

DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 6 Giugno 2013

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Un transistor bipolare *npn* ($W_{met} = 3 \mu\text{m}$, $N_{Abase} = 10^{16}$, $N_{Dcollettore} = 2 \times 10^{15}$, $\mu_n = 0.12 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.045 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $S = 1 \text{ mm}^2$) è polarizzato con $V_{BE} = 0.55 \text{ V}$ e $V_{CE} = 5.55 \text{ V}$.

1) Determinare la lunghezza effettiva di base e la corrente di collettore, trascurando l'ampiezza delle regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta [4].

In queste condizioni di polarizzazione, è stata misurata una corrente di base pari a $I_B = 1 \text{ mA}$.

2) Determinare i parametri β_F , α_F e l'efficienza di emettitore γ . [4]

3) Determinare la frazione di corrente di emettitore I_{Ep} dovuta all'iniezione di lacune. [2]

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistor *n*-MOS (processo polysilicon gate, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $W = L = 2 \mu\text{m}$) è polarizzato con $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 3 \text{ V}$.

1) Determinare la corrente nel transistor e l'espressione (numerica) del potenziale in funzione di y nel canale (si utilizzi l'espressione di I_{DS} per y generico). [4]

2) Determinare l'espressione del campo elettrico ϵ_y in direzione del canale, e valutare ϵ_y in $y = L$ (si può procedere considerando il valore assoluto). [2]

3) Determinare l'espressione del campo elettrico perpendicolare al canale $\epsilon_x(y)$ nel silicio, all'interfaccia ossido-silicio (per $x = 0$, usare il teorema di Gauss), e calcolare ϵ_x per $y = L$. [4]

ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Descrivere il processo LOCOS con spacers per la fabbricazione di circuiti con transistori *n*-MOS. [4]

2) Determinare il minimo spessore di ossido di campo che garantisca l'isolamento dei dispositivi, sapendo che $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ e che la tensione di alimentazione massima del circuito è pari a 5 V . [3]

3) Sapendo che il secondo livello di interconnessioni (primo livello: poly) viene realizzato con un metallo con $\Phi_M = 3 \text{ V}$, determinare il minimo

spessore di ossido deposto per CVD (usare per l'ossido di campo lo spessore calcolato nel punto precedente).[3]

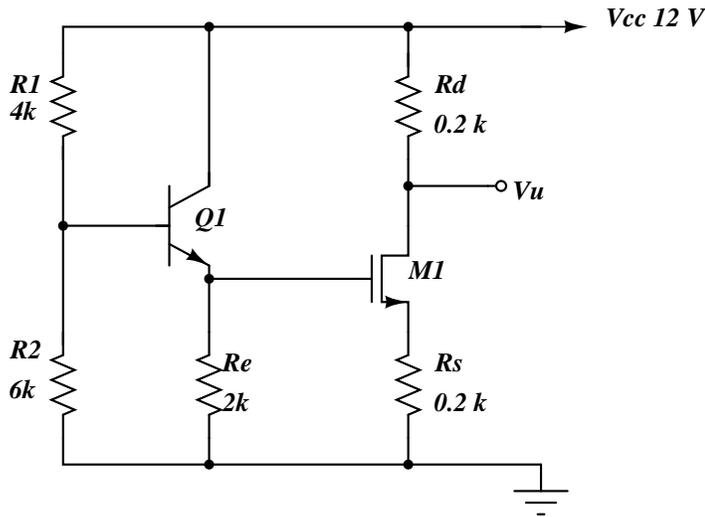


Figura 1: Circuito relativo all'esercizio 4 (DE)

ESERCIZIO 4 (DE)

Per l'amplificatore in figura, il transistoro Q_1 è un n^+pn con $\beta_F > 300$, il transistoro M_1 è un n -MOS (struttura MOS ideale), $t_{ox} = 30$ nm, $N_A = 10^{16}$ cm $^{-3}$, $\mu_n = 800$ cm 2 /Vs, $W = 100$ μ m, $L = 4$ μ m.

- 1) Calcolare il punto di riposo dei transistori. [4]
- 2) Calcolare i parametri dinamici (g_m ed r_d) del transistoro M_1 . SUGGERIMENTO: per r_d considerare $L_{eff} = L$ per $V_{DS} = V_{DSSat}$ e calcolare L_{eff} per $V_{DS} = 12$ V.[4]

3) Calcolare i parametri dinamici ibridi del transistor bipolare, sapendo che $r_{bb'} = 2 \text{ k}\Omega$, $h_{fe} \simeq 300$, $h_{re} = 0$. La resistenza di uscita è 10 volte quella del MOS.[2]

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Un transistoro bipolare *npn* ($W_{met} = 3 \mu\text{m}$, $N_{Abase} = 10^{16}$, $N_{Dcollettore} = 2 \times 10^{15}$, $\mu_n = 0.12 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.045 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $S = 1 \text{ mm}^2$) è polarizzato con $V_{BE} = 0.55 \text{ V}$ e $V_{CE} = 5.55 \text{ V}$.

1) Determinare la lunghezza effettiva di base e la corrente di collettore, trascurando l'ampiezza delle regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta [4].

In queste condizioni di polarizzazione, è stata misurata una corrente di base pari a $I_B = 1 \text{ mA}$.

2) Determinare i parametri β_F , α_F e l'efficienza di emettitore γ . [4]

3) Determinare la frazione di corrente di emettitore I_{Ep} dovuta all'iniezione di lacune. SUGGERIMENTO: approssimare $I_{En} \simeq I_C$. [2]

SOLUZIONE 1

1) Il transistoro è in zona attiva diretta, con la giunzione base-emettitore polarizzata in diretta e la giunzione base-collettore polarizzata in inversa. Calcoliamo la lunghezza effettiva della base, trascurando la regione di svuotamento emettitore-base (polarizzata in diretta). La regione di svuotamento collettore-base si calcola come:

$$V_{0CB} = V_T \ln \left(\frac{N_{Abase} N_{Dcollettore}}{n_i^2} \right) = 0.653 \text{ V} \quad (1)$$

$$V_{CB} = 5.0 \text{ V} \quad (2)$$

$$W_{CB} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_{Abase}} + \frac{1}{N_{Dcollettore}} \right) (V_0 + V_{CB})} = 2.11 \text{ } \mu\text{m} \quad (3)$$

Di questa regione di svuotamento, la frazione che cade in base è:

$$X_{BC} = W_{BC} \frac{N_{Dcollettore}}{N_{Dcollettore} + N_{Abase}} = 0.35 \text{ } \mu\text{m} \quad (4)$$

La lunghezza effettiva della base risulta dunque:

$$W_{eff} = 3 - 0.35 = 2.65 \text{ } \mu\text{m} \quad (5)$$

Per il calcolo della corrente di collettore, possiamo usare il modello a controllo di carica, oppure la derivata del profilo (calcolo in valore assoluto, corrente

di collettore uscente):

$$I_C = qSD_n \frac{\delta n_p(0)}{W_{eff}} \quad (6)$$

$$D_n = V_T \mu_n = 3.108 \times 10^{-3} \quad (7)$$

$$\delta n_p(0) \simeq n_{p0} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} = \frac{n_i^2}{N_{Abase}} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} = 3.75 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \quad (8)$$

$$I_C = 7.05 \text{ mA} \quad (9)$$

2) Da notare che la corrente di base misurata è molto più alta di quella che si avrebbe con efficienza di emettitore unitaria:

$$I_B = \frac{Q_B}{\tau_n} \quad (10)$$

$$I_B = \frac{qS n_{p0} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} W_{eff}}{2\tau_n} = 7.9 \text{ } \mu\text{A} \quad (11)$$

Avremo quindi, seguendo le definizioni dei vari parametri (in valore assoluto):

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} = 7 \quad (12)$$

$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} = 0.875 \quad (13)$$

Dal momento che $\alpha_F = \gamma \alpha_t$:

$$\alpha_t = \frac{1}{1 + \frac{W_{eff}^2}{2L_n^2}} \quad (14)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 55.75 \text{ } \mu\text{m} \quad (15)$$

$$\alpha_t = 0.99887 \quad (16)$$

e quindi l'efficienza di emettitore risulta:

$$\gamma = \frac{\alpha_F}{\alpha_t} = 0.875 \quad (17)$$

3) Dalla definizione di efficienza di emettitore:

$$\gamma = \frac{I_{En}}{I_{Ep} + I_{En}} \quad (18)$$

$$I_{Ep} = I_{En} \frac{1 - \gamma}{\gamma} = 1 \text{ mA} \quad (19)$$

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un transistoro n -MOS (processo polysilicon gate, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $W = L = 2 \text{ }\mu\text{m}$) è polarizzato con $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 3 \text{ V}$.

1) Determinare la corrente nel transistoro e l'espressione (numerica) del potenziale in funzione di y nel canale (si utilizzi l'espressione di I_{DS} per y generico).[4]

2) Determinare l'espressione del campo elettrico ϵ_y in direzione del canale, e valutare ϵ_y in $y = L$ (si può procedere considerando il valore assoluto).[3]

3) Determinare l'espressione del campo elettrico perpendicolare al canale $\epsilon_x(y)$ nel silicio, all'interfaccia ossido-silicio (per $x = 0$, usare il teorema di Gauss), e calcolare ϵ_x per $y = L$.[3]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo la tensione di soglia.

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2 \quad (20)$$

$$\psi_B = V_T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.347 \quad (21)$$

$$|\Phi_{MS}| = \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.887 \quad (22)$$

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - |\Phi_{MS}| = 0.227 \quad \text{V} \quad (23)$$

Il transistoro è polarizzato in zona triodo, poichè $V_{DS} < V_{DSSat} = V_{GS} - V_{TH} = 5 - 0.227 = 4.773 \text{ V}$. Avremo dunque:

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] = 0.9 \quad \text{mA} \quad (24)$$

Per il calcolo dell'andamento del potenziale lungo il canale possiamo usare una relazione analoga alla condizione di saturazione (vedi dispense, dove viene riportato il calcolo del tempo di transito nel transistoro MOS):

$$I_{DS} y = \mu_n C_{ox} W \left[(V_{GS} - V_{TH}) V(y) - \frac{V(y)^2}{2} \right] \quad (25)$$

$$0.9 \times 10^{-3}y = 8.78 \times 10^{-10}V(y) - 9.2 \times 10^{-11}V(y)^2 \quad (26)$$

$$V^2 - 0.488V + y = 0 \quad (27)$$

$$V^2 - 9.54V + 9.78 \times 10^6y = 0 \quad (28)$$

$$(29)$$

Questa equazione di secondo grado può essere risolta in $V(y)$, ottenendo:

$$V(y) = 4.785 - \sqrt{22.90 - 9.78 \times 10^6y} \quad (30)$$

È immediato verificare che, a meno di arrotondamenti, $V(L) = V_{DS} = 3 \text{ V}$.

2) Per il calcolo dell'espressione del campo elettrico lungo y basta fare la derivata del potenziale:

$$\epsilon_y(y) = -\frac{dV(y)}{dy} \quad (31)$$

$$\epsilon_y(y) = -\frac{9.78 \times 10^6}{2\sqrt{22.90 - 9.78 \times 10^6y}} \quad (32)$$

Da questa espressione è immediato calcolare $\epsilon_y(y = L) = 2.67 \text{ MV/m}$.

3) Il campo elettrico perpendicolare al canale $\epsilon_x(y)$, all'interfaccia ossido-silicio nel silicio, può essere calcolato conoscendo la carica $Q_s(y)$ nel silicio:

$$\epsilon_x(y) = \frac{Q_s(y)}{\epsilon_s} \quad (33)$$

$$V_{GS} = -\frac{Q_s(y)}{C_{ox}} + 2\psi_b + V(y) \quad (34)$$

$$Q_s(y) = C_{ox}(V_{GS} - 2\psi_b - V(y)) \quad (35)$$

$$(36)$$

oppure, alternativamente (viene la stessa cosa):

$$Q_s(y) = Q_n(y) + Q_w(y) = C_{ox}(V_{GS} - V_{TH} - V(y)) + \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_b} \quad (37)$$

Si ottiene:

$$Q_s(y) = 9.21 \times 10^{-3} - 1.15 \times 10^{-3}\sqrt{22.90 - 9.78 \times 10^6y} \quad (38)$$

$$\epsilon_x(y) = 87.44 \times 10^6 - 10.9 \times 10^6\sqrt{22.90 - 9.78 \times 10^6y} \quad (39)$$

Svolgendo i conti otteniamo $\epsilon_x(y = L) = 67.52 \text{ mV/m}$, maggiore del campo elettrico lungo y nello stesso punto.

ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Descrivere il processo LOCOS con spacers per la fabbricazione di circuiti con transistori n -MOS.[4]

2) Determinare il minimo spessore di ossido di campo che garantisca l'isolamento dei dispositivi, sapendo che $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ e che la tensione di alimentazione massima del circuito è pari a 5 V.[3]

3) Sapendo che il secondo livello di interconnessioni (primo livello: poly) viene realizzato con un metallo con $\Phi_M = 3 \text{ V}$, determinare il minimo spessore di ossido deposto per CVD (usare per l'ossido di campo lo spessore calcolato nel punto precedente).[3]

SOLUZIONE 3

1) Si rimanda alla dispensa per una descrizione dettagliata del processo LOCOS con spacers.

2) La tensione di soglia V_{TH} della struttura MOS parassita poly-ossido-silicio deve essere maggiore di 5 V.

$$\psi_B = V_T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.347 \quad (40)$$

$$|\Phi_{MS}| = \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.887 \quad (41)$$

$$C_{ox} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{V_{TH} - 2\psi_B + |\Phi_{MS}|} = 9.32 \times 10^{-5} \text{ F/m}^2 \quad (42)$$

Da questo segue:

$$t_{ox-minimo} = \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 370 \text{ nm} \quad (43)$$

3) Basta ripetere gli stessi conti, considerando una Φ_{MS} diversa:

$$\Phi_{MS} = 3 - \chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 1.987 \quad (44)$$

$$C_{ox} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{V_{TH} - 2\psi_B + \Phi_{MS}} = 7.69 \times 10^{-5} \text{ F/m}^2 \quad (45)$$

$$t_{ox-minimo-totale} = \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 449 \text{ nm} \quad (46)$$

da questo avremo che lo spessore di ossido CVD deve essere almeno $449 - 370 = 79$ nm.

ESERCIZIO 4 (DE)

Per l'amplificatore in figura, il transistorore Q_1 è un n^+pn con $\beta_F > 300$, il transistorore M_1 è un n -MOS (struttura MOS ideale), $t_{ox} = 30$ nm, $N_A = 10^{16}$ cm^{-3} , $\mu_n = 800$ cm^2/Vs , $W = 100$ μm , $L = 4$ μm .

1) Calcolare il punto di riposo dei transistorori. [4]

2) Calcolare i parametri dinamici (g_m ed r_d) del transistorore M_1 . SUGGERIMENTO: per r_d considerare $L_{eff} = L$ per $V_{DS} = V_{DSSat}$ e calcolare L_{eff} per $V_{DS} = 12$ V.[4]

3) Calcolare i parametri dinamici ibridi del transistorore bipolare, sapendo che $r_{bb} = 2$ k Ω , $h_{fe} \simeq 300$, $h_{re} = 0$. La resistenza di uscita è 10 volte quella del MOS.[2]

SOLUZIONE 4

1) Per la tensione di soglia (è quella del secondo esercizio, a parte la Φ_{MS}):

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \quad (47)$$

$$\psi_B = V_T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.347 \quad (48)$$

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B = 1.11 \text{ V} \quad (49)$$

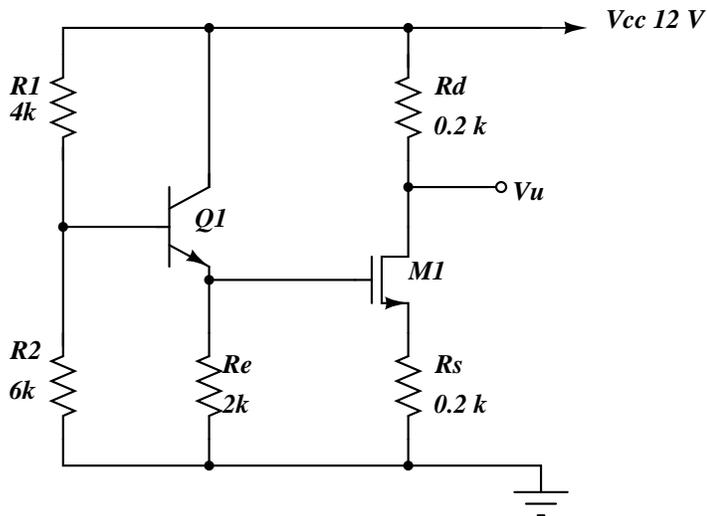


Figura 2: Circuito relativo all'esercizio 4 (DE)

Per il punto di riposo:

$$V_B = 7.2 \quad \text{V} \quad (50)$$

$$V_E = 6.5 \quad \text{V} \quad (51)$$

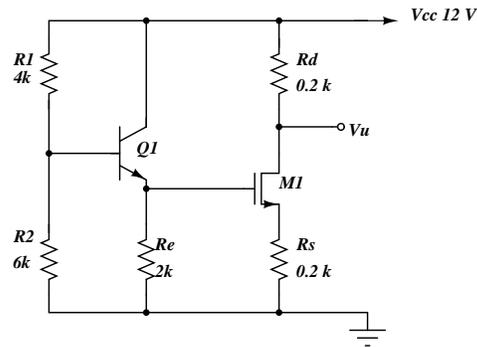
$$I_E = \frac{6.5}{2} = 3.25 \quad \text{mA} \quad (52)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_E = 5.5 \quad \text{V} \quad (53)$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta_F} = 10.8 \quad \mu\text{A} \quad (54)$$

Dall'ultima relazione $I_B \ll V_{CC}/R_1 + R_2 = 1 \text{ mA}$, quindi il partitore pesante verificato.

Per il transistor MOS, supponendo che sia in saturazione, possiamo scrivere



la relazione ($V_G = V_E$):

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_G - V_S - V_{TH})^2 \quad (55)$$

$$\frac{V_S}{R_S} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{2L} (V_G - V_S - V_{TH})^2 \quad (56)$$

$$V_S = 0.23 (5.39 - V_S)^2 \quad (57)$$

Da cui si ottiene come unica soluzione valida $V_S = 2.26$ V, con una corrente $I_{DS} = 11.3$ mA. Da questo si ricava $V_{DS} = V_{CC} - I_{DS} (R_d + R_s) = 7.48$ V $>$ $V_{GS} - V_{TH} = 3.13$ V. Avremo dunque per M_1 :

$$V_{GS} = 4.24 \quad \text{V}$$

$$I_{DS} = 11.28 \quad \text{mA}$$

$$V_{DS} = 7.48 \text{ V} > V_{GS} - V_{TH}$$

Per il bipolare:

$$I_C \simeq I_E = 3.25 \quad \text{mA}$$

$$\begin{aligned}
I_B &= \frac{I_C}{\beta_{min}} = 10.8 \quad \mu A \\
V_{BE} &\simeq V_\gamma = 0.7 \quad V \\
V_{CE} &= 5.5 \quad V
\end{aligned}$$

Entrambi i transistori sono quindi polarizzati correttamente.

2) La resistenza r_D del MOS è definita come:

$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}=const}$$

E quindi:

$$\frac{1}{r_d} = \frac{I_{DS2} - I_{DS1}}{V_{DS2} - V_{DS1}}$$

Per semplicità scegliamo $V_{DS1} = V_{DSSat} = V_{GS} - V_{TH} = 3.13$ V, per cui la corrente è pari a quella calcolata sopra: $I_{DS} = 11.28$ mA già calcolata sopra con $L_{eff} = L = 4$ μm). Per V_{DS2} scegliamo $V_{DS2} = 12$ V come suggerito dal testo.

$$V_{0DSubs} = V_T \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) = 0.873 \quad V \quad (58)$$

$$V_{DPP} = V_{DS} - V_{PS} = V_{DS} - V_{DSSat} = 12 - 3.13 = 8.87 \quad V \quad (59)$$

$$W_{DPP} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} (V_{0DSubs} + V_{DPP})} = 1.13 \quad \mu\text{m} \quad (60)$$

Da questo possiamo ricavare la lunghezza effettiva del canale e la corrente I_{DS} per $V_{DS} = 12$ V:

$$L_{eff} = 4 - 1.13 = 2.87 \quad \mu\text{m} \quad (61)$$

$$I_{DS}(V_{DS} = 12) = \mu_n C_{ox} \frac{W}{2L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 15.73 \quad \text{mA} \quad (62)$$

$$(63)$$

E quindi la resistenza differenziale di uscita risulta:

$$\frac{1}{r_d} = \frac{15.73 \times 10^{-3} - 11.28 \times 10^{-3}}{12 - 3.13} = 5 \times 10^{-4} \quad (64)$$

$$r_d = 2000 \quad \text{k}\Omega \quad (65)$$

Il guadagno g_m risulta:

$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) = 1.80^{-5} \quad (66)$$

3) Avremo:

$$r_{b'e} = \frac{V_T}{I_B} = 2398 \quad \Omega \quad (67)$$

$$g_m = \frac{h_{fe}}{r_{b'e}} = 0.125 \quad (68)$$

$$r_d = 20 \quad \text{k}\Omega \quad (69)$$