ E^{1/2}}{\pi^2\ \hbar^3} = \frac{(0{,}1\times 9{,}1\times10^{-31})^{3/2}\times\sqrt{2}\times(0{,}1\times1{,}602\times10^{-19})^{1/2}}{\pi^2\times(1{,}05\times10^{-34})^3}$$

$$= 3{,}50\times10^{44}\ J^{-1}\, m^{-3}$$

2.

RT → T = 300K

$$n_i^2 = B\, T^3\, e^{-E_g/k_T}$$

$$= 5{,}4\times10^{31}\times 300^3\times e^{-\frac{1{,}12}{8{,}62\times10^{-5}\times300}}$$

$$n_i = 1{,}5\times10^{10}\ cm^{-3}$$

3. ≡ 1. (TP7.1)

GaAs

$m_e^* = 0{,}067\, m_0$

$m_{hh}^* = 0{,}45\, m_0$

$m_{lh}^* = 0{,}08\, m_0$

Si

$m_l^* = 0{,}98\, m_0$

$m_t^* = 0{,}19\, m_0$

$m_{hh}^* = 0{,}5\, m_0$

$m_{lh}^* = 0{,}15\, m_0$

$$N_C = 2\left(\frac{m_e^*\, kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$$

$$N_V = 2\left(\frac{m_h^*\, kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$$

Banda de condução

GaAs

$$N_C = 2\left(\frac{0{,}067\times9{,}1\times10^{-31}\times1{,}38\times10^{-23}\times300}{2\pi\times(1{,}05\times10^{-34})^2}\right)^{3/2} = 4{,}4\times10^{23}\ m^{-3}$$

$$= 4{,}4\times10^{17}\ cm^{-3}$$

Si

$$m_{DOS}^* = 6^{2/3}\left(0{,}98\times0{,}19^2\, m_0^3\right)^{1/3} = 1{,}08\, m_0$$

$$N_C = 2\left(\frac{1{,}08\times9{,}1\times10^{-31}\times1{,}38\times10^{-23}\times300}{2\pi(1{,}05\times10^{-34})^2}\right)^{3/2} = 2{,}85\times10^{25}\ m^{-3}$$

$$= 2{,}85\times10^{19}\ cm^{-3}$$

Banda de Valência

GaAs

$m_{DOS}^* = (0,5 \times m_0^{3/2} + 0,15^{3/2} m_0^{3/2})^{2/3} = 0,55 m_0$

$$N_V = 2\left(\frac{0,55 \times 9,1\times10^{-31} \times 300 \times 1,38\times10^{-23}}{2\pi \times (1,05\times10^{-34})^2}\right)^{2/3} = 1,03\times10^{25}\ m^{-3} = 1,03\times10^{19}\ cm^{-3}$$

GaAs

$m_{DOS}^* = (0,45^{3/2} m_0^{3/2} + 0,08^{3/2} m_0^{3/2})^{2/3} = 0,47$

$$N_V = 2\left(\frac{0,47 \times 9,1\times10^{-31} \times 300 \times 1,38\times10^{-23}}{2\pi (1,05\times10^{-34})^2}\right)^{2/3}$$

$$= 8,17\times10^{24}\ m^{-3} = 8,17\times10^{18}\ cm^{-3}$$

TP7.1. Densidade de portadores de carga nos sc

2.

$n = 10^{17}\ cm^{-3}$

$E_F = ?$

$T = 300K$

$m_e^* = 0,067 m_0$

$m_{hh}^* = 0,45 m_0$

$m_{lh}^* = 0,15 m_0$

$n = N_C e^{(E_F - E_C)/k_B T}$

$N_C = 4,4 \times 10^{17}\ cm^{-3}$

$\ln \frac{n}{N_C} = \frac{E_F - E_C}{k_B T} \Leftrightarrow k_B T \ln\left(\frac{n}{N_C}\right) = E_F - E_C$

$$E_F = E_C + k_B T \ln\left(\frac{n}{N_C}\right) = E_C + 300 \times 1,38\times10^{-23} \times \ln\left(\frac{10^{17}}{4,4\times10^{17}}\right)$$

$$= E_C - 6,13\times10^{-21}\ (J) = E_C - 0,038\ (eV)$$

3.

