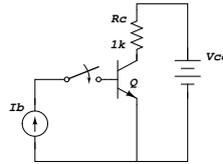


## DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 27 Giugno 2013

**ESERCIZIO 1 (DE,DTE)** Il transistoro bipolare della figura è un  $n^+pn$  con  $W_{met} = 3 \mu\text{m}$ ,  $N_{Abase} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_{Dcollettore} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $S = 1 \text{ mm}^2$ .  $V_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $I_B = 60 \mu\text{A}$ .



- 1) Con tasto aperto, si calcoli  $V_{BE}$  e la corrente  $I_C$  (si trascuri la caduta di tensione su  $R_C$ ).[2]
- 2) Con tasto chiuso, si approssimi la corrente  $I_C$  con  $V_{CC}/R_C$ . Dopo aver dimostrato che il transistoro è in saturazione, determinare le tensioni ai terminali  $V_{BE}$  e  $V_{BC}$ . Si considerino trascurabili le regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta.[5]
- 3) Si scriva l'espressione del transitorio di corrente  $i_C(t)$  alla chiusura del tasto.[3]

**ESERCIZIO 2 (DE,DTE)** Un transistoro  $n$ -MOS (processo polysilicon gate,  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $t_{ox} = 30 \text{ nm}$ ,  $W = L = 5 \mu\text{m}$ ) viene polarizzato in maniera tale che, per piccoli valori di  $V_{DS}$ , si comporti come una resistenza di  $2 \text{ k}\Omega$ .

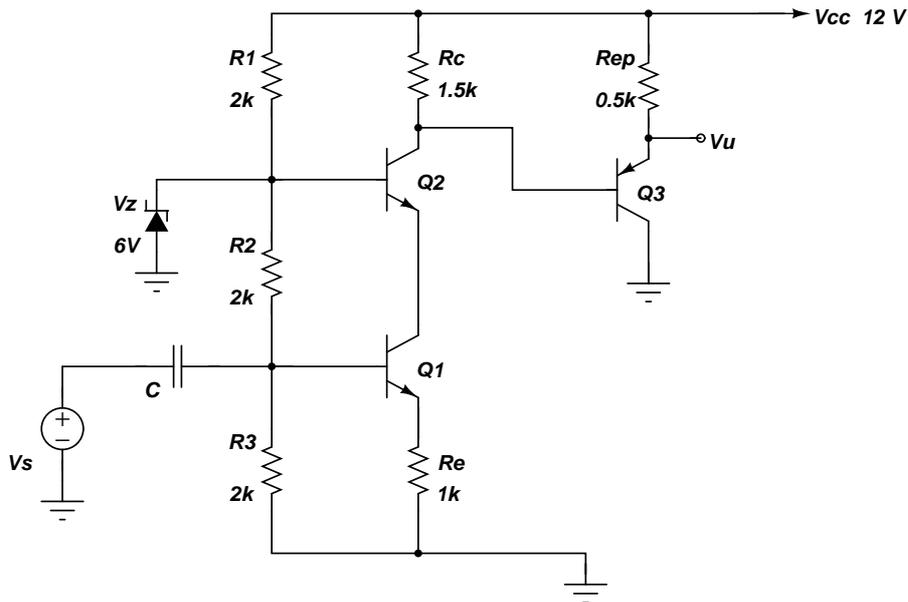
- 1) Determinare la tensione di polarizzazione  $V_{GS}$ . [3]
- 2) Per valori di  $V_{DS}$  molto piccoli (trascurabili rispetto a  $V_{GS}$ ) si determini la capacità differenziale  $C_{GS}$  e l'espressione del tempo di transito nel canale  $\tau_t$ . [4]
- 3) Nelle applicazioni circuitali è richiesta una precisione del valore di resistenza pari ad almeno il 10 % (rispetto al valore nominale  $2 \text{ k}\Omega$ ). Determinare il massimo valore di  $V_{DS}$  che può essere applicato al transistoro per poterlo considerare come un resistore. (SUGGERIMENTO: calcolare la conduttanza differenziale e confrontarla con la resistenza nominale aumentata del 10%) [3]

