

DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 29 Giugno 2015

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Un transistoro (emettitore n^+) è caratterizzato da $N_{Abase} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, lunghezza metallurgica $W_{met} = 4 \mu\text{m}$, $\tau_n = 1 \mu\text{s}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $S = 1\text{mm}^2$. Il transistoro è polarizzato in base con un generatore di corrente $I_B = 10 \mu\text{A}$. Trascurare l'ampiezza delle regioni di svuotamento per le giunzioni polarizzate in diretta.

- 1) Per $N_{DCollettore} = 5 \times 10^{15}$ e $V_{BC} = -5 \text{ V}$ determinare I_C e V_{CE} . [3]
- 2) Per $N_{DCollettore} = 5 \times 10^{15}$ determinare $h_{oe} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \simeq \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}$ (suggerimento: ripetere il conto del punto precedente per $V_{BC} = -10 \text{ V}$). [4]
- 3) Se il collettore è fortemente drogato (n^+), come si modifica h_{oe} ? Determinare il nuovo valore e confrontarlo con quello calcolato nei punti precedenti (si possono fare delle approssimazioni, ad esempio considerando V_{BE} costante al variare di V_{CE}). [3]

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un condensatore n -MOS ($N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$) viene fabbricato con un gate di oro ($\phi_M = 5.1 \text{ V}$). La tensione di soglia è risultata pari a 2 V .

- 1) Determinare la carica nell'ossido (negativa), all'interfaccia ossido-silicio. [3]
- 2) Si impone una tensione $V_{GBulk} = V_{TH}/2 = 1 \text{ V}$. Determinare la caduta di tensione nel silicio e la concentrazione di portatori minoritari all'interfaccia silicio-ossido n_s . [4]
- 3) Il condensatore MOS viene impiegato per realizzare un transistoro MOS, polarizzato con $V_{DS} = 0 \text{ V}$ e $V_{SBulk} = 2 \text{ V}$. Per $V_{GS} = -1 \text{ V}$ determinare la caduta di tensione nel silicio a metà canale e la concentrazione di elettroni all'interfaccia silicio-ossido. [3]

ESERCIZIO 3 (DTE) 1) Descrivere il processo di fabbricazione LOCOS con LDD. [5]

2) Disegnare le maschere per la fabbricazione del circuito in figura (transistore MOS con resistenza in serie al Source). [5]



ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura, i transistori bipolari Q_1 e Q_2 hanno $\beta_{f \text{ min}} = 300$ (nominale).

1) Durante la fabbricazione del transistor Q_2 si è verificato un problema nella fase di drogaggio dell'emettitore e il β_f è risultato pari a 20, invece che del valore nominale desiderato di 300. Determinare l'efficienza di emettitore.[3]

2) Determinare le correnti, le tensioni e il punto di riposo dei transistori. Che effetti ha il β_f ridotto di Q_2 sul punto di riposo? Giustificare la risposta.[5]

3) Determinare il valore minimo di V_Z per cui tutti i transistori risultano correttamente polarizzati.[2]