$n = 10^{19}\ cm^{-3}$

$T_1 = 77K$

$T_2 = 300K$

$$N_C = 2\left(\frac{9,1\times10^{-31} \times 77 \times 1,38\times10^{-23}}{2\pi \times (1,05\times10^{-34})^2}\right)^{3/2} = 3,3\times10^{24}\ m^{-3} = 3,3\times10^{18}\ cm^{-3}$$

77K

$$E_F = 0 + k_B T \ln\left(\frac{n}{N_C}\right) = 77 \times 1,38\times10^{-23} \times \ln\left(\frac{10^{19}}{3,3\times10^{18}}\right)$$

$= 0,0207 \Leftrightarrow 7,35\ meV$

300 K

$N_C = 2,54 \times 10^{19} cm^{-3}$ $\Rightarrow$ $E_F = 300 \times 1,38 \times 10^{-23} \ln\left(\frac{10^{19}}{2,54 \times 10^{19}}\right)$

$= -0,024 \ eV$

4. ≡ 4 (TP7)

$E_F = ?$

$$E_F = E_C + k_B T \ln\left(\frac{n}{N_c}\right)$$

SC intrínseco $\Rightarrow n = p = n_i$

$$N_C e^{(E_F - E_C)/k_B T} = N_V e^{(E_V - E_F)/k_B T}$$

$$\frac{N_V}{N_C} = e^{(E_F - E_C - E_V + E_F)/k_B T}$$

$$k_B T \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) = 2E_F - E_C - E_V \Leftrightarrow E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right)$$

$$E_F = \frac{E_g}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)^{3/2}$$

$$= \frac{E_g}{2} + k_B T \frac{3}{2} \times \frac{1}{2} \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)$$

$$= \frac{E_g}{2} + 300 \times 1,38 \times 10^{-23} \times \frac{3}{4} \ln\left(\frac{0,55 \ m_0}{1,08 \ m_0}\right)$$

$$= \frac{E_g}{2} - 0,013 \ (eV)$$

5. ≡ 5 (TP7)

$T_1 = 300K$

$T_2 = 600K$

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

$$= \frac{0,35}{2} + \frac{3 \times 300 \times 1,38 \times 10^{-23}}{4 \times 1,602 \times 10^{-19}} \ln\left(\frac{0,4}{0,027}\right) = 0,227 eV$$

$$n_i = \sqrt{np} = \sqrt{N_C N_V} \ e^{(E_V - E_C)/2kT} = \sqrt{N_C N_V} \ e^{-E_g/2kT}$$

T= 300K

$$\sqrt{N_C N_V} = 2 \ m_e^{*3/4} \ m_{30SV}^{*\ 3/4} \left(\frac{kT}{2\pi \hbar^3}\right)^{3/2} =$$

6.

Densidade de portadores vs T

→ Num semicondutor intrínseco $n = p = n_i$ e a densidade de portadores é proporcional à temperatura

→ Num SC tipo N:

Regime Extrínseco

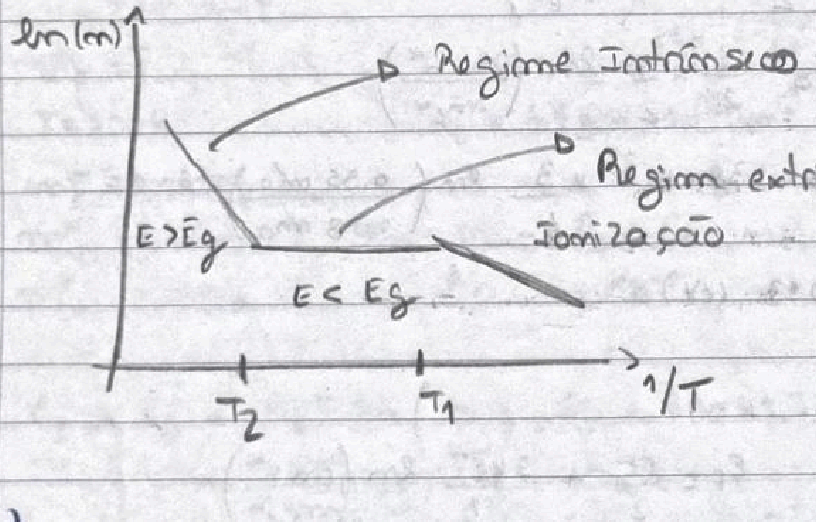
- a baixas T $n = N_D^+$ $(E < E_D)$
- $E \geq E_D \Rightarrow n = N_D$ (todas as impurezas estão ionizadas)

$E \geq E_g$ - a altas temperaturas $n = N_D + n_i \sim n_i$ (pq $N_D \ll n_i$)

Regime intrínseco

→ Num SC tipo P:

- a baixas T : $p = N_A^+$ $(E < E_A)$ $n \sim 0$
- a T int $(E \geq E_A)$ $p = N_A$ (todas as imp estão ionizadas mas a energia ainda não é suficiente para ionizar os e^- da BV)
- a altas T $\Rightarrow p = N_A + n_i \sim n_i$ (todos os e^- estão ionizados $E \geq E_g$)



7.

