Semicondutores

Junção PN - Exemplos

Prof. César Augusto Dartora - UFPR

E-mail: dartora@ufpr.br

Coleção de fórmulas úteis

$$n_i(T) = N_c(T)e^{-\beta(E_c - E_F)} = \sqrt{N_c N_v} e^{-\beta E_g/2} \quad (1)$$
$$p_i(T) = N_v(T)e^{-\beta(E_F - E_v)} = n_i(T) \quad (2)$$
$$N_c N_v = n_i^2 e^{\beta E_g} \quad (3)$$

onde $\beta = 1/(k_B T)$.

Dopagem Tipo N: concentração de impurezas doadoras N_D

$$E_{FN} = E_c - k_B T \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right) \quad (4)$$

Dopagem Tipo P: concentração de impurezas aceitadoras N_A

$$E_{FP} = E_v + k_B T \ln\left(\frac{N_v}{N_A}\right) \quad (5)$$

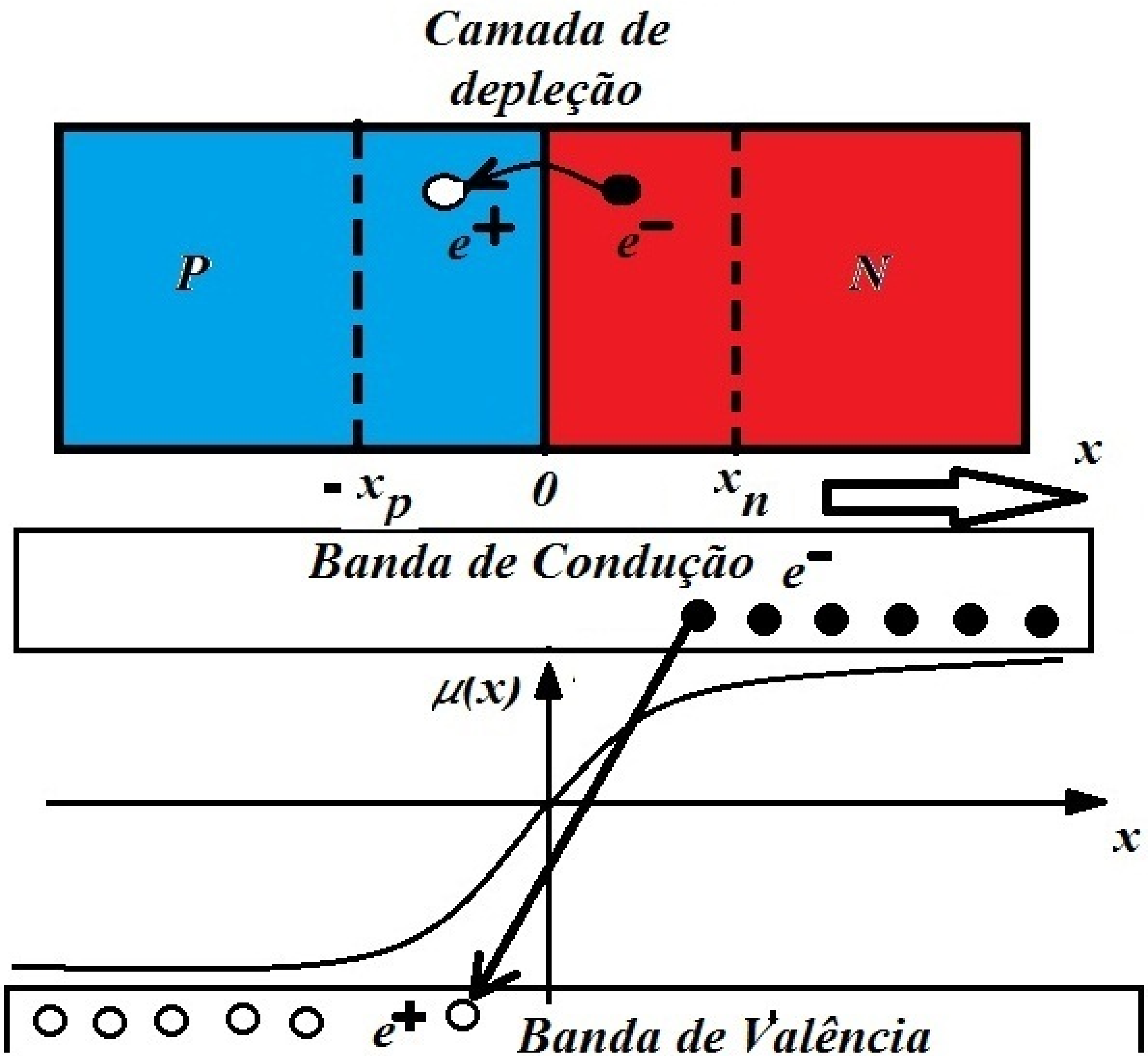
Dados Relevantes dos Principais Semicondutores a 300 K

