UFRJ / DEL / Departamento de Eletrônica e Computação – Primeiro Período de 2022
EEL315 – Eletrônica I – Prova Final – 25 de julho de 2022 – Gabarito

Questão 1:

a) No lado n, temos $n_n = N_D = 2 \times 10^7$ elétrons/cm^3 e $p_n = 1.08^2 \times 10^{20}/(2 \times 10^7) = 583$ lacunas/cm^3. No lado p, temos $p_p = N_A = 2 \times 10^6$ lacunas/cm^3 e $n_p = 1.08^2 \times 10^{20}/(2 \times 10^6) = 5832$ elétrons/cm^3.

b) $n_{i,250} = 5.2 \times 10^{15} \times 250^{1.5} \exp\left((-1.12 \times 1.6 \times 10^{-19})/(2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 250)\right) = 1.081 \times 10^8\ \text{cm}^{-3}$.

$V_{0,250} = 1.38 \times 10^{-23} \times 250/(1.6 \times 10^{-19}) \ln\left((4 \times 10^{33})/(1.081^2 \times 10^{16})\right) = 0.871$ V.

$n_{i,350} = 5.2 \times 10^{15} \times 350^{1.5} \exp\left((-1.12 \times 1.6 \times 10^{-19})/(2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 350)\right) = 2.990 \times 10^{11}\ \text{cm}^{-3}$.

$V_{0,350} = 1.38 \times 10^{-23} \times 350/(1.6 \times 10^{-19}) \ln\left((4 \times 10^{33})/(2.990^2 \times 10^{22})\right) = 0.740$ V.

Questão 2:

$V_T = (1.38 \times 10^{-23} \times 300)/(1.6 \times 10^{-19}) = 25.88$ mV

a) Para $V_{\text{in}} = 5$ V, temos: $I_D = (5-0.7)/1000 = 4.3$ mA $\longrightarrow V_D = 1.5 \times 25.9$ mV $\times \ln\left((4.3 \times 10^{-3})/(5 \times 10^{-9})\right) = 38.85 \times 13.66 = 531$ mV $\longrightarrow I_D = (5 - 0.531)/1000 = 4.47$ mA $\longrightarrow V_D = 38.85 \times \ln(4.47/5 \times 10^6) = 38.85 \times 13.70 = 532$ mV $\longrightarrow I_D = (5 - 0.532)/1000 = 4.47$ mA.

Para $V_{\text{in}} = 10$ V, temos: $I_D = (10 - 0.7)/1000 = 9.3$ mA $\longrightarrow V_D = 38.85$ mV $\times \ln(9.3/5 \times 10^6) = 38.85 \times 14.44 = 561$ mV $\longrightarrow I_D = (10 - 0.561)/1000 = 9.44$ mA $\longrightarrow V_D = 38.85 \times \ln(9.44/5 \times 10^6) = 38.85 \times 14.45 = 561$ mV.

b) Exemplos de pontos para ajuste do modelo linear por partes: $I_D = 5$ mA $\longrightarrow V_D = 38.85 \times \ln(5/5 \times 10^6) = 38.85 \times 13.82 = 537$ mV, e $I_D = 10$ mA $\longrightarrow V_D = 38.85 \times \ln(10/5 \times 10^6) = 38.85 \times 14.51 = 564$ mV.

Neste caso: $r_d = (564 - 534)/(10 - 5) = 5.4\ \Omega$ e $V_{D0} = 0.564 - 5.4 \times 0.01 = 0.51$ V.

Para $V_{\text{in}} = 5$ V, temos: $I_D = (5 - 0.51)/1005.4 = 4.47$ mA e $V_D = 0.51 + 5.4 \times 0.00447 = 534$ mV.

Para $V_{\text{in}} = 10$ V, temos: $I_D = (10 - 0.51)/1005.4 = 9.44$ mA e $V_D = 0.51 + 5.4 \times 0.00944 = 561$ mV.

Questão 3:

a) $(1 + \sqrt{3} \times 0.025)V_{DC} = 18.9 \longrightarrow V_{DC} = 18.1\ \text{V} \longrightarrow V_2 = 17.3$ V

Sem carga resistiva, temos: $R_{\text{S,min}} = (18.9 - 8.2)/0.045 = 238\ \Omega$. Com carga $R_{\text{L,min}} = 270\ \Omega$ (que solicita 30.4 mA da fonte de 8.2 V), temos: $R_{\text{S,max}} = (17.3 - 8.2)/0.0354 = 257\ \Omega$. Portanto, escolhemos $R_{\text{S}} = 250\ \Omega$.