Num SC do tipo n, o nível de Fermi é dado por:

$$E_F = \frac{E_C + E_D}{2} + k_B T \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right)^{1/2}$$

A baixas temperaturas o nível de Fermi encontra-se entre a Banda de condução e o nível dador, isto porque as impurezas ainda estão a ionizar $(E < E_D)$, e vai aproximando-se da BC com aumentando

Quando se aumenta ligeiramente a T_1 ($E \geq E_D$) todas as impurezas estão ionizadas $n = N_D$, apesar da temperatura subir o nível de Fermi vai começar a descer em direção ao nível de Fermi intrínseco

Quando estamos perante altas temperaturas (T_3) ($E \geq E_g$), todos os e^- estão ionizados na BC e então $n = n_i + N_D \sim n_i$ (Regime Intrínseco) e então $E_F = E_{F_i}$

<u>TP 8</u> - Concentração de portadores e condutividade nos SC

1. Tipo N

a) Dadores

$$\sum_{\substack{\text{Bandas e} \\ \text{Níveis Locais}}} n \Leftrightarrow \sum_{\substack{\text{Bandas e} \\ \text{níveis Locais}}} p$$

Relembrar: Probabilidade de ionizar um dador
$n = N_D^+ = N_D(1 - f(E,T))$

$$n + \overset{0}{\overset{\|}{N_A^+}} = p + N_D^+$$
$$n = p + N_D^+$$

A $T=0 \Rightarrow n = p = 0$

A $\uparrow T \Rightarrow p \approx 0$ e $n = N_D^+$

A $T_1 > T_0 \Rightarrow n = N_D$ $p \sim 0$

A $T_2 > T_1 \Rightarrow p = n_i$ e $n = n_i + N_D \sim n_i$

b)

$$n = \sqrt{N_D N_c}\, e^{(E_D - E_c)/2kT} \qquad \zeta = 1$$

Sabemos que $n = N_c\, e^{(E_F - E_c)/k_B T}$ então:

$$\frac{n}{N_c} = e^{(E_F - E_c)/k_B T} \Leftrightarrow E_F - E_c = k_B T \ln\left(\frac{n}{N_c}\right)$$

Substituindo n pela equação dada:

$$E_F = E_c + \ln\left(\frac{\sqrt{N_D N_c}\, e^{(E_D - E_c)/2kT}}{N_c}\right)$$

$$E_F = E_C + k_BT\left[\frac{E_D - E_C}{2k_BT} + \ln\left(\frac{\sqrt{N_C N_V}}{N_V}\right)\right]$$

$$E_F = E_C + \frac{E_D - E_C}{2} + k_BT \ln\left(\sqrt{\frac{N_C}{N_V}}\right)$$

$$= \frac{E_D + E_C}{2} + \frac{k_BT}{2}\ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right)$$

→ A energia de Fermi é a energia do último estado ocupado a T=0 K. Com o aumento da temperatura a concentração de e^- na BC vai aumentando até ao limite existente, $n_i + N_D$

→ A baixas temperaturas, os e^- das impurezas vão sendo ionizados, pelo que a concentração de e^- na BC é $n = N_D^+$. (1)

