

**UFRJ – POLI – DEL / Departamento de Eletrônica e Computação – EEL315 – Eletrônica I
2020/PLE - Lista de Exercícios 2 (referente à aula do arquivo AT02.pdf)**

1. Um certo volume de silício, em forma de paralelepípedo com 200 nm de altura e de largura, e com 1 μm de comprimento, está submetido à injeção de elétrons pela sua extremidade esquerda e à injeção de lacunas pela extremidade direita. A concentração de elétrons na direção x do comprimento do paralelepípedo é $n(x) = 2 \times 10^{17}(1 - x/(1 \mu\text{m}))$ e a concentração de lacunas ao longo da mesma direção é $p(x) = 5 \times 10^{16}x/(1 \mu\text{m})$.
 - a) Desenhe os gráficos de $n(x)$ e $p(x)$ em função de x .
 - b) Calcule o valor da corrente de difusão que flui através do material e indique a sua direção.
2. Uma junção pn de silício é fabricada com $N_D = 10^{17}$ átomos/cm³ e $N_A = 5 \times 10^{16}$ átomos/cm³.
 - a) Calcule os valores da voltagem da barreira de potencial nas três temperaturas a seguir: $T_1 = 250$ K, $T_2 = 300$ K e $T_3 = 350$ K.
 - b) (Atenção: este item não precisa de resposta!) Estude o enunciado e o gabarito da Questão 2 da Prova de Segunda Chamada de 12/12/2018.
3. Um capacitor controlado por tensão elétrica é contruído por meio de uma junção pn (diodo), com área transversal de 10 μm^2 , polarizada reversamente. Quando a voltagem reversa aplicada a este diodo é $V_{R1} = 1$ V, a capacitância obtida é $C_1 = 3.26$ fF. Quando a voltagem reversa é $V_{R2} = 4$ V, a capacitância é $C_2 = 2.00$ fF.
 - a) Quais foram as concentrações de átomos de fósforo (N_D) e boro (N_A) utilizadas na fabricação deste diodo?
 - b) Se uma das duas concentrações (N_A ou N_D) for multiplicada por 2 e a outra for mantida constante, quais serão os novos valores de C_1 e C_2 ?

Dados e Lista de Equações

1 eV = 1.6×10^{-19} J; silício: $E_g = 1.12$ eV; diamante: $E_g = 5.47$ eV; germânio: $E_g = 0.66$ eV;

Silício: $n_i = 5.2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT}$ elétrons/cm³; germânio: $n_i = 1.66 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT}$ elétrons/cm³;

Silício a 300 K: $n_i = 1.08 \times 10^{10}$ cm⁻³;

Constante de Boltzmann: $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; densidade do silício intrínseco: 5×10^{22} átomos/cm³;

Semicondutor intrínseco e dopagem: $np = n_i^2$; fósforo e arsênio são “doadores”; boro e gálio são “aceitadores”;

Vetor velocidade, elétrons e lacunas: $v_e = -\mu_n E$ e $v_h = \mu_p E$. No silício: $\mu_n = 1350$ cm²/(Vs) e $\mu_p = 480$ cm²/(Vs);

No germânio: $\mu_n = 3900$ cm²/(Vs) e $\mu_p = 1900$ cm²/(Vs);

Densidade de corrente (deriva): $J_{tot} = q(\mu_n n + \mu_p p) E$, proveniente de $I = -vWhnq$; $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C;

Saturação de velocidade: $v = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_0}{v_{sat}} E} E$

Dens. de corrente (difusão): $J_{tot} = q \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right)$, prov. de $I = AqD_n \frac{dn}{dx}$; $D_n = 34$ cm²/s e $D_p = 12$ cm²/s;

Concentração exponencial de elétrons ao longo do eixo x : $n(x) = N e^{-x/L_d}$;

Relação de Einstein: $D/\mu = kT/q$; observação: $kT/q \approx 26$ mV @ $T = 300$ K;