## ESERCIZIO 3 (DTE)

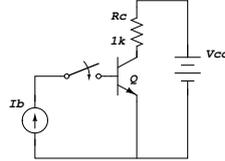
- 1) Descrivere il processo SBC, disegnando le maschere per la realizzazione di un transistor bipolare  $n^+pn$ . [3]
- 2) Si illustri una possibile soluzione per la realizzazione di transistori  $pn$  mediante lo stesso processo. [3]
- 3) Disegnare, con numeri indicativi, il diagramma del drogaggio netto dalla base allo strato sepolto. [4]

**ESERCIZIO 4 (DE)** Per l'amplificatore in figura, i transistori  $Q_1$  e  $Q_2$  sono  $n^+pn$  con  $W_{met} = 3 \mu\text{m}$ ,  $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$ . Il transistor  $Q_3$  è un  $p^+np$  con  $\beta_{f\text{minimo}} = 300$ . Il diodo zener è ideale ( $V_Z = 6 \text{ V}$ ).

- 1) Determinare il  $\beta_{f\text{minimo}}$  dei transistori  $Q_1$  e  $Q_2$ . [2]
- 2) Calcolare il punto di riposo dei transistori, verificando la corretta polarizzazione del diodo zener. [5]
- 3) Disegnare il circuito equivalente per le variazioni, alle frequenze per cui  $C$  è un corto-circuito. [3]



**ESERCIZIO 1 (DE,DTE)** Il transistoro bipolare della figura è un  $n^+pn$  con  $W_{met} = 3 \mu\text{m}$ ,  $N_{Abase} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_{Dcollettore} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $S = 1 \text{ mm}^2$ .  $V_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  $I_B = 60 \mu\text{A}$ .



1) Con tasto aperto, si calcoli  $V_{BE}$  e la corrente  $I_C$  (si trascuri la caduta di tensione su  $R_C$ ).[2]

2) Con tasto chiuso, si approssimi la corrente  $I_C$  con  $V_{CC}/R_C$ . Dopo aver dimostrato che il transistoro è in saturazione, determinare le tensioni ai terminali  $V_{BE}$  e  $V_{BC}$ . Si considerino trascurabili le regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta.[5]

3) Si scriva l'espressione del transitorio di corrente  $i_C(t)$  alla chiusura del tasto.[3]

### SOLUZIONE 1

1) Con tasto aperto, la corrente di base  $I_B = 0$ , da cui segue  $Q_B = 0$   
 $\delta n(0) = n_{p0} = n_{p0} \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$ ,  $V = V_T \ln(2) = 0.018 \text{ V}$ .

La corrente  $I_C$  si può scrivere come:

$$I_C = qSD_n \frac{2\delta n(0)}{W_{eff}} \quad (1)$$

Trascurando la caduta su  $R_C$  avremo che  $V_{CB} = V_{CC} - V_{BE} \simeq V_{CC}$ . Quindi:

$$V_{0CB} = V_T \ln \left( \frac{N_{Abase} N_{Dcollettore}}{n_i^2} \right) = 0.694 \text{ V}$$

$$V_{CB} = 12.0 \text{ V}$$

$$W_{CB} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_{Abase}} + \frac{1}{N_{Dcollettore}} \right) (V_0 + V_{CB})} = 1.83 \mu\text{m}$$

$$X_{CB} = \frac{W_{CB}}{2} = 0.915 \mu\text{m}$$

$$\begin{aligned}
W_{eff} &= 3 - 0.915 = 2.085 \quad \mu\text{m} \\
D_n &= V_T \mu_n = 2.072 \times 10^{-3} \\
I_C &= 7.16 \quad \text{pA}
\end{aligned}$$

2) Come suggerito dal testo, la corrente si puo' approssimare con  $I_C = 12/1 \text{ k} = 12 \text{ mA}$ , imposta dal circuito. Calcoliamo il  $\beta_f$ , trascurando le regioni di svuotamento come suggerito dal testo:

$$\begin{aligned}
L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 45.52 \quad \mu\text{m} \\
\alpha_f &= \frac{1}{1 + \frac{W_{met}^2}{2L_n^2}} = 0.9978329 \\
\beta_f &= 460
\end{aligned}$$

Quindi la corrente  $I_B$  necessaria affinché il transistor lavori in zona attiva diretta sarebbe  $I_B = I_C / \beta_f = 26 \mu\text{A}$ . Poichè il transistor è polarizzato con  $60 \mu\text{A}$  risulta in saturazione.

