UFRJ – POLI – DEL / Departamento de Eletrônica e Computação – EEL315 – Eletrônica I 2020/PLE - Lista de Exercícios 1 (referente à aula do arquivo AT01.pdf)

1. Considere uma barra de germânio dopado com boro à densidade de 5×10^{16} átomos/cm^3.

   a) Calcule as concentrações de elétrons e lacunas no material dopado, considerando temperatura $T = 300$ K. Dica: para calcular n_i a 300 K, use a respectiva equação que é dada para o germânio na lista de equações.

   b) Se as dimensões desta barra de germânio forem 5 μm $\times$ 0.1 μm $\times$ 0.1 μm e uma diferença de potencial de 10 V for aplicada às suas extremidades mais afastadas entre si, qual será a corrente que percorre a barra? Considere $T = 300$ K.

2. Uma barra de semicondutor intrínseco é dopada com fósforo à concentração de 2×10^{15} átomos/cm^3 e, como consequência, a concentração de portadores p fica em 4.47×10^7 lacunas/cm^3 à temperatura $T = 350$ K.

   a) O material em questão é silício ou germânio? Justifique sua resposta. Dica: calcule n_i para o silício e para o germânio a 350 K.

   b) Se a barra tiver seção transversal quadrada e estiver sujeita a um campo elétrico de 10^4 V/cm entre as suas extremidades mais distantes, e assumindo que os elétrons desta barra têm limitação de velocidade dada por $v_{sat} = 10^7$ cm/s, qual deve ser a largura da seção transversal da barra para que uma corrente de 10 μA percorra a barra à temperatura de 350 K? Assuma, a 350 K, os seguintes valores básicos de mobilidade (campo elétrico $E = 0$) para os elétrons: 950 cm^2/(Vs) (para o silício), ou 3300 cm^2/(Vs) (para o germânio).

3. Uma barra de silício intrínseco, sujeita a um campo elétrico E entre as suas extremidades, apresenta corrente I a 320 K. Se a temperatura for aumentada para 340 K, quantas vezes a corrente I aumenta? Assuma que, a 320 K, as constantes de mobilidade de elétrons e lacunas do silício sejam 1190 cm^2/(Vs) e 440 cm^2/(Vs), respectivamente. E que, a 340 K, sejam 1030 cm^2/(Vs) e 400 cm^2/(Vs).

Dados e Lista de Equações

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

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

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/cm^3;

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: $\mu_n = 1350$ cm^2/(Vs) e $\mu_p = 480$ cm^2/(Vs);

No germânio: $\mu_n = 3900$ cm^2/(Vs) e $\mu_p = 1900$ cm^2/(Vs);

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

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

Dens. de corrente (difusão): $J_{tot} = q\left(D_n \dfrac{dn}{dx} - D_p \dfrac{dp}{dx}\right)$, prov. de $I = AqD_n \dfrac{dn}{dx}$; $D_n = 34$ cm^2/s e $D_p = 12$ cm^2/s;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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