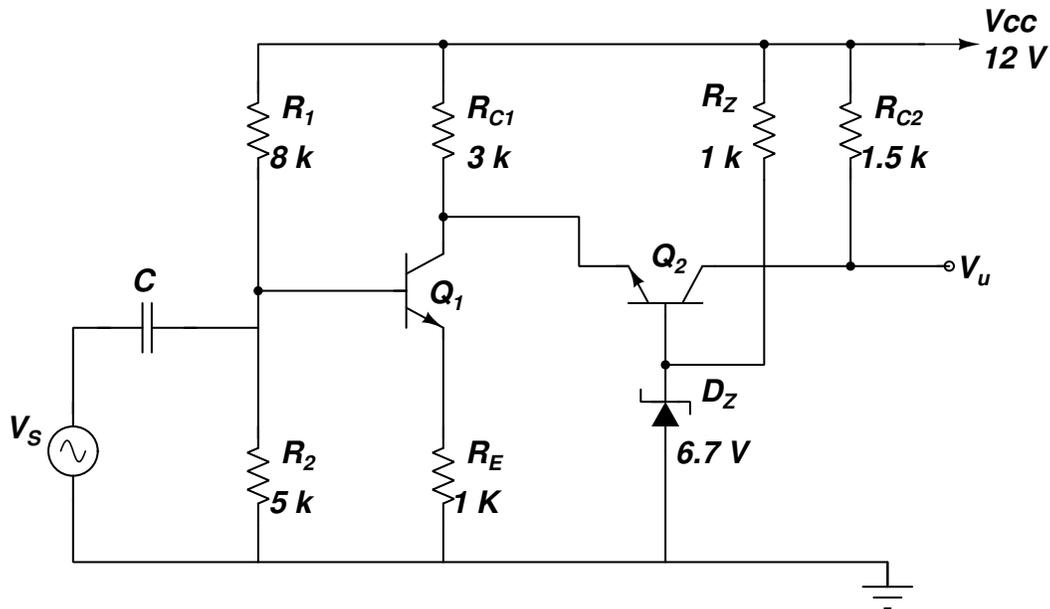


Figura 1: circuito

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) Un transistor (emettitore n^+) è caratterizzato da $N_{Abase} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, lunghezza metallurgica $W_{met} = 4 \mu\text{m}$, $\tau_n = 1 \mu\text{s}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $S = 1 \text{ mm}^2$. Il transistor è polarizzato in base con un

generatore di corrente $I_B = 10 \mu\text{A}$. Trascurare l'ampiezza delle regioni di svuotamento per le giunzioni polarizzate in diretta.

1) Per $N_{DCollettore} = 5 \times 10^{15}$ e $V_{BC} = -5 \text{ V}$ determinare I_C e V_{CE} . [3]

2) Per $N_{DCollettore} = 5 \times 10^{15}$ determinare $h_{oe} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \simeq \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}$ (suggerimento: ripetere il conto del punto precedente per $V_{BC} = -10 \text{ V}$). [4]

3) Se il collettore è fortemente drogato (n^+), come si modifica h_{oe} ? Determinare il nuovo valore e confrontarlo con quello calcolato nei punti precedenti (si possono fare delle approssimazioni, ad esempio considerando V_{BE} costante al variare di V_{CE}). [3]

SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo la lunghezza effettiva di base, trascurando la regione di svuotamento emettitore-base:

$$V_{0CB} = V_T \ln \left(\frac{N_{ABase} N_{DCollettore}}{n_i^2} \right) = 0.659 \quad \text{V}$$

$$X_{CB} = \frac{W_{CB}}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_{ABase}} + \frac{1}{N_{DCollettore}} \right) (V_{0CB} + V_{CB})} = 0.863 \quad \mu\text{m}$$

$$W_{eff} = 4 - 0.863 = 3.14 \quad \mu\text{m}$$

Possiamo calcolare la corrente di collettore con il modello a controllo di carica:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = 2.59 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2/\text{s}$$

$$\tau_t = \frac{W_{eff}^2}{2D_n} = 1.9 \times 10^{-9} \quad \text{s}$$

$$I_C = \frac{Q_B}{\tau_t} = I_B \frac{\tau_n}{\tau_t} = I_B \beta_f = 5.25 \quad \text{mA}$$

Per calcolare V_{CE} bisogna ricavare la tensione emettitore-base V_{BE} , che possiamo calcolare conoscendo la carica in base $Q_B = I_B \tau_n$ e la lunghezza effettiva di base:

$$Q_B = I_B \tau_n = \frac{1}{2} q S \delta n(0) W_{eff}$$

$$\delta n(0) = n_0 \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \simeq \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$V_{BE} = V_T \ln \frac{2I_B \tau_n}{q S \frac{n_i^2}{N_A} W_{eff}} = 0.53 \quad \text{V}$$

Quindi abbiamo $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} = 5.53 \text{ V}$.