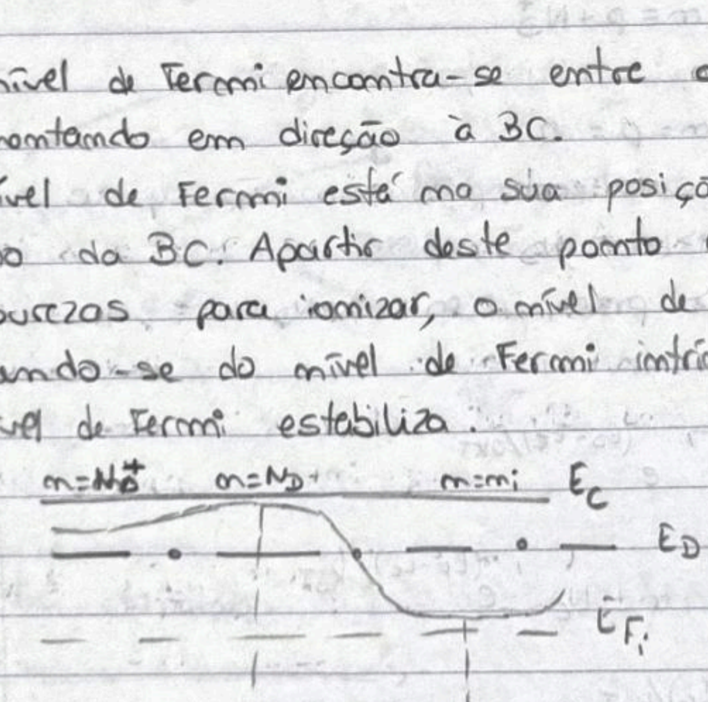
→ A temperaturas intermédias, $E > E_D$, todas as impurezas estão ionizadas, isto é na BC, ou seja, $n = N_D$. Contudo a energia ainda não é suficiente para ionizar os e^- na BV ($E < E_g$). (2)

→ A elevadas temperaturas, $E > E_g$, todos os e^- da BV estão ionizados, isto é, na BC, pelo que $n = N_A + n_i$. Como n_i é muito superior a $N_D \Rightarrow n \sim n_i$. (3)

(1) O nível de Fermi encontra-se entre o nível dador e a BC, e vai aumentando em direção à BC.

(2) O nível de Fermi está na sua posição máxima, relativamente próximo da BC. A partir deste ponto como já não há mais impurezas para ionizar, o nível de Fermi vai diminuir aproximando-se do nível de Fermi intrínseco.

(3) O nível de Fermi estabiliza.



2.

$n_i = 8\,\mu m^{-3} = 8 \times 10^{+18}\ m^{-3}$

$N_D = 12\,\mu m^{-3} = 12 \times 10^{+18}\ m^{-3}$

$n = N_D$ (totalmente ionizados)

Da equação da neutralidade elétrica tem-se:

$$\sum p = \sum n \Rightarrow p + N_D^+ = n + \overset{0}{N_A^-}$$

Bandas e Níveis Locais

$$n = p + N_D^+ = \frac{n_i^2}{n} + N_D^+ \Leftrightarrow n^2 = n_i^2 + n N_D^+$$

$$n_i^2 = p \cdot n \Leftrightarrow p = \frac{n_i^2}{n} \quad \Big| \quad n^2 - nN_D^+ - n_i^2 = 0$$

$n = 16\,\mu m^{-3}$, $p = 4\,\mu m^{-3}$

3.

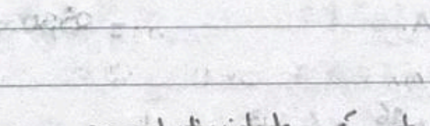
Sabemos que a condutividade é dada por:

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$

Vamos ter 4 fatores a variar com a temperatura: n; p; μ_e; μ_h. Anteriormente já vimos como n e p variam com a temperatura. Resta-nos falar como μ_e e μ_h variam. Eles vão variar ligeiramente com a Temp, se tivermos em conta os mecanismos de difusão relacionados com a interação dos eletrões com fonões acústicos e impurezas ionizadas.