Grandeza	Ge	Si	GaAs
Átomos ou Moléculas (10^{22}/cm^3)	4,42	5,0	2,21
Parâmetro de rede a	5,658	5,431	5,654
Permissividade dielétrica rel. $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$	16,0	11,8	10,9
Bandgap E_g (eV)	0,68	1,12	1,43
Concentração intrínseca n_i (cm^{-3})	$2,5 \times 10^{13}$	$9,7 \times 10^{9}$	10^7
Concentração efetiva N_c (cm^{-3})	$1,04 \times 10^{19}$	$2,8 \times 10^{19}$	$4,7 \times 10^{17}$
Concentração efetiva N_v (cm^{-3})	$6,1 \times 10^{18}$	$1,02 \times 10^{19}$	$7,0 \times 10^{18}$
Mobilidade μ_n (cm^2/V.s)	3900	1350	8600
Mobilidade μ_p (cm^2/V.s)	1900	480	400
Coeficiente de difusão D_n (cm^2/s)	100	35	220
Coeficiente de difusão D_p (cm^2/s)	50	12,5	10

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T(300K) = \frac{k_B T}{e} \approx 26 \text{ mV a } 300\text{K} \tag{6}$$

Tempos de relaxação típicos entre 10^{-6} s e 10^{-7} s, $L_{dif} \sim 10 - 100$ μm

Parâmetros da Junção PN



- Potencial de junção (ou built-in potential)

$$|\Delta\phi_0| = V_0 = E_g - k_B T \ln\left(\frac{N_c N_v}{N_D N_A}\right) = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \tag{7}$$

- Comprimento da camada de depleção

$$L = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}} \tag{8}$$

- Magnitude do campo elétrico interno E_0 (valor máximo)

$$E_0 = \frac{2V_0}{L} = \frac{e N_A x_p}{\varepsilon} = \frac{e N_D x_n}{\varepsilon} \tag{9}$$

- Densidade de corrente ao longo da junção PN:

$$J(V) = J_s(e^{V/V_T} - 1) \ , \tag{10}$$

$$J_s = e n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A}\right) \ . \tag{11}$$

Exercício 1) Considere uma junção PN de Si, que tem as seguintes concentrações de impurezas $N_D = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3} e $N_A = 5 \times 10^{17}$ cm^{-3}, nos lados N e P, respectivamente. A seção transversal circular tem diâmetro de 200μm.

a) Calcule as posições do nível de Fermi de cada lado da junção a $T = 300$ K, em relação às bandas de valência e de condução.

b) Desenhe o diagrama de energias da junção em equilíbrio indicando os valores relevantes.

c) Calcule a magnitude do campo elétrico máximo na junção, e a capacitância de junção.

d) Determine a corrente de saturação e o gráfico $I - V$.