2) Basta ripetere il conto per $V_{CB} = 10 \text{ V}$.

$$\begin{aligned} X_{CB} &= \frac{W_{CB}}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_{A\text{Base}}} + \frac{1}{N_{D\text{Collettore}}} \right) (V_{OCB} + V_{CB})} = 1.18 \quad \mu\text{m} \\ W_{eff} &= 4 - 1.18 = 2.82 \quad \mu\text{m} \\ \tau_t &= \frac{W_{eff}^2}{2D_n} = 1.53 \times 10^{-9} \quad \text{s} \\ I_C &= \frac{Q_B}{\tau_t} = I_B \frac{\tau_n}{\tau_t} = I_B \beta_f = 6.51 \quad \text{mA} \end{aligned}$$

La tensione di base viene modificata molto poco, e quindi si puo' considerare costante. Con questa approssimazione avremo $V_{CE2} - V_{CE1} \simeq V_{CB2} - V_{CB1} = 5 \text{ V}$. Quindi avremo:

$$h_{oe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} = 2.57 \times 10^{-4} \quad \Omega^{-1} \quad (1)$$

Quindi la resistenza $r_0 = 1/h_{oe} = 3888 \Omega$. Per confermare l'approssimazione fatta, valutiamo la V_{BE} per $V_{CB} = 10 \text{ V}$:

$$V_{BE} = V_T \ln \frac{2I_B \tau_n}{q S \frac{n_i^2}{N_A} W_{eff}} = 0.531 \quad \text{V} \quad (2)$$

3) Se il collettore è fortemente drogato, la regione di svuotamento si estende tutta nella base e quindi l'effetto di modulazione della base è piu' importante e la resistenza di uscita $1/h_{oe}$ è piu' bassa. Ripetiamo i conti (considerando $V_{CE2} - V_{CE1} \simeq V_{CB2} - V_{CB1} = 5 \text{ V}$). Per $V_{CB} = 5 \text{ V}$:

$$\begin{aligned} V_{OCB} &= V_T \ln \left(\frac{N_{A\text{Base}} N_{D\text{Collettore}}}{n_i^2} \right) = 0.855 \quad \text{V} \\ X_{CB} &= W_{CB} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q N_{A\text{Base}}}} (V_{OCB} + V_{CB}) = 1.24 \quad \mu\text{m} \\ W_{eff} &= 4 - 1.24 = 2.76 \quad \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\tau_t = \frac{W_{eff}^2}{2D_n} = 1.47 \times 10^{-9} \quad \text{s}$$

$$I_C = \frac{Q_B}{\tau_t} = I_B \frac{\tau_n}{\tau_t} = I_B \beta_f = 6.8 \quad \text{mA}$$

Per $V_{CB} = 10 \text{ V}$:

$$X_{CB} = W_{CB} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_{ABase}} (V_{OCB} + V_{CB})} = 1.69 \quad \mu\text{m}$$

$$W_{eff} = 4 - 1.69 = 2.31 \quad \mu\text{m}$$

$$\tau_t = \frac{W_{eff}^2}{2D_n} = 1.03 \times 10^{-9} \quad \text{s}$$

$$I_C = \frac{Q_B}{\tau_t} = I_B \frac{\tau_n}{\tau_t} = I_B \beta_f = 9.7 \quad \text{mA}$$

Quindi avremo $h_{oe} = 5.8 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ e $r_0 = 1/h_{oe} = 1720 \Omega$.

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un condensatore n -MOS ($N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$) viene fabbricato con un gate di oro ($\phi_M = 5.1 \text{ V}$). La tensione di soglia è risultata pari a 2 V .