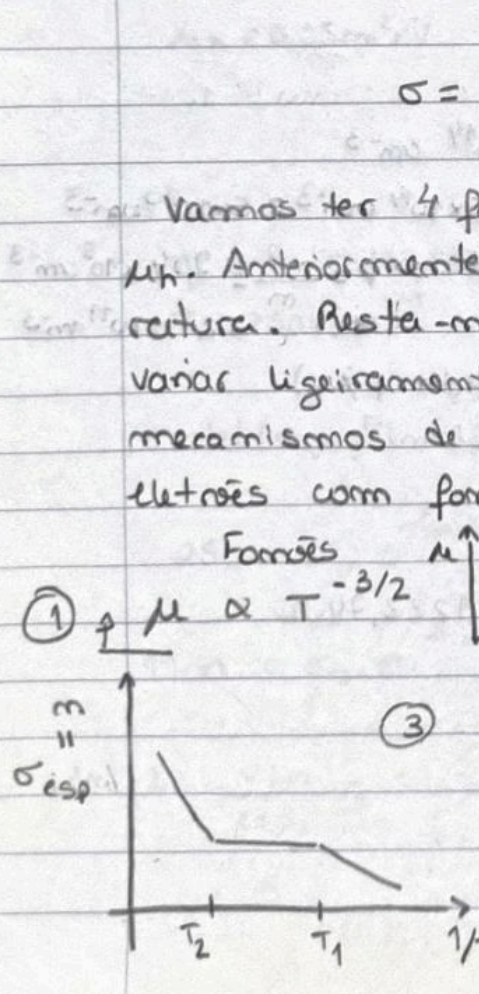
Fonões

① $\mu \propto T^{-3/2}$

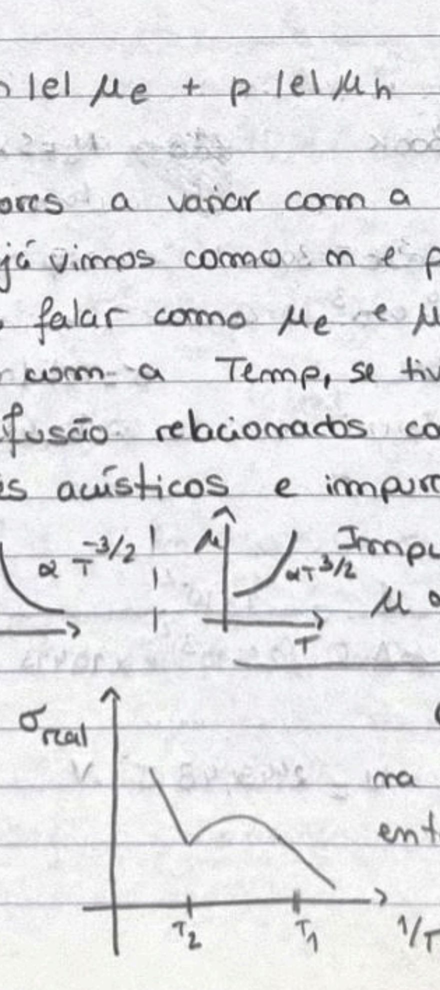


Impurezas: o efeito diminui com a T

$\mu \propto T^{3/2}$



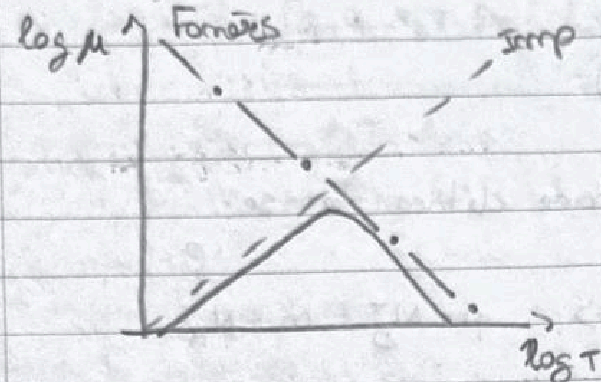
③



O efeito da mobilidade na condutividade vai se notar entre $E_D < E < E_g$, onde o n se manterá constante

(9)

A combinação da difusão através dos fonões (verifica-se altas T) e das impurezas (baixas T) origina:



Como a mobilidade varia menos drasticamente com a T do que n e p, as concentrações, este efeito só é possível se observado quando n se mantém cte, entre $E_D < E < E_g$

10. Tipo N

$$N_D = \frac{1}{10^6} n_{Si} \quad n = N_D$$

densidade = 2,33 g/cm³

$N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ e⁻/mol

$M = 28{,}1$ g/mol

$$n_{Si} = N_A \cdot \frac{\text{densi}}{M_{at}} = 5{,}0 \times 10^{22} \, e/cm^{3}$$

$$n = 10^{-6} \times N_d = 5 \times 10^{16} \, e/cm^3$$

11.