Solução do Exercício 1

a) Utilizando os dados para o Si (N_c, N_v etc) e fazendo $E_c = E_g/2 = 0,56$eV e $E_v = -E_g/2$ nas equações:

$$E_{FN} = E_c - k_B T \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right) \quad (4)$$

$$E_{FP} = E_v + k_B T \ln\left(\frac{N_v}{N_A}\right) \quad (5)$$

temos:

$$E_{FN} = 0,56 - 0,026 \ln\left(\frac{2,8 \times 10^{19}}{5 \times 10^{15}}\right) = 0,336\text{eV}$$

$$E_{FP} = -0,56 + 0,026 \ln\left(\frac{1,02 \times 10^{19}}{5 \times 10^{17}}\right) = -0,482\text{eV}$$

Desse modo $V_0 = 0,817$ eV.

b) Vamos determinar L, x_n e x_p:

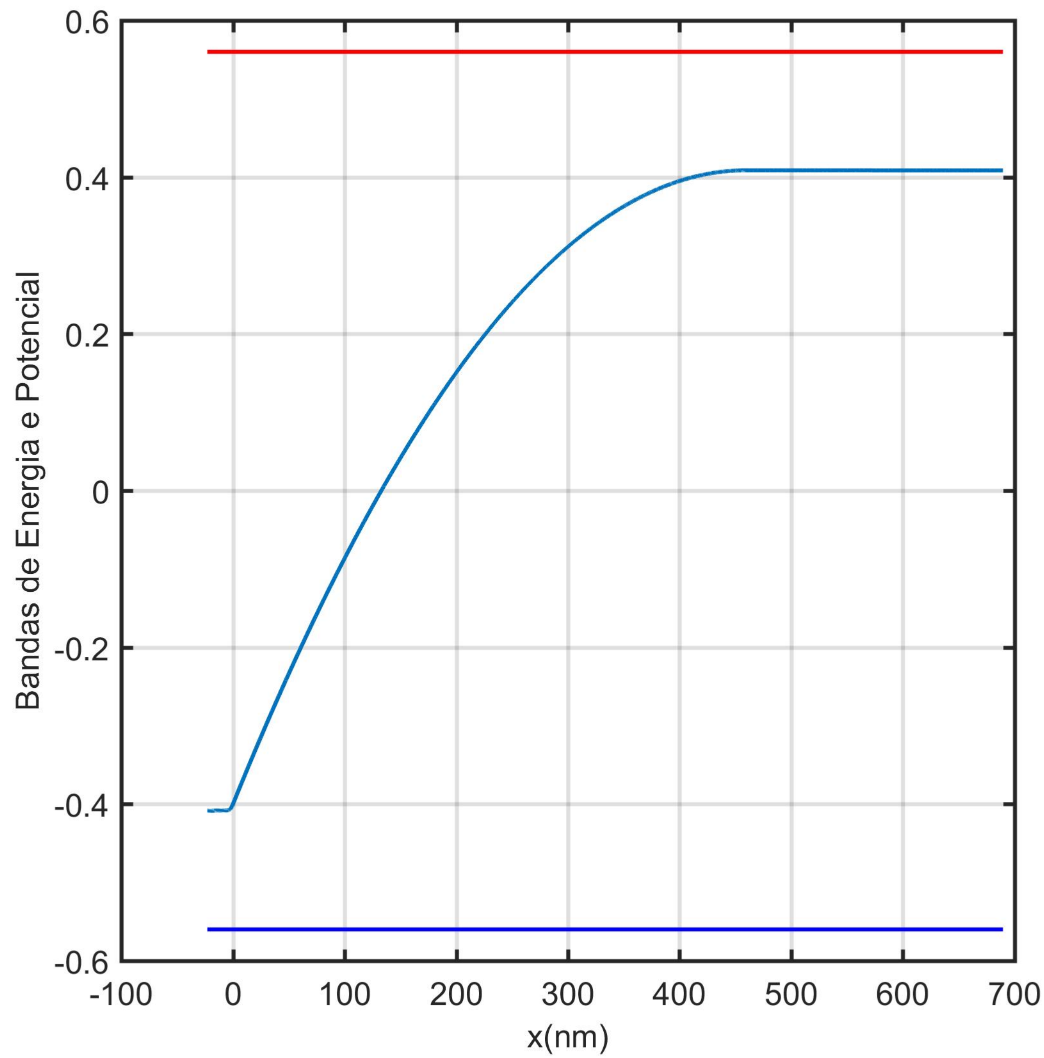
$$L = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{e}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