Il profilo dell'eccesso di portatori minoritari in base è trapezoidale. Conoscendo la corrente  $I_C$  e la carica immagazzinata in base  $Q_B = \tau_n I_B$  possiamo scrivere le seguenti relazioni ( $W = W_{met}$ ):

$$\begin{aligned}
I_C &= qSD_n \frac{\delta_n(0) - \delta_n(W)}{W} \\
Q_B &= qS \frac{\delta_n(0) + \delta_n(w)}{2} W
\end{aligned}$$

Questo è un sistema di due equazioni in due incognite che permette di calcolare gli eccessi dei portatori minoritari  $\delta_n(0)$  e  $\delta_n(W)$  agli estremi della regione di svuotamento, e quindi le tensioni  $V_{BE}$  e  $V_{BC}$ :

$$\begin{aligned}
\delta_n(0) &= 1.73 \times 10^{20} \quad \text{m}^{-3} \\
\delta_n(w) &= 7.66 \times 10^{19} \quad \text{m}^{-3} \\
V_{BE} &= V_T \ln \left( \frac{\delta_n(0)}{\frac{n_i^2}{N_{Abase}}} \right) = 0.589 \quad \text{V} \\
V_{BC} &= V_T \ln \left( \frac{\delta_n(W)}{\frac{n_i^2}{N_{Abase}}} \right) = 0.568 \quad \text{V}
\end{aligned}$$

3) All'accensione del tasto, avremo che, finchè  $i_C(t) < I_C = 12 \text{ mA}$ , la carica immagazzinata in base aumenta esponenzialmente, tendendo al valore di regime  $Q_B = I_B \tau_n$ , e conseguentemente la corrente di collettore cresce esponenzialmente. Per tempi  $t$  tali che  $i_C(t) < 12 \text{ mA}$ :

$$\begin{aligned} I_C(t) &= \frac{Q_B(t)}{\tau_t} \\ Q_B(t) &= I_B \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}\right) \\ \tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} = 2.17 \times 10^{-9} \quad \text{s} \end{aligned}$$

Calcoliamo il tempo  $t^*$  per cui il transistor raggiunge la saturazione, cioè  $i_C(t^*) = I_C = 12 \text{ mA}$ :

$$\begin{aligned} \frac{I_B \tau_n}{\tau_t} \left(1 - e^{-\frac{t^*}{\tau_n}}\right) &= I_C \\ 1 - e^{-\frac{t^*}{\tau_n}} &= 0.434 \\ t^* &= 0.57 \quad \mu\text{s} \end{aligned}$$

Per  $t > t^*$  il transistor è in saturazione, la corrente di collettore rimane costante e pari a 12 mA, mentre la carica in base raggiunge il suo valore di regime.

**ESERCIZIO 2 (DE,DTE)** Un transistor  $n$ -MOS (processo polysilicon gate,  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $t_{ox} = 30 \text{ nm}$ ,  $W = L = 5 \text{ }\mu\text{m}$ ) viene polarizzato in maniera tale che, per piccoli valori di  $V_{DS}$ , si comporti come una resistenza di 2 k $\Omega$ .

- 1) Determinare la tensione di polarizzazione  $V_{GS}$ . [3]
- 2) Per valori di  $V_{DS}$  molto piccoli (trascurabili rispetto a  $V_{GS}$ ) si determini la capacità differenziale  $C_{GS}$  e l'espressione del tempo di transito nel canale  $\tau_t$ . [4]
- 3) Nelle applicazioni circuitali è richiesta una precisione del valore di resistenza pari ad almeno il 10 % (rispetto al valore nominale 2 k $\Omega$ ). Determinare il massimo valore di  $V_{DS}$  che può essere applicato al transistor per poterlo

considerare come un resistore. (SUGGERIMENTO: calcolare la conduttanza differenziale e confrontarla con la resistenza nominale aumentata del 10%)[3]

## SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo la tensione di soglia.

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

$$\psi_B = V_T \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) = 0.347 \quad (3)$$

$$|\Phi_{MS}| = \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.887 \quad (4)$$

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - |\Phi_{MS}| = 0.227 \quad \text{V} \quad (5)$$

La resistenza di canale per piccoli valori di  $V_{DS}$  risulta:

$$R = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})} \quad (6)$$

da cui è immediato ricavare ( $R = 2 \text{ k}\Omega$ )  $V_{GS} = 5.66 \text{ V}$ .