Observação: atualizando o fator de ripple, encontramos: $I_{DC} = (18.1 - 8.2)/250 = 39.6$ mA

$r = 39.6 \times 10^{-3}/(4 \times 1.732 \times 60 \times 0.22 \times 10^{-3} \times 18.9) = 39.6/1728 = 2.3\%$

$(1 + \sqrt{3} \times 0.023)V_{DC} = 18.9 \longrightarrow V_{DC} = 18.2\ \text{V} \longrightarrow I_{DC} = (18.2 - 8.2)/250 = 40\ \text{mA} \longrightarrow r = 40/1728 = 2.3\%$

b) $V_2 = 18.2 - 0.7 = 17.5\ \text{V} \longrightarrow I_{zmin} = (17.5 - 8.2)/250 - 8.2/270 = 6.8$ mA

$I_{zmax} = (18.9 - 8.2)/250 = 42.8$ mA

Obs.: alternativamente, quem fizer cálculos usando V_{DC}, como na P2 de 2018/2, obterá $(18.2 - 8.2)/250 - 8.2/250 = 9.6$ mA (estimativa inferior para I_z) e $(18.2 - 8.2)/250 = 40$ mA (estimativa superior).

Modelo linear por partes: $V_z = 8.138\ \text{V} \longrightarrow I_z = 5$ mA e $V_z = 8.138\ \text{V} + 83\ \text{mV} = 8.221\ \text{V} \longrightarrow I_z = 50$ mA

$r_z = 83/45 = 1.84\ \Omega \longrightarrow V_{z0} = 8.138 - 1.84 \times 0.005 = 8.129$ V.

Sem carga resistiva: $I_{DC} = (18.2 - 8.129)/(251.84) = 40\ \text{mA} \longrightarrow V_{DC,NL} = 8.129 + 1.84 \times 0.04 = 8.203$ V

Com R_{Lmin}: $(18.2 - V_X)/250 = (V_X - 8.129)/1.84 + V_X/270$ (obs.: nesta equação, V_X é $V_{DC,FL}$)

$V_X = (18.2 \times 1.84 \times 270 + 8.129 \times 250 \times 270)/(250 \times 270 + 250 \times 1.84 + 270 \times 1.84) = 557749/68457 = 8.147$ V

O fator de regulação é $(8.203 - 8.147)/(8.203) \times 100\% = 0.7\%$.

c) $r_{RL} = 0.023 \times 1.84/(1.84 + 250) \times 18.2/8.2 = 0.04\%$

Questão 4:

a) Quando a entrada está em 20 V, temos $v(t) = -4$ V. O capacitor armazena carga de tal forma que a diferença de potencial entre as suas placas é de 24 V (a placa mais positiva está à esquerda). Quando a entrada está em -20 V, temos $v(t) = -20 - 24 = -44$ V. Então, a saída é uma onda quadrada com níveis -44 V e -4 V, e frequência igual à da entrada.

b) Quando a entrada está em -5 V, temos $v(t) = -3$ V. O capacitor armazena carga de tal forma que a diferença de potencial entre as suas placas é de 2 V (a placa mais positiva está à direita). Quando a entrada está em +5 V, temos $v(t) = 5 + 2 = 7$ V. Então, a saída é uma onda quadrada com níveis -3 V e $+7$ V, e frequência igual à da entrada.

Questão 5:

a) $$V_{\text{out}} = \begin{cases} -4V_{\text{in}}, \text{ se } |V_{\text{in}}| < 15/4 \text{ V} = 3.75 \text{ V} \\ +15 \text{ V, se } V_{\text{in}} < -3.75 \text{ V} \\ -15 \text{ V, se } V_{\text{in}} > 3.75 \text{ V} \end{cases}$$

0.5 ponto extra: $V_y = V_{\text{out}} - (100/1000)V_{\text{in}} = -4.1V_{\text{in}}$. E $|V_{\text{in}}| < 15$ V, então:

$$V_{\text{out}} = \begin{cases} -4V_{\text{in}}, \text{ se } |V_{\text{in}}| < 15/4.1 \text{ V} = 3.66 \text{ V} \\ +14.63 \text{ V, se } V_{\text{in}} < -3.66 \text{ V} \\ -14.63 \text{ V, se } V_{\text{in}} > 3.66 \text{ V} \end{cases}$$

b) Temos um gráfico $V_{\text{out}} \times V_{\text{in}}$, com histerese, definindo um comparador não-inversor do tipo Schmitt-trigger. A parte de "subida" do gráfico é:

$$V_{\text{out}} = \begin{cases} +15 \text{ V, se } V_{\text{in}} > 3.75 \text{ V} \\ \text{-15 V, se } V_{\text{in}} < 3.75 \text{ V} \end{cases}$$

E a parte de "descida" do gráfico é:

$$V_{\text{out}} = \begin{cases} +15 \text{ V, se } V_{\text{in}} > -3.75 \text{ V} \\ \text{-15 V, se } V_{\text{in}} < -3.75 \text{ V} \end{cases}$$