$$x_p = (1 + N_A/N_D)^{-1}L \ , x_n = L - x_p \ ,$$

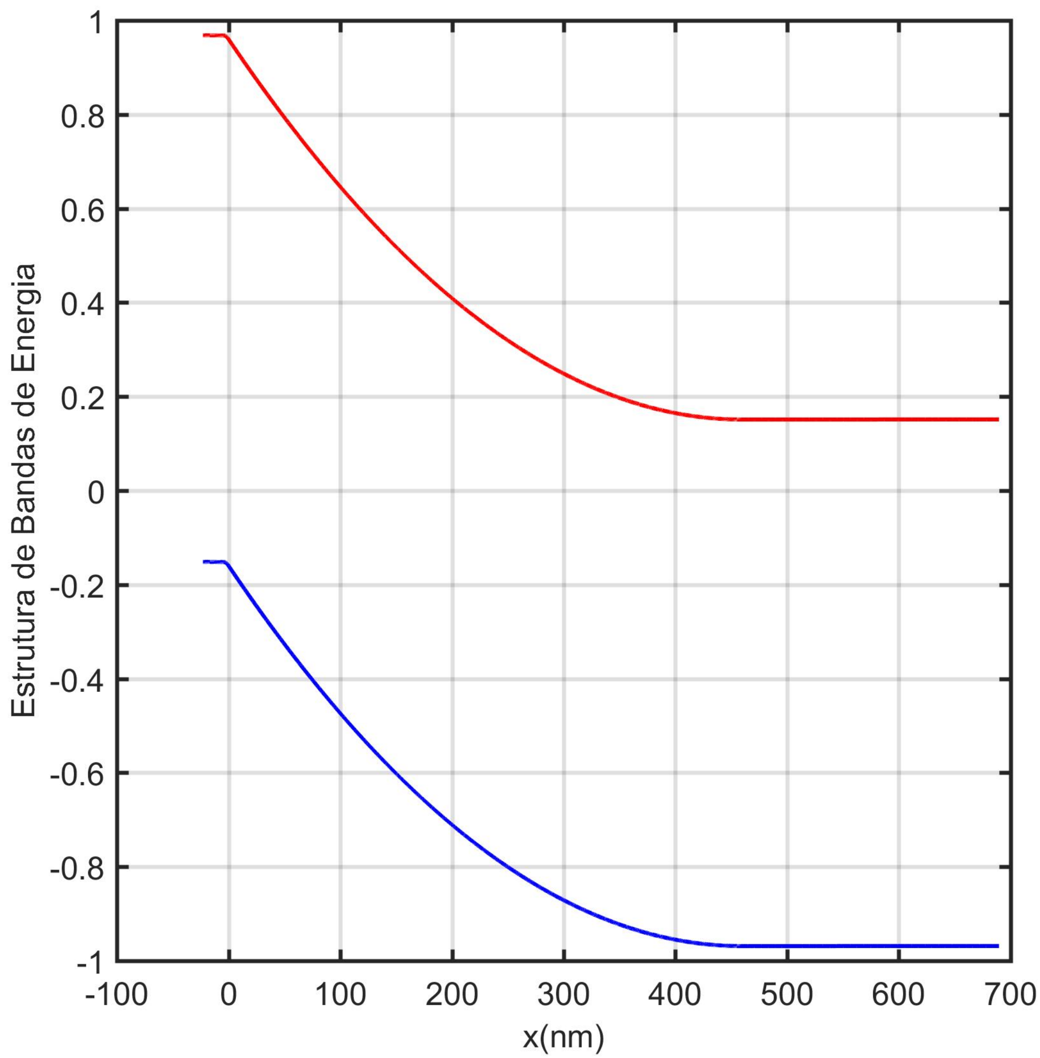
$$L = \sqrt{\frac{2 \times 11,8 \times \varepsilon_0 \times 0,817}{1,6 \times 10^{-19}} \times \frac{5 \times 10^{23} + 5 \times 10^{21}}{5 \times 10^{23} + 5 \times 10^{21}}} = 0,464\mu\mathrm{m}$$

