

- 1) Calcule a barreira de potencial numa junção com $N_A=10^{17}\text{cm}^{-3}$ e $N_D=10^{16}\text{cm}^{-3}$. Calcule os limites da região de depleção, com $V_a=0$, 500mV e -10V. Qual o valor do campo elétrico no ponto de máximo ($V_a=0$)? Onde se encontra esse ponto?
- 2) Usando a aproximação de diodo curto, calcule a corrente de saturação, usando os valores de $W_{PP}=W_{NN}=5\mu\text{m}$. Estime a tensão de ruptura por "punch-through" na junção descrita acima.
- 3) Calcule nesta junção a corrente com uma tensão de polarização de 500mV. Qual o valor das correntes de elétrons e lacunas, respectivamente?
- 4) Na questão anterior, é possível calcular a resistência elétrica de cada camada e estimar a queda de potencial entre a junção e o ponto de contato. Quais são os valores? Observe que as quedas de potencial se referem somente aos portadores majoritários (lacunas em P e elétrons em N), pois as correntes de minoritários se dão por difusão.
- 5) As junções tipo "diodo curto" e "diodo longo" tem mecanismos próprios de ocorrência da ruptura em polarização inversa. Quais são eles?

Valores:

$$A=1\text{mm}^2 \quad n_i^2=10^{20}\text{cm}^{-6} \quad U_T=25\text{mV} \quad D_n=25\text{cm}^2/\text{s} \quad D_p=12,5\text{cm}^2/\text{s}$$

$$\epsilon_s=12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}\text{F/cm} \quad D/\mu=U_T \quad \rho=1/\sigma \quad U_T=25\text{mV}$$

Fórmulas gerais:

$$\Phi = V_N - V_P = U_T \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}$$

$$E_M = \frac{Q_t}{\epsilon_s} = \frac{q N_A W_P}{\epsilon_s} = \frac{q N_D W_N}{\epsilon_s}$$

$$W_t = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s (\Phi - V_a)}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

$$I_s \approx q n_i^2 A \left[\frac{D_n}{N_A \cdot W_{PP}} + \frac{D_p}{N_D \cdot W_{NN}} \right]$$

$$I(V_a) = I_s \cdot \left[\exp \frac{V_a}{U_T} - 1 \right]$$

$$\sigma (\text{condutividade}) = \frac{J_{DER}}{E} = q (\mu_n \bar{n} + \mu_p \bar{p})$$

$$q n_i^2 A D_H$$

$$W_t^2 \cdot q N_A N_D = \Phi - V_a$$

$$2 \epsilon_s (N_A + N_D)$$

$$N_A \cdot W_{PP}$$

$$W_t^2 = \frac{2 \epsilon_s (N_A + N_D) (\Phi - V_a)}{q N_A N_D}$$

$$q N_A N_D$$

$$W_t^2 q N_A N_D = \Phi - V_a$$

$$2 \epsilon_s$$

$$\mu = \frac{D}{U_T} = \frac{25}{25 \cdot 10^{-3}} = 1000$$

043685

Gabriel Romero

90

A

$$1. N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

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

$$\Phi = U_T \cdot \ln N_A \cdot N_D = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \ln 10^{17} \cdot 10^{16} = 748,3 \cdot 10^{-3} \text{ V} \approx 0,748 \text{ V}$$

$$\Phi = 748 \text{ mV}$$

$$V_A = 0 \text{ V}$$

$$W_T = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s \cdot \Phi (N_A + N_D)}{q N_A N_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,748 (10^{17} + 10^{16})}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{17} \cdot 10^{16}}} = 33 \mu\text{m}$$

$$W_T = W_P + W_N \rightarrow W_P = W_T - W_N$$

$$N_A \cdot W_P = N_D \cdot W_N \rightarrow N_A W_T - N_A W_N = N_D W_N \rightarrow W_N = \frac{N_A W_T}{(N_D + N_A)} = \frac{10^{17} \cdot 33 \cdot 10^{-6}}{10^{16} + 10^{17}} = 3 \mu\text{m}$$

$$W_N = 3 \mu\text{m}$$

$$W_P = 30 \mu\text{m}$$

$$V_A = 500 \text{ mV}$$

$$W_{T,0.5} = W_T \sqrt{\frac{\Phi - V_A}{\Phi}} = 33 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{0,748 - 0,5}{0,748}} = 19 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 19 \mu\text{m}$$

$$W_P = W_T - W_N \rightarrow W_P = 1,72 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$W_N = \frac{N_A \cdot W_T}{(N_D + N_A)} = \frac{10^{17} \cdot 19 \cdot 10^{-6}}{1,1 \cdot 10^{17}} = 17,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$W_P = 1,72 \mu\text{m}$$

$$W_N = 17,27 \mu\text{m}$$

$$V_A = -10 \text{ V}$$

$$W_T = W_{T0} \sqrt{\frac{\Phi - V_A}{\Phi}} = 33 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{0,748 + 10}{0,748}} = 125 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 125 \mu\text{m}$$

$$W_P: W_T - W_N = 11,4 \mu m$$

$$W_N = \frac{N_A \cdot W_T}{N_A + N_D} = \frac{125}{1,1} = 113,6 \mu m$$

$$N_A + N_D = 1,1$$

$$W_N = 113,6 \mu m$$

$$W_P = 11,4 \mu m$$

O ponto de máxima do campo elétrico se encontra no encontro dos materiais P e N ($x=0$) e vale:

$$E_m = \frac{2\Phi}{W_P} = \frac{2,248 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}} = 45,33 \cdot 10^3 V = 45,33 kV$$

$$2. W_{PP} = W_{NN} = 5 \mu m = 5 \cdot 10^{-4} cm$$

Para o diodo curto, pode-se aproximar as diferenças ($W_{PP} - W_P$) a ($W_{NN} - W_N$), para W_{PP} e W_{NN} respectivamente.

$$I_s = q n_i^2 A \left(\frac{D_n}{N_A W_{PP}} + \frac{D_p}{N_D W_{NN}} \right) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} \cdot 10^{-2} \left(\frac{25}{10^{17} \cdot 5 \cdot 10^{-4}} + \frac{125}{10^{16} \cdot 5 \cdot 10^{-4}} \right)$$

$$= 0,48 \cdot 10^{-12} A \rightarrow I_s = 0,48 pA$$

A tensão de punch-through pode ser estimada por:

$$V_{PT} = \frac{W_{NN}^2 q N_D (N_A + N_D)}{2 \epsilon_s N_A} - \Phi = \frac{(5 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} (1,1 \cdot 10^{17})}{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 10^{17}} - 0,748 =$$

$$= 0,207 \cdot 10^3 - 0,748 = 206,2 V$$

$$V_{PT} = 206,2 V$$

Polarização reversa

$$3. I = I_s \left(\exp \frac{V_A}{V_T} - 1 \right)$$

$$I_s = 0,48 pA \quad (\text{Exercício anterior})$$

$$I(0,5) = 0,48 \cdot 10^{-12} \left(\exp\left(\frac{0,500}{0,025}\right) - 1 \right) = 0,23 \text{ mA} //$$

$$I(0,5 \text{ V}) = 0,23 \text{ mA} //$$

Correntes de elétrons e lacunas:

$$I_n = \frac{q n_i^2 A \cdot D_p}{N_b W_{NN}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} \cdot 10^{-2} \cdot 25 \left(\exp\left(\frac{0,5}{0,025}\right) - 1 \right)}{10^{17} \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 0,038 \text{ mA} //$$

$$I_p = \frac{q n_i^2 A \cdot D_p}{N_A W_{pp}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} \cdot 10^{-2} \cdot 12,5 \left(\exp\left(\frac{0,5}{0,025}\right) - 1 \right)}{10^{18} \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 0,194 \text{ mA} //$$

$$4. \rho_N = \frac{1}{q \mu_n n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^3 \cdot 10^{16}} = 0,625 \text{ } \Omega / \text{cm} //$$

$$R_N = \frac{0,625 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{10^{-2}} = 31,25 \text{ m}\Omega //$$

$$V_N = 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 31,25 \cdot 10^{-3} = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ V} //$$

$$\rho_p = \frac{1}{q \mu_p p} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,5 \cdot 10^{17}} = 0,125 \text{ } \Omega / \text{cm} //$$

$$R_p = \frac{0,125 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{10^{-2}} = 6,25 \text{ m}\Omega //$$

$$V_p = 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 6,25 \cdot 10^{-3} = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ V} //$$

não é!

5. O mecanismo de ruptura que ocorre no diodo curto é a ruptura por 'punch-through'. Os que ocorrem em um diodo longo são a ruptura por avalanche e por efeito Zener.

A ruptura por avalanche ocorre quando há uma multiplicação muito grande dos portadores. Já o punch-through ocorre quando a região de depleção atinge o tamanho da junção. O efeito Zener é relacionado aos níveis de energia dos portadores. r.r.