$l = 1cm \quad T = 300K$

$d = 1mm$

$N_d = 5 \times 10^{14}$ at/cm³ + T = 300K

$n_i = 1{,}01 \times 10^{10} \, cm^{-3}$

$\mu_e = 0{,}13 \, m^2/Vs$

$\mu_h = 0{,}05 \, m^2/Vs$

$I = 2A$

$N_d = 5 \times 10^{14} \, cm^{-3}$

↳ $n = 5 \times 10^{14} \, cm^{-3} = 5 \times 10^{20} \, m^{-3}$

$$np = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n} = 2{,}04 \times 10^{5} \, cm^{-3} = 2{,}04 \times 10^{11} \, m^{-3}$$

$$\sigma = |e| (n\mu_e + p\mu_h) = 10{,}413 \, (\Omega m)^{-1}$$

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} = \frac{1 \times 10^{-2}}{(0{,}5 \times 10^{-3})^2 \pi \times 10{,}413} = 1222{,}74 \, \Omega$$

$$R = \frac{U}{I} \Leftrightarrow U = 2445{,}48 \, V$$

4.

$n_i = p_i = n_0 e^{-E_g/2kT}$ $\quad$ $n_0 = 8\times10^{18}\ cm^{-3}$ (Ge)

eletrões $\quad$ $n_0 = 1,7\times10^{19}\ cm^{-3}$ (Si)

$T = 300K$

$E_g = 0,6\ eV$ (Ge)

$E_g = 1,12\ eV$ (Si)

Si

$n_i = 1,7\times10^{19}\ e^{-1,12/(2\times300\times8,617\times10^{-5})}$

$= 6,64\times10^{9}\ cm^{-3}$

Ge

$n_i = 8\times10^{18}\ e^{-0,6/(2\times300\times8,617\times10^{-5})}$

$= 7,30\times10^{13}\ cm^{-3}$

5.

$l = 1cm$

$d = 1mm$

$T = 300K$

$n_i = 1,5\times10^{16}\ m^{-3}$

$\mu_e = 0,13\ m^2/V$

$\mu_h = 0,05\ m^2/V$

$\sigma = |e|\,n_i\,(\mu_e + \mu_h)$

$= 1,602\times10^{-19} \times 1,5\times10^{16}\ (0,13 + 0,05)$

$= 0,43\times10^{-3}\ (\Omega m)^{-1}$

$R = \dfrac{l}{\sigma A} = \dfrac{1\times10^{-2}}{0,43\times10^{-3} \times \pi \times (0,5\times10^{-3})^2}$

$= 30\,M\Omega$

6.

$T_1 = 20°C = 293,15K$ $\quad$ $T_2 = 100°C = 373,15K$ $\quad$ $E_g = ?$

$\sigma = 250\ (\Omega m)^{-1}$ $\quad$ $\sigma = 1100\ (\Omega m)^{-1}$

$\sigma = |e|\,(n\mu_e + n\mu_h) = \sigma_0\ e^{-E_g/2kT}$

$250 = \sigma_0\ e^{-E_g/2kT_1}$ $\quad$ $\ln 250 = \ln \sigma_0 - \dfrac{E_g}{2kT_1}$

$1100 = \sigma_0\ e^{-E_g/2kT_2}$ $\quad$ $\ln 1100 = \ln \sigma - \dfrac{E_g}{2kT_2}$

$\ln \dfrac{250}{1100} = -\underbrace{\dfrac{E_g}{2\times k\times 293}}_{0,05} + \underbrace{\dfrac{E_g}{2\times k\times 373}}_{0,06}$ $\quad$ $\ln\left(\dfrac{250}{1100}\right) = -\dfrac{10}{3}E_g$

$E_g = 0,44\ eV$

7. $T = 100\,°C = 373K$

$n_i \sim 10^{19}\ m^{-3}$

$\mu_e \sim 0{,}1\ \frac{m^2}{Vs}$

$\mu_h \sim 0{,}05 m^2/Vs$

$\sigma = |e|\, n_i\, (\mu_e + \mu_h)$

$= 1{,}602\times10^{-19} \times 10^{+19}\,(0{,}1 + 0{,}05)$

$= 0{,}24\ (\Omega m)^{-1}$

8.