(Lembre de usar unidades do SI - cm$^{-3} = 10^6$ m^{-3})

$$x_p = 4,6nm \ , x_n = L - x_p = 460nm \approx L \ ,$$



0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-100
0
100
200
300
400
500
600
700
Bandas de Energia e Potencial
x(nm)



Estrutura de Bandas de Energia
x(nm)
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
-100
0
100
200
300
400
500
600
700

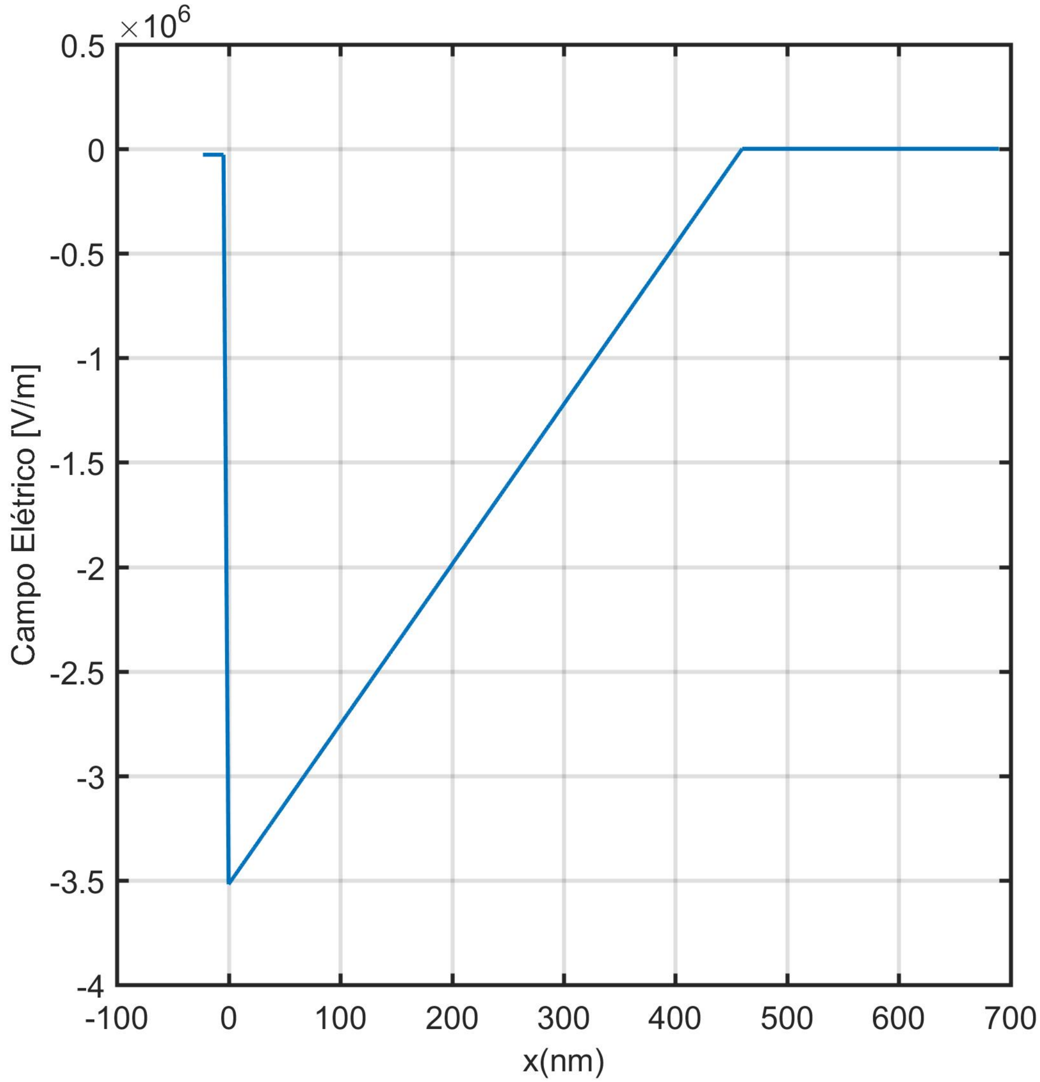
c) Campo máximo em módulo

$$E_0 = \frac{2V_0}{L} = \frac{2 * 0,817}{0,464\mu\text{m}} = 3,52 \times 10^6\text{V/m}$$

