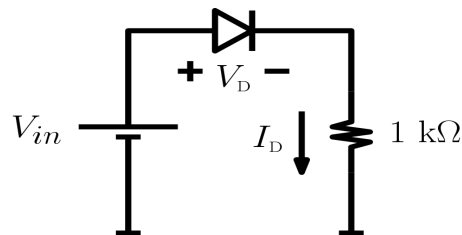


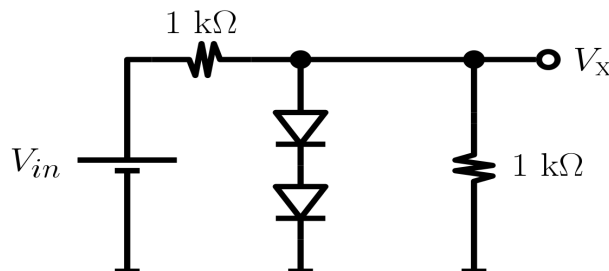
1. Considere uma junção pn de silício fabricada com os seguintes parâmetros  $N_D = 2 \times 10^{16}$  átomos de fósforo por  $\text{cm}^3$ ,  $N_A = 5 \times 10^{15}$  átomos de boro por  $\text{cm}^3$  e  $A = 400 \mu\text{m}^2$ . Considere temperatura  $T = 300 \text{ K}$  e, a essa temperatura, as constantes usuais  $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $L_n = 20 \mu\text{m}$  e  $L_p = 30 \mu\text{m}$ .
  - a) Calcule a corrente  $I_D$  que passa pela junção pn no sentido direto, para os seguintes valores de diferença potencial elétrico entre o anodo (potencial mais alto) e o catodo (potencial mais baixo):  $V_{D1} = 440 \text{ mV}$ ,  $V_{D2} = 500 \text{ mV}$ ,  $V_{D3} = 560 \text{ mV}$ ,  $V_{D4} = 620 \text{ mV}$ ,  $V_{D5} = 680 \text{ mV}$ ,  $V_{D6} = 740 \text{ mV}$  e  $V_{D7} = 800 \text{ mV}$ ;
  - b) Qual é o valor da corrente que passa pela junção pn no sentido reverso, quando o potencial elétrico do catodo é 3 volts superior ao do anodo?
2. Considere o circuito desenhado a seguir, que utiliza um diodo D1N4001. Os parâmetros de corrente de saturação reversa e fator de não idealidade do diodo, dados no formulário em anexo, são  $I_S = 14.1 \text{ nA}$  e  $n = 1.98$ . Considere também temperatura  $T = 300 \text{ K}$ .



- a) Calcule os valores de  $V_D$  e  $I_D$  obtidos quando  $V_{in} = 5 \text{ V}$ ;
- b) Calcule os valores de  $V_D$  e  $I_D$  obtidos quando  $V_{in} = 0.4 \text{ V}$ .

Dica: perceba que, no item (a), o sistema de equações deve ser resolvido, no método iterativo, na ordem  $I_D = (V - V_D)/R \rightarrow V_D = nV_T \ln(I_D/I_S) \rightarrow I_D = (V - V_D)/R \dots$  Por outro lado, no item (b), o sistema deve ser resolvido na ordem  $I_D = I_S \exp(V_D/(nV_T)) \rightarrow V_D = V - RI_D \rightarrow I_D = I_S \exp(V_D/(nV_T)) \dots$  Tente resolver os itens (a) e (b) aplicando as equações na ordem errada, para ver o que acontece.

3. Resolva o item (a) da Questão 2 de forma aproximada, utilizando modelos simplificados (bateria e “linear por partes”) para o diodo D1N4001. Em cada item, calcule a diferença relativa (percentual) entre o valores de  $V_D$  e  $I_D$  obtidos e os respectivos valores de  $V_D$  e  $I_D$  encontrados no item (a) da Questão 2.
  - a) Modelo de bateria de 0.7 V;
  - b) Modelo “linear por partes” (bateria  $V_{D0}$  em série com resistência  $r_d$ ). Escolha, na Tabela 1 do formulário, um ou dois pontos para o desenvolvimento do modelo; e indique quais valores de  $V_{D0}$  e  $r_d$  você encontrou para o seu modelo).
4. Usando a junção pn dada na Questão 1, e assumindo  $V_{in} = 2 \text{ V}$ , encontre o valor da tensão  $V_X$  gerada pelo circuito a seguir. Se, na conexão entre  $V_X$  e o terminal de terra, os dois diodos em série fossem substituídos por dois diodos em paralelo, qual seria o novo valor de  $V_X$ ?



5. (Atenção: essa questão não precisa de resposta!) Estude a Questão 4 da Prova de Segunda Chamada de 15/07/2019 e o seu gabarito, pensando sobre como a solução poderia ser obtida caso a tensão de entrada mudasse de 1.6 V para 0.8 V.

## 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:  $n_i = 5.2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT}$  elétrons/cm<sup>3</sup>; germânio:  $n_i = 1.66 \times 10^{15} T^{3/2} \exp \frac{-E_g}{2kT}$  elétrons/cm<sup>3</sup>;

Silício a 300 K:  $n_i = 1.08 \times 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>;

Constante de Boltzmann:  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K; densidade do silício intrínseco:  $5 \times 10^{22}$  átomos/cm<sup>3</sup>;

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<sup>2</sup>/(Vs) e  $\mu_p = 480$  cm<sup>2</sup>/(Vs);

No germânio:  $\mu_n = 3900$  cm<sup>2</sup>/(Vs) e  $\mu_p = 1900$  cm<sup>2</sup>/(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  $I = AqD_n \frac{dn}{dx}$ ;  $D_n = 34$  cm<sup>2</sup>/s e  $D_p = 12$  cm<sup>2</sup>/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  $r_d = 10$   $\Omega$ , 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 $\mu$	5 $\mu$	10 $\mu$	20 $\mu$	50 $\mu$	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 $\mu$	5 $\mu$	10 $\mu$	20 $\mu$	50 $\mu$	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 $\mu$	5 $\mu$	10 $\mu$	20 $\mu$	50 $\mu$	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 ( $\Omega$ ): 33, 47, 68, 82, 100, 120, 150, 180, 220, 270; e alguns valores de capacitores comerciais ( $\mu$ F): 47, 68, 100, 220, 330, 470, 680.