

Todos os itens da prova têm o mesmo valor: 1.0 ponto cada (total de 10 pontos). Tempo de prova: 2 horas.

1. (*Transporte de Portadoras*) Uma barra de silício intrínseco, sujeita a campo elétrico  $E$  entre as suas extremidades, apresenta corrente  $I$  a 300 K. Se a temperatura for aumentada para 400 K, quantas vezes a corrente aumenta? Assuma que, a 400 K, as constantes de mobilidade de elétrons e lacunas são reduzidas para  $700 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$  e  $250 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ , respectivamente. As respectivas constantes que aparecem no formulário são para 300 K.
2. (*Junção pn*) Uma junção pn é fabricada de tal forma que o potencial de barreira é  $V_0 = 700 \text{ mV}$  a 300 K e  $V_0 = 529 \text{ mV}$  a 400 K. Assumindo variação linear de  $V_0$  em função da temperatura no intervalo entre 300 K e 400 K, estime a temperatura  $T$  para a qual  $V_0 = 600 \text{ mV}$ . Verifique a sua resposta usando as equações adequadas.
3. (*Polarização Reversa*) Um circuito para a geração de sinais alternados requer um diodo reversamente polarizado cuja capacitância por área de seção transversal seja  $C_j = 0.125 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$  quando a voltagem reversa for  $V_R = 2.1 \text{ V}$ , e seja  $C_j = 0.1 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$  quando a voltagem reversa for  $V_R = 3.7 \text{ V}$ . Determine as concentrações de átomos dopantes  $N_A$  e  $N_D$  com as quais este diodo deve ser fabricado.
4. (*Modelo Exponencial*) Usando modelo exponencial para o diodo D1N4001 a 300 K, calcule  $V_X$  na Figura 1. Execute apenas três iterações do método iterativo.
5. (*Modelo Linear por Partes e Fator de Ripple*) Utilizando um modelo linear por partes adequado para o diodo D1N756, calcule os fatores de *ripple* da onda senoidal de entrada e da onda senoidal  $v(t)$ , no circuito da Figura 2.
6. (*Fonte com Filtro RC*) Usando um transformador 127:12+12 volts (60 Hz), dois diodos D1N4001, e um capacitor  $C$ , desenhe uma fonte não regulada que seja capaz de entregar 225 mW de potência a um resistor  $R_L$  de 1 k $\Omega$ . Escolha, para  $C$ , o menor valor comercial possível.
7. (*Fonte DC Regulada a Zener*) Uma fonte DC regulada a Zener é construída com um transformador de 127:12+12 volts (60 Hz), dois diodos D1N4001,  $C = 100 \mu\text{F}$ ,  $R_S = 120 \Omega$  e diodo Zener D1N756. Assumindo que a menor resistência a ser alimentada por esta fonte é  $R_L = 470 \Omega$ , calcule o fator de regulação da mesma.
8. (*Limitador*) Desenhe um limitador de tensão com as seguintes características:  $V_{\text{out}} = 5 \text{ volts}$  se  $V_{\text{in}} > 10 \text{ volts}$ ,  $V_{\text{out}} = -0.7 \text{ volts}$  se  $V_{\text{in}} < -1.4 \text{ volts}$ , e  $V_{\text{out}} = V_{\text{in}}/2$  se  $V_{\text{in}} \in [-1.4, 10] \text{ volts}$ .
9. (*Multiplicador*) Desenhe dois circuitos triplicadores de tensão. Explique, sucintamente, o funcionamento de um deles.
10. (*Amp Op*) Calcule  $V_{\text{out}}$  para o circuito da Figura 3, assumindo amplificador operacional com ganho finito, igual a 100.

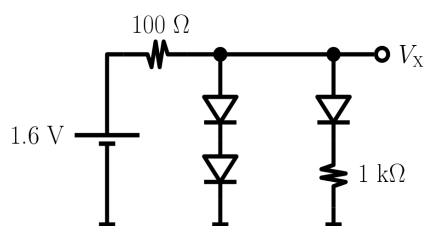


Figura 1

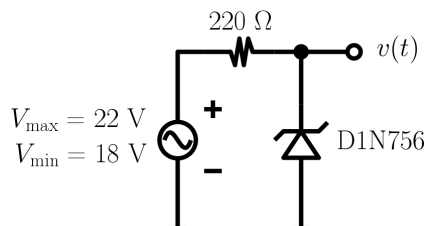


Figura 2

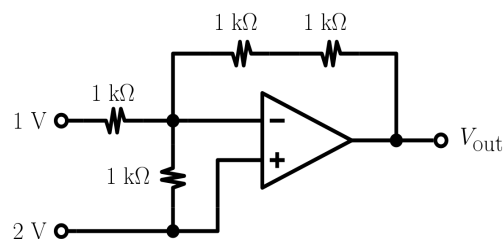


Figura 3

Boa prova!

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

(Fonte Regulada a Zener)  $r_{\text{RL}} = r_{\text{capacitor}} \frac{r_z}{R_s + r_z} \frac{V_{\text{DC,capacitor}}}{V_z}$ ; fator de regulação =  $\frac{V_{\text{DC,NL}} - V_{\text{DC,FL}}}{V_{\text{DC,NL}}} \times 100\%$ ;

$(V_1 - V_z)/R_{s\text{max}} = I_{z\text{max}} + I_{L\text{min}}$  (use esta fórmula com moderação e com cuidado!)

$(V_2 - V_z)/R_{s\text{min}} = I_{z\text{min}} + I_{L\text{max}}$  (use esta fórmula com moderação e com cuidado!)

Alguns valores de resistores comerciais ( $\Omega$ ): 33, 47, 68, 82, 100, 120, 150, 180, 220, 270;

Alguns valores de capacitores comerciais ( $\mu\text{F}$ ): 47, 68, 100, 220, 330, 470, 680.

## Dados e Lista de Equações

1 eV =  $1.6 \times 10^{-19}$  J; silício:  $E_g = 1.12$  eV; diamante:  $E_g = 2.5$  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:  $V(x_2) - V(x_1) = \frac{-D_p}{\mu_p} \ln \frac{p_p}{p_n} \Rightarrow |V_0| = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$ , 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  $\Delta p_n = p_{n,f} - p_{n,e} = \frac{N_A}{\exp(V_0/V_T)} \left( \exp \left( \frac{V_F}{V_T} \right) - 1 \right)$ ;

$I_D = I_S (e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1)$ , 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 com  $V_{D0} = 0.6$  V e  $r_d = 10$   $\Omega$ :  $V_D = 0.6 + 10 I_D$ ;

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  $V_{R,P} = (V_1 - V_2)/2$ ;

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