1) Determinare la carica nell'ossido (negativa), all'interfaccia ossido-silicio.[3]

2) Si impone una tensione $V_{GBulk} = V_{TH}/2 = 1 \text{ V}$. Determinare la caduta di tensione nel silicio e la concentrazione di portatori minoritari all'interfaccia silicio-ossido n_s . [4]

3) Il condensatore MOS viene impiegato per realizzare un transistor MOS ($L=W=10 \mu\text{m}$), polarizzato con $V_{DS} = 0 \text{ V}$ e $V_{SBulk} = 2 \text{ V}$. Per $V_{GS} = -1 \text{ V}$ determinare la caduta di tensione nel silicio a metà canale e la concentrazione di elettroni all'interfaccia silicio-ossido.[3]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo innanzitutto i vari parametri e la Φ_{MS} .

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

$$\psi_B = V_T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = 0.329 \quad \text{V}$$

$$\begin{aligned}\Phi_S &= \chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 4.969 \quad \text{V} \\ \Phi_{MS} &= 5.1 - 4.969 = 0.131 \quad \text{V}\end{aligned}$$

Dall'espressione della tensione di soglia possiamo ricavare la carica nell'ossido.

$$\begin{aligned}V_{TH} = 2V &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \phi_{MS} \\ -\frac{Q_{ox}}{C_{ox}} &= V_{TH} - \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} - 2\psi_B - \phi_{MS} = 0.92 \quad \text{V} \\ Q_{ox} &= -1.059 \times 10^{-3} \quad \text{C/m}^2\end{aligned}$$

2) Per $V_{GS} = V_{TH}/2$ siamo in regime di svuotamento, dove i maggioritari sono respinti e i minoritari sono ancora molto pochi. Avremo dunque $Q_{Si} = Q_n + Q_W \simeq Q_W$ e possiamo scrivere l'equazione seguente:

$$\frac{V_{TH}}{2} = 1 = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \phi_{MS} \quad (3)$$

Sostituendo i numeri:

$$1 = 0.357\sqrt{V_S} + V_S + 0.92 + 0.131 \quad (4)$$

che ha come soluzione accettabile $V_S = 0.012$ V. Avremo dunque:

$$n_s = n_0 e^{\frac{V_S}{V_T}} = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V_S}{V_T}} = 7.15 \times 10^{10} \quad \text{m}^{-3} \quad (5)$$

3) In questo caso avremo che $V_{GS} = V_{GBulk} - V_{SBulk}$ e quindi $V_{GBulk} = V_{GS} + V_{SBulk} = -1 + 2 = 1$ V. La polarizzazione del Gate rispetto al substrato è quindi la stessa rispetto a quella del punto precedente. A metà canale, per $L/2 = 5 \mu\text{m}$, siamo sicuramente lontani dalle regioni di svuotamento del Source e del Drain rispetto al substrato. Quindi la caduta di tensione nel silicio è la stessa di quella calcolata nel punto precedente. La concentrazione di portatori minoritari è invece diversa, perchè a questo punto dipende dalla caduta di tensione tra Source e $L/2$ nel silicio, pari a $-2 + 0.012 = -1.99$ V. La concentrazione di elettroni nel canale, infatti, è comandata dalla giunzione Source-canale n^+p , e quindi il segno è quello per la giunzione n^+p

polarizzata in diretta (negativo, quindi è in inversa). Avremo dunque che la concentrazione è praticamente uguale a 0:

$$n_s = n_0 e^{\frac{-V_{Source} + V_S}{V_T}} = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{-1.99}{V_T}} = 1.9 \times 10^{-23} \simeq 0 \quad \text{m}^{-3} \quad (6)$$

ESERCIZIO 3 (DTE)

- 1) Descrivere processo di fabbricazione LOCOS con LDD. [5]
- 2) Disegnare le maschere per la fabbricazione del circuito in figura (transistore MOS con resistenza in serie al Source). [5]



SOLUZIONE 3

- 1) Si rimanda alla dispensa per la descrizione del process LDD.
- 2) Basta usare il processo LDD con una diffusione di tipo n abbastanza lunga, così da fabbricare un resistore tra il contatto di Source ed il canale.

ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura, i transistori bipolari n^+pn Q_1 e Q_2 hanno $\beta_f \text{ min} = 300$ (nominale).