$$C = \frac{\varepsilon A}{L}$$

$$A = \pi * (100 \times 10^{-6})^2 = 3,1415 \times 10^{-8}\text{m}^{-2}$$

$$C = \frac{11.8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 3,1415 \times 10^{-8}}{0,464 \times 10^{-6}} = 7,07pF$$


×10^6
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2
-2.5
-3
-3.5
-4
Campo Elétrico [V/m]
-100
0
100
200
300
400
500
600
700
x(nm)

d) Corrente de Saturação e curva I-V

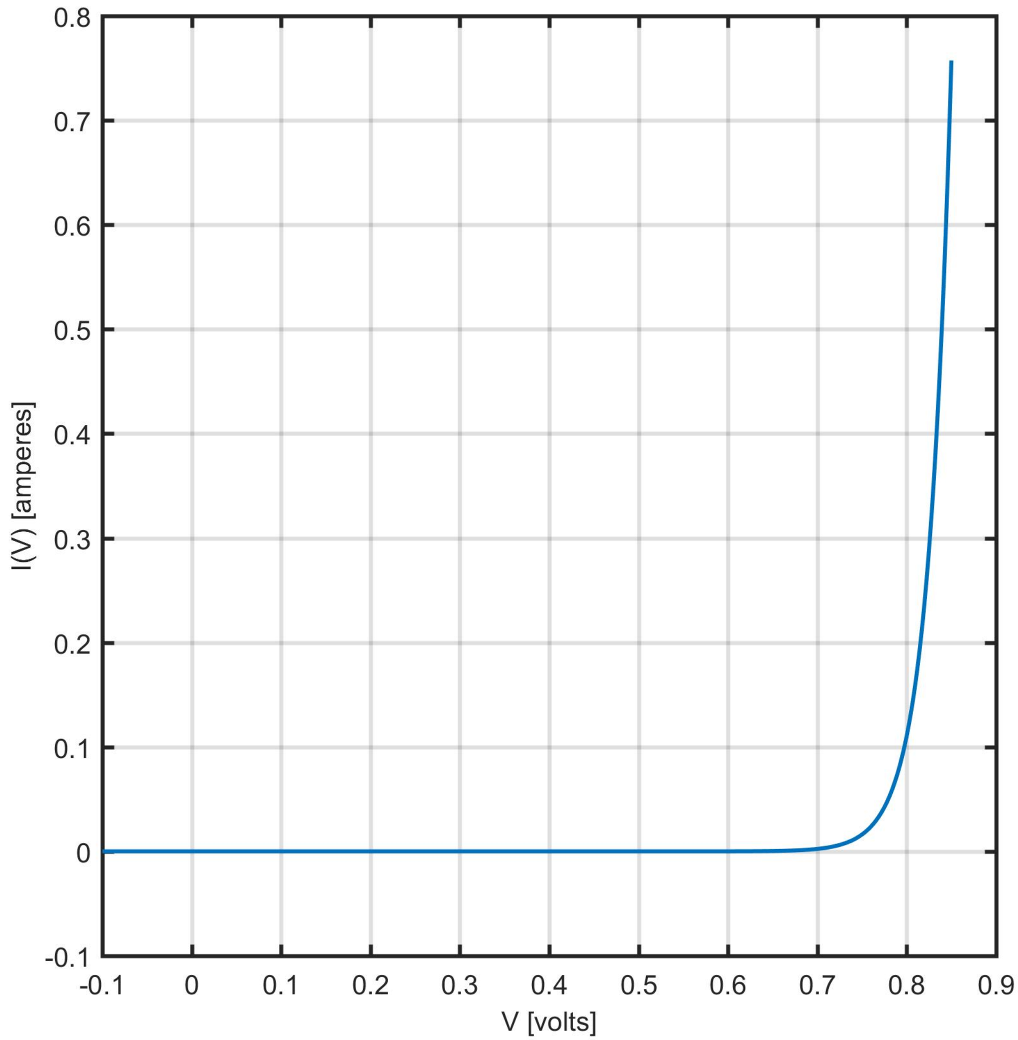
$$J_s = e n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$

.

