

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

1. (*Dopagem*) Uma barra de silício com dimensões $500 \text{ nm} \times 500 \text{ nm} \times 10 \text{ } \mu\text{m}$ está sujeita à injeção de elétrons pela sua extremidade esquerda e de lacunas pela direita, de forma tal que a concentração de elétrons ao longo do comprimento da barra é $n(x) = 10^{17}(1 - x/(10 \text{ } \mu\text{m}))$ e a concentração de lacunas ao longo do comprimento da barra é $p(x) = 5 \times 10^{16}x/(10 \text{ } \mu\text{m})$. Desenhe os gráficos de $n(x)$ e de $p(x)$. Calcule a corrente de difusão que flui através da barra.
2. (*Junção pn*) Uma junção pn de germânio é fabricada com $N_D = 2 \times 10^{17} \text{ átomos/cm}^3$ e $N_A = 5 \times 10^{16} \text{ átomos/cm}^3$. Calcule a voltagem da barreira de potencial à temperatura de 400 K.
3. (*Modelos de Diodos*) Considere uma diferença de potencial de 2.0 V aplicada a um diodo D1N4001, polarizado no sentido direto, em série com um resistor de $1 \text{ k}\Omega$. Qual é a corrente I_D que passa pelo resistor e pelo diodo? Nesta questão use, para o diodo, um modelo linear por partes.
4. (*Polarização Direta*) Refaça a Questão 3 usando, para o diodo, o seguinte modelo: $I_D = 14.1 \times 10^{-9} \exp(V_D/(1.98V_T))$, com $V_T = 26 \text{ mV}$.
5. (*Valores RMS*) Desenhe um retificador de meia onda utilizando um diodo D1N4001 conectado a uma fonte senoidal com voltagem de pico $V_P = 20 \text{ V}$ e a uma carga resistiva $R_L = 1 \text{ k}\Omega$. Desenhe a forma de onda $v(t)$ obtida sobre R_L e diga qual é o seu fator de ripple.
6. (*Fonte com Filtro RC*) Calcule qual deve ser o capacitor colocado em paralelo com o R_L da Questão 5, de forma que o fator de ripple seja reduzido para 5%, considerando $f = 60 \text{ Hz}$. Utilizando o valor comercial escolhido, calcule qual será o fator de ripple obtido.
7. (*Fonte Regulada a Zener*) Na Figura 1, qual é o fator de ripple observado sobre a carga resistiva?
8. (*Limitador*) Utilizando um diodo Zener D1N756 e um resistor de $1 \text{ k}\Omega$, desenhe um circuito que gera uma forma de onda limitada entre -0.7 V e 8.2 V, a partir de uma entrada que varia entre -20 V e +20 V. Opcional (0.5 ponto extra): se você colocar um outro resistor de $1 \text{ k}\Omega$ em série com o diodo Zener, como fica a relação $V_{\text{out}} \times V_{\text{in}}$ do circuito?
9. (*Grampeador*) Considere o circuito desenhado na Figura 2. Desenhe a forma de onda $v(t)$.
10. (*Amp Op*) Desenhe o diagrama esquemático de um amplificador operacional com seus terminais conectados em configuração inversora, usando resistores $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$. Assumindo que o amp op tem ganho em malha aberta igual a 100, calcule o ganho do amplificador na configuração dada.

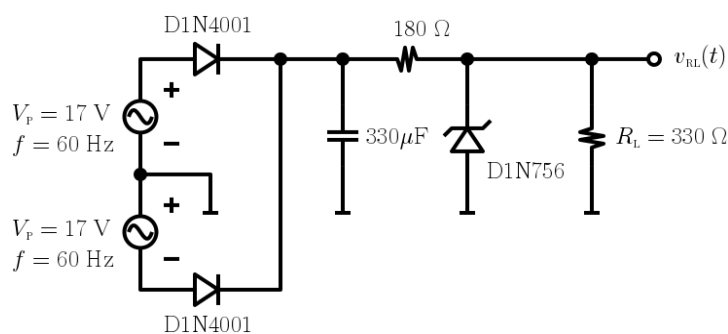


Figura 1

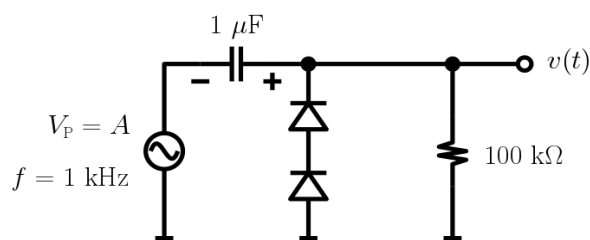


Figura 2

Boa prova!

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

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

$(V_1 - V_z)/R_{smax} = I_{zmax} + I_{Lmin}$ (use esta fórmula com moderação e com cuidado!)

$(V_2 - V_z)/R_{smin} = I_{zmin} + I_{Lmax}$ (use esta fórmula com moderação e com cuidado!)

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

Alguns valores de capacitores comerciais (μF): 47, 68, 100, 220, 330, 470, 680.

Dados e Lista de Equações

1 eV = 1.6×10^{-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/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: $V(x_2) - V(x_1) = \frac{-D_p}{\mu_p} \ln \frac{p_p}{p_n} \Rightarrow |V_0| = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$, 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 $r_d = 10$ Ω : $V_D = 0.6 + 10 I_D$;

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

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