Barreira de potencial: $V(x_2) - V(x_1) = \frac{-D_p}{\mu_p} \ln \frac{p_p}{p_n} \implies |V_0| = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$, prov. de $q\mu_p p E = qD_p \frac{dp}{dx}$;

Junção pn em polarização reversa: $C_j = C_{j0} / \sqrt{1 - \frac{V_R}{V_0}}$; $C_{j0} = \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} q}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{V_0}}$; $\epsilon_{Si} = 11.7 \times 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm;

Polarização direta: $p_{n,f} = \frac{p_{p,f}}{\exp \frac{V_0 - V_F}{V_T}}$, e também $\Delta p_n = p_{n,f} - p_{n,e} = \frac{N_A}{\exp(V_0/V_T)} \left(\exp \left(\frac{V_F}{V_T} \right) - 1 \right)$;

$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$, onde $I_S = Aq n_i^2 \left(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right)$; n = fator de não-idealidade do diodo;

Aproximação linear por partes (com $V_{D0} = 0.6$ V e $r_d = 10$ Ω , por exemplo): $V_D = 0.6 + 10I_D$;

Polarização reversa: $|\Delta T| = 10 \log_2 \frac{I_{D,f}}{I_{D,i}}$; diodo Zener em polarização reversa: $I_Z = I_S \exp \frac{V_Z - V_{ZK}}{nV_T}$;

Tabela 1. Alguns dados sobre o diodo D1N4001. $I_S = 14.1$ nA e $n = 1.98$.

I_D (A)	2 μ	5 μ	10 μ	20 μ	50 μ	0.1 m	0.2 m	0.5 m	1 m	2 m	5 m	10 m	20 m
V_D (mV)	255	301	337	372	419	455	490	538	573	609	656	692	727

Tabela 2. Alguns dados sobre o diodo D1N756 em polarização direta.

I_D (A)	2 μ	5 μ	10 μ	20 μ	50 μ	0.1 m	0.2 m	0.5 m	1 m	2 m	5 m	10 m	20 m
V_D (mV)	378	429	467	505	554	589	621	658	683	708	743	777	825

Tabela 3. Alguns dados sobre o diodo D1N756 em polarização reversa (considere $V_{ZK} = 8.0$ V).

I_Z (A)	2 μ	5 μ	10 μ	20 μ	50 μ	0.1 m	0.2 m	0.5 m	1 m	2 m	5 m	10 m	20 m
$V_Z - V_{ZK}$ (mV)	020	032	041	050	063	072	081	094	105	117	138	161	200

$V_{DC} = (1/T) \int_0^T v(t) dt$; $V_{RMS}^2 = (1/T) \int_0^T v^2(t) dt$; $V_{AC,RMS}^2 = V_{RMS}^2 - V_{DC}^2$;

Senóide retificada (meia onda): $V_{DC} = A/\pi$ e $V_{RMS} = A/2$; senóide retificada (onda completa): $V_{DC} = 2A/\pi$ e $V_{RMS} = A/\sqrt{2}$; onda “dente-de-serra”: $V_{DC} = (V_1 + V_2)/2$ e $V_{AC,RMS} = V_{R,P}/\sqrt{3}$, onde $V_{R,P} = (V_1 - V_2)/2$;

$P_{AVG} = (1/T) \int_0^T v(t)i(t) dt = V_{RMS}^2/R$.

(Filtro RC) $r = I_{DC}/(4\sqrt{3}fCV_m) = V_{AC,RMS}/V_{DC}$; $(1 + r\sqrt{3})V_{DC} = V_m$; $V_{AC,RMS} = V_{R,P}/\sqrt{3} = (V_2 - V_1)/(2\sqrt{3})$;

Alguns valores de resistores comerciais (Ω): 33, 47, 68, 82, 100, 120, 150, 180, 220, 270; e alguns valores de capacitores comerciais (μ F): 47, 68, 100, 220, 330, 470, 680.