$N_d = 5\times10^{22}\ m^{-3}$

$T = 300\,K \Rightarrow n = N_D$

$4e^-$ valencia

a) O germânio pertence ao grupo 14 Ge $1s^2 2s^2 2p^6 \underline{3s^2 3p^2}$

O Sb pertence ao grupo 13 $5\bar{e}$ de valência

Ao se dopar Sb com Ge estamos a adicionar eletrões, pelo que o SC é do tipo n.

b) $\mu_e = 0{,}1\ m^2/Vs$ Como $n = N_D$ e $p \sim 0$

$\mu_h = 0{,}05 m^2/Vs$

$\Rightarrow \sigma = |e|\, N_d\, \mu_e = 1{,}602\times10^{-19} \times 5\times10^{22} \times 0{,}1$

$= 801\ (\Omega m)^{-1}$

9. As tem $5\ \bar{e}$ de valência $\Rightarrow$ tipo

$N_D = 2\times10^{23}\ m^{-1}$

Regime extrínseco $n = N_D \wedge p \sim 0$

$T = 300\,K$

$\mu_e = 0{,}08\ m^2/Vs$

$\sigma = |e|\,(n\mu_e + p\,\mu_h) \sim |e|\, N_d\, \mu_e$

$= 2563{,}2\ (\Omega m)^{-1}$

10 e 11

II

12. $N_A < N_D$

$$n = \sum_{\substack{\text{bandas}\\ \text{e níveis locais}}} \qquad p = \sum_{\substack{\text{bandas}\\ \text{e}\\ \text{níveis locais}}}$$

ii) $n = N_D^+ < N_D$

iii) $p = N_A$

$$p + N_D^+ = n + N_A$$

↳ totalmente ionizados

$$N_D^+ = N_D(1 - f(E,T))$$

↳ $f(E,T) = \frac{1}{1 + e^{(E_D - E_F)/kT}}$

TP9 - Díodo (Homojunção)

1. $p\text{-}n \Rightarrow W_n > W_p$

$N_D = 10^{16}\ cm^{-3} = n$

$N_A = 10^{18}\ cm^{-3} = p$

a)

No Si $\Rightarrow N_C = 2{,}8 \times 10^{19}\ cm^{-3}$

$N_V = 1 \times 10^{19}\ cm^{-3}$

$\varepsilon = 11{,}9 \times 8{,}84 \times 10^{-12}\ \frac{F}{m}$

$n = N_C\, e^{(E_F - E_C)/k_BT} = N_D$ $\qquad$ $p = N_V\, e^{(E_V - E_F)/k_BT} = N_A$

$E_{F_n} = E_C + kT \ln\left(\frac{n}{N_C}\right)$ $\qquad$ $E_{F_p} = E_V - kT \ln\left(\frac{p}{N_V}\right)$

$E_{F_n} = E_C + 300 \times 8{,}617 \times 10^{-5} \ln\left(\frac{10^{16}}{2{,}8 \times 10^{19}}\right)$ $\qquad$ $E_{F_p} = E_V - 300 \times 8{,}617 \times 10^{-5} \ln\left(\frac{10^{18}}{1 \times 10^{19}}\right)$

$= E_C - 0{,}205$ $\qquad$ $= E_V + 0{,}06$

b)

$V_0 = E_g - (E_C - E_F)_n - (E_F - E_V)_p$ $\qquad$ $n_p \cdot p_p = n_i^2$

$= E_g - (\cancel{E_C} - \cancel{E_C} + 0{,}205) - (\cancel{E_V} - 0{,}06 - \cancel{E_V})$

$= E_g - 0{,}205 + 0{,}06$ $\qquad$ $n_p = \frac{n_i^2}{p_p}$

$= E_g - 0{,}145 = E_C - E_V - 0{,}145$ // Não dá

$= 225\ cm^{-3}$

$V_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{\overset{N_D}{n_n}}{n_p}\right) = 0{,}812\ V$

c)

$$w_n = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{e}\frac{N_a}{N_D(N_A+N_D)}\right]^{1/2} =$$

$$w_p = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{q}\frac{N_D}{N_A(N_A+N_D)}\right]^{1/2} =$$

2.

$d = 20\ \mu m$ $\quad n_i = 1{,}5\times10^{10}\ cm^{-3}$

$N_D = 10^{16}\ cm^{-3}$ $\quad \varepsilon\left(\frac{F}{cm}\right)$

$N_A = 10^{18}\ cm^{-3}$

$T = 300\ K$

a)

i)

N_D

$\uparrow\ p_0?$

$$n_n p_n = n_i^2$$

$$p_n = \frac{1{,}5\times10^{10\,2}}{1\times10^{16}} = 2{,}25\times10^4\ cm^{-3}$$

$$V_0 = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right)$$

$$= \frac{300\times1{,}38\times10^{-23}}{1{,}602\times10^{-19}}\ln\left(\frac{10^{18}}{2{,}25\times10^4}\right)$$

$= 0{,}812\ V$! Tenho mal as unidades!

$$w_n = \left[\frac{2\times11{,}9\times8{,}84\times10^{-12}\times0{,}812\times10^{18}}{1{,}602\times10^{-19}\times10^{16}(10^{18}+10^{16})}\right]^{1/2} = 3{,}25\times10^{-4}\ cm$$

$w_p = 3{,}25\times10^{-6}\ cm$

3.

$N_D = 10^{16}\ cm^{-3}$

$N_A = 10^{18}\ cm^{-3}$

$A = 10^{-3}\ cm^2$, $v_0 - V_{ef}$

$$J = J_0 \left[e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right] \; ; \; J_0 = \left[\frac{D_p}{L_p} \overset{N_D}{\overset{\shortparallel}{p_n}} + \frac{D_n}{L_n N_A} n_p \right] \cdot q \cdot A$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{10^{-6} \times 7{,}8} = 2{,}79 \times 10^{-3}\ cm = 2{,}79 \times 10^{-5}\ m$$

do lado n

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{7{,}3 \times 10^{-6}} = 2{,}70 \times 10^{-3}\ cm =$$
$$= 2{,}70 \times 10^{-5}\ m$$

do lado p

$$n_p \cdot \overset{N_A}{p_p} = n_i^2 \Leftrightarrow n_p = \frac{1{,}5 \times 10^{10^2}}{10^{18}}\ cm^{-3} = 225\ cm^{-3}$$

$$J_0 = \left[\overset{N}{\frac{e D_h}{L_h N_d}} + \overset{P}{\frac{e D_e}{L_e N_a}} \right] n_i^2 \qquad n_i = 1{,}5 \times 10^{10}\ cm^{-3} = 1{,}5 \times 10^{16}\ m^{-3}$$

$$= \left[\frac{1{,}602 \times 10^{-19} \times 7{,}8 \times 10^{-4}}{2{,}79 \times 10^{-5} \times 10^{22}} + \frac{1{,}602 \times 10^{-19} \times 7{,}3 \times 10^{-4}}{2{,}70 \times 10^{-5} \times 10^{24}} \right] \cdot (1{,}5 \times 10^{16})^2$$

$$= 1{,}007 \times 10^{-7}\ \frac{A}{m^2} \qquad \left[\frac{C \cdot m^2}{s \cdot m\ m^{-3}} \right] \cdot m^{-3^2} = \frac{C}{s} \frac{1}{m^2}$$

$$J = J_0 \left[e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right] = 4{,}45 \times 10^6\ \frac{A}{m^2} \qquad \frac{eV}{kT} \to 0{,}812 \to \times 2$$

$I = 0{,}445\ A$

$p_m =$ $\qquad$ $p_n \cdot n_n = n_i^2$

$n_p \, p_p = n_i^2$

4.

$N_D = N_A = 10^{14}\ cm^{-3}$; $\tau_n = \tau_p = 10^{-8}\ s$

Si $\qquad$ GaAs

$J_o = 1{,}38 \times 10^{-11}\ \frac{A}{cm^2}$ $\qquad$ $J_o = 1{,}65 \times 10^{-19}$

$V_o = \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{\overset{N_A}{p_p}}{p_n}\right)$ $\qquad$ $V_o = 0{,}802$

$= \frac{1{,}38 \times 10^{-23} \times 300}{1{,}602 \times 10^{-19}} \ln\left(\frac{10^{14}}{2250}\right)$

$= 0{,}812\ V$

$p_n = \frac{n_i^2}{n_p} = \frac{(1{,}5 \times 10^{10})^2}{10^{14}} = 2250\ cm^{-3}$ $\qquad$ $p_p = \frac{n_i^2}{n_p} = \frac{(1{,}8 \times 10^{6})^2}{10^{14}} = 3240\ cm^{-3}$

$J = J_o\left(e^{\frac{eV}{KT}} - 1\right)$ $\qquad$ $J = 3{,}9 \times 10^{-6}\ \frac{A}{cm^2}$

$= 575{,}24\ \frac{A}{cm^2}$

$I = J \times A$

b) Si $\qquad$ GaAs

$\ln\left[\frac{J}{J_o} + 1\right] = \frac{eV}{KT}$ $\qquad$ $V = 1{,}29$

$V = \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{J}{J_o} + 1\right)$

$V = 0{,}8$

$0{,}812 - V = 1{,}32 \times 10^{-19}$

$V \sim 0{,}8\ V$