- 1) Durante la fabbricazione del transistore Q_2 si è verificato un problema nella fase di drogaggio dell'emettitore e il β_f è risultato pari a 20, invece che del valore nominale desiderato di 300. Determinare l'efficienza di emettitore.[3]
- 2) Determinare le correnti, le tensioni e il punto di riposo dei transistori. Che effetti ha il β_f ridotto di Q_2 sul punto di riposo? Giustificare la risposta.[5]
- 3) Determinare il valore minimo di V_Z per cui tutti i transistori risultano correttamente polarizzati.[2]

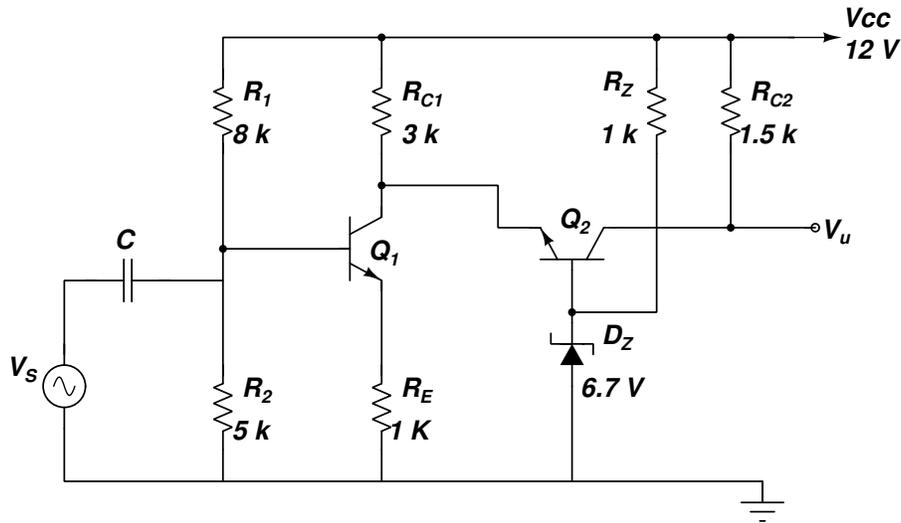


Figura 2: circuito

SOLUZIONE 4

1) Per $\beta_f = 300$ e $\gamma = 1$ (emettitore n^+) abbiamo che:

$$\alpha_f = \alpha_T = \frac{\beta_f}{\beta_f + 1} = 0.996678 \quad (7)$$

Invece abbiamo $\beta_f = 20$, e quindi il drogaggio di emettitore non è sufficiente ad ottenere $\gamma = 1$. Avremo dunque:

$$\begin{aligned} \alpha_f &= \frac{\beta_f}{\beta_f + 1} = 0.95238 \\ \alpha_f &= \gamma \alpha_T \\ \gamma &= \frac{\alpha_f}{\alpha_T} = 0.95 \end{aligned}$$

2) Calcoliamo $V_{B1} = V_{CC} \frac{R_2}{R_2 + R_1} = 4.61 \text{ V}$ e quindi $V_{E1} = 3.91 \text{ V}$ e $I_{E1} = 3.91 \text{ mA}$. Poichè $I_{B1} = \frac{I_{E1}}{\beta_f + 1} = 13 \mu\text{A}$ e $I_{R_1 R_2} = 0.92 \text{ mA}$ il partitore pesante è verificato e $I_{C2} \simeq I_{E2} = 3.91 \text{ mA}$. Avremo che $V_{B2} = 6.7 \text{ V}$ e $V_{E2} \equiv V_{C1} = 6 \text{ V}$. Quindi $I_{R1} = (12 - 6)/R_{C1} = 2 \text{ mA}$ e $I_{E2} = I_{C1} - I_{R_{C1}} =$

1.9 mA. Q_2 guadagna poco, ma possiamo comunque assumere $I_{C2} \simeq I_{E2}$ (formalmente $I_{C2} = \alpha_f I_{E2} = 1.8$ mA), e quindi