$\tau_p = \tau_n = 0,5\mu$s, $L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 25\ \mu$m, $L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 42\ \mu$m.

$$J_s = 1,6 \times 10^{-19} \times (9,7 \times 10^{15})^2 \times \left(\frac{12,5 \times 10^{-4}}{25 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^{21}} + \frac{35 \times 10^{-4}}{42 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^{23}} \right) =$$

$$I_s = J_s A = 4,8 \times 10^{-15}\mathrm{A}$$



0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
I(V) [amperes]
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
V [volts]

Exercício 2) Um diodo de junção PN de Si polarizado diretamente com corrente constante é utilizado como termômetro. Em $T = 27^o$ C a tensão no diodo é de 700 mV.

a) Calcule o coeficiente de temperatura desse diodo nessa temperatura, ou seja, a razão $\Delta V/\Delta T$.

b) Qual será a variação de tensão se a temperatura aumentar para 80^oC? Calcule essa variação exatamente e compare com o valor obtido supondo que ela é linear e caracterizada pelo coeficiente obtido no item a).

Obs.: Exercício 6.10) do livro de Sergio M. Rezende, Materiais e Dispositivos Semicondutores.

Esboço da Solução:

$$I = I_s(e^{V/V_T} - 1)$$

Invertendo essa equação tem-se:

$$V = V_T \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) \ .$$

Lembre que $V_T = k_B T/e$ e I_s depende de ni^2, que por sua vez é função da temperatura $n_i(T)$. Desse modo:

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{dV}{dT}\Big|_{T=27^oC} \ .$$

Dica: derivada do produto de funções... I é constante e pode ser calculada a relação I/I_s a 27^oC para esse diodo.

Para determinar $V(80^oC)$ você pode fazer $V(27^oC)+(dV/dT)\Delta T$, supondo linearidade.

No caso de cálculo exato é necessário usar a expressão $V = V_T \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right)$ com V_T a 80^oC.

Item a) Considere que

$$I_s = eAn_i^2\left(\frac{D_p}{L_pN_D}+\frac{D_n}{L_nN_A}\right) = Bn_i^2 \ ,$$

onde B agrupa todas as contantes do material.

$$\frac{dV}{dT} = \frac{k_B}{e}\ln\left(\frac{I}{I_s}+1\right) - V_T\frac{\frac{I}{I_s^2}\frac{dI_s}{dT}}{I/I_s+1}$$

Calculando a derivada de I_s em relação à temperatura temos:

$$\frac{dI_s}{dT} = 2Bn_i\frac{dn_i}{dT} = 2Bn_i^2\frac{dn_i/dT}{n_i} = 2I_s\frac{dn_i/dT}{n_i}$$

O resultado aproximado para $I/I_s >> 1$ é o seguinte:

$$\frac{dV}{dT} \approx \frac{V}{T} - 2V_T\frac{dn_i/dT}{n_i}$$

Para o diodo de Silício:

$$\frac{V}{T}(300K) = \frac{700}{300} = 2,333 \text{ mV/K} .$$

$$\frac{dn_i/dT}{n_i}(@300K) \approx 0,086 \ K^{-1}.$$

$$2V_T \frac{dn_i/dT}{n_i}(@300K) = 4,45 \text{ mV/K}$$

$$\frac{dV}{dT} \approx 2,33 - 4,45 = -2,12 \text{ mV/K}$$

$$V(80^oC) = 700mV - 2,12 \times (80 - 27) = 587,64 \text{ mV}$$

)

Obs: a variação de I_s com relação a T é dominante, produzindo um coeficiente negativo (típico em semicondutores nessa escala de temperaturas).