2) L'espressione generale della carica nel canale è:

$$Q_n(y) = C_{ox} (V_{GS} - V_{TH} - V(y)) \quad (7)$$

Per piccoli valori di  $V_{DS}$  avremo  $V(y) < V_{DS} \ll V_{GS}$  per cui semplicemente:

$$\begin{aligned} Q_n &= W L C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) \\ C_{GS} &= \frac{\partial Q_n}{\partial V_{GS}} = W L C_{ox} = 2.875 \times 10^{-14} \quad \text{F} \end{aligned}$$

Per il calcolo del tempo di transito nel canale, che dipende da  $V_{DS}$ , si possono percorrere diverse strade. Ad esempio:

$$I_{DS} = \frac{Q_n}{\tau_t}$$

$$\begin{aligned}\tau_t &= \frac{Q_n}{I_{DS}} \\ \tau_t &= \frac{WLC_{ox}(V_{GS} - V_{TH})}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS}} \\ \tau_t &= \frac{L^2}{\mu_n V_{DS}}\end{aligned}$$

3) L'espressione generale della corrente  $I_{DS}$  per  $V_{DS} < V_{DSsat}$  è:

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (8)$$

Questa espressione è composta da un contributo lineare  $(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS}$  e un contributo quadratico  $\frac{V_{DS}^2}{2}$  che fa deviare il comportamento del transistor rispetto alla resistenza. Calcoliamo la conduttanza differenziale e determiniamo  $V_{DS}$  per cui si ha  $R_{differenziale} = \frac{1}{G_{differenziale}} = 2200 \text{ k}\Omega$ :

$$\begin{aligned}\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{TH}) - V_{DS}] \\ R_{differenziale} &= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{TH}) - V_{DS}]} = 2200\end{aligned}$$

Svolgendo i conti, si ottiene  $V_{DS} = 0.49 \text{ V}$ .

### ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Descrivere il processo SBC, disegnando le maschere per la realizzazione di un transistor bipolare  $n^+pn$ . [3]

2) Si illustri una possibile soluzione per la realizzazione di transistori  $pnp$  mediante lo stesso processo. [3]

3) Disegnare, con numeri indicativi, il diagramma del drogaggio netto dalla base allo strato sepolto. [4]

### SOLUZIONE 3

1) Si rimanda alla dispensa per una descrizione dettagliata del processo SBC.

2) Una possibile soluzione è quella di realizzare i transistori  $npn$  laterali. Due diffusioni di base (per il  $n^+pn$ ) vengono fatte molto vicine per realizzare l'emettitore ed il collettore. La base del  $npn$  è lo spazio  $n$  tra le due diffusioni.

3) Si parte dall'emettitore, drogato  $10^{18}/10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , alla base con drogaggio dell'ordine di  $10^{16}$ , al collettore con drogaggio  $10^{14}/10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Si ritorna poi ad un drogaggio dell'ordine di  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  nello strato sepolto.

#### ESERCIZIO 4 (DTE)

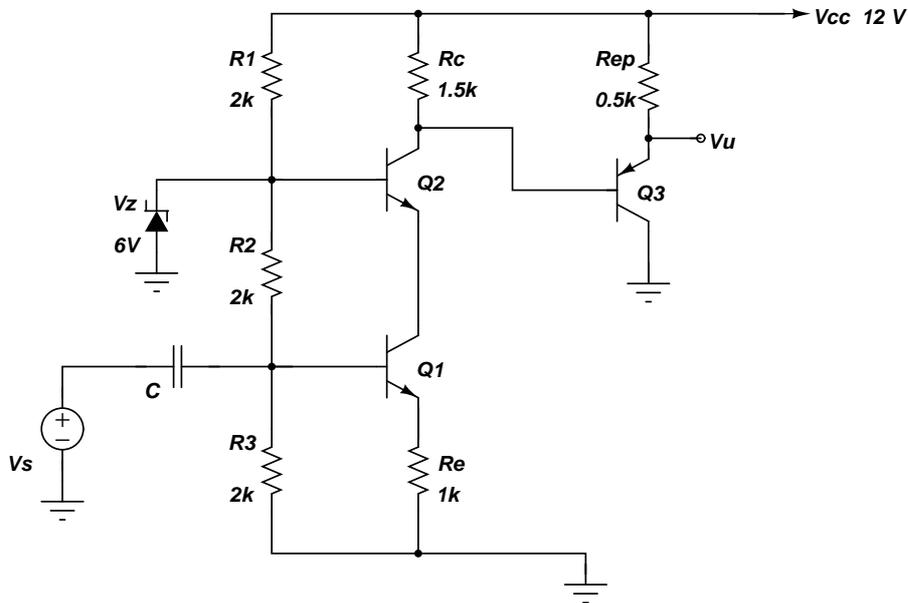
Per l'amplificatore in figura, i transistori  $Q_1$  e  $Q_2$  sono  $n^+pn$  con  $W_{met} = 3 \mu\text{m}$ ,  $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$ . Il transistoro  $Q_3$  è un  $p^+np$  con  $\beta_{fminimo} = 300$ . Il diodo zener è ideale ( $V_Z = 6 \text{ V}$ ).

- 1) Determinare il  $\beta_{fminimo}$  dei transistori  $Q_1$  e  $Q_2$ . [2]
- 2) Calcolare il punto di riposo dei transistori, verificando la corretta polarizzazione del diodo zener.[5]
- 3) Disegnare il circuito equivalente per le variazioni, alle frequenze per cui  $C$  è un corto-circuito.[3]

#### SOLUZIONE 4

1) Il  $\beta_{fminimo}$  garantito si può calcolare con  $W_{metallurgica}$ : la  $W_{effettiva}$  sarà sicuramente più piccola e di conseguenza il guadagno sarà maggiore.

$$\begin{aligned}D_n &= V_T \mu_n = 2.59 \times 10^{-3} \\L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \quad \mu\text{m} \\ \alpha_f &= \frac{1}{1 + \frac{W_{met}^2}{2L_n^2}} = 0.998265 \\ \beta_f &= 575\end{aligned}$$



2) La corrente che scorre in  $R_1$  risulta  $\frac{12-6}{2} = 3$  mA. Assumendo il partitore pesante, la corrente che scorre in  $R_2$  ed  $R_3$  risulta  $\frac{6}{4=1.5}$  mA, quindi la corrente nel diodo zener risulta 1.5 mA, sufficiente a polarizzarlo correttamente. La tensione di base  $V_{B1} = 3$  V, mentre  $V_{B2} = 6$  V. Da ciò segue  $V_{E1} = 2.3$  V,  $I_{E1} \simeq I_{C1} = I_{E2} \simeq I_{E2} = 2.3$  mA. Segue ancora  $V_{C2} = V_{B3} = 12 - 3.45 = 8.55$  V,  $V_{E3} = 9.25$  V,  $I_{E3} = 5.5$  mA. Il partitore pesante per  $Q_1$  è verificato, poichè  $I_{B1} = I_{C1} \beta_{fminimo} = 4 \mu\text{A}$ , mentre  $\ll I_{R2-R3} = 1.5$  mA, e così per la corrente di base di  $Q_2$ ,  $I_{B2} = 4 \mu\text{A} \ll I_{R1} = 3$  mA. Anche la corrente di base di  $Q_3$ ,  $I_{B3} = 18 \mu\text{A} \ll I_{C2}$ . Tutti i transistori lavorano in zona attiva diretta.

$$\begin{aligned}
 I_{C1} &\simeq I_{E1} = 2.3 \quad \text{mA} \\
 I_{B1} &= \frac{I_{C1}}{\beta_{fmin}} = 4 \quad \mu\text{A} \\
 V_{BE1} &\simeq V_{\gamma} = 0.7 \quad \text{V} \\
 V_{CE1} &= V_{E2} - V_{E1} = 5.3 - 2.3 = 3 \quad \text{V}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{C2} &\simeq I_{E2} = 2.3 \quad \text{mA} \\
 I_{B2} &= \frac{I_{C1}}{\beta_{fmin}} = 4 \quad \mu\text{A}
 \end{aligned}$$

$$V_{BE2} \simeq V_{\gamma} = 0.7 \quad \text{V}$$

$$V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = 3.25 \quad \text{V}$$

$$I_{C3} \simeq I_{E3} = 5.5 \quad \text{mA}$$

$$I_{B3} = \frac{I_{C3}}{\beta_{fmin}} = 18 \quad \mu\text{A}$$

$$V_{BE3} \simeq V_{\gamma} = 0.7 \quad \text{V}$$

$$V_{CE3} = V_{E3} = 9.25 \quad \text{V}$$

3) Il circuito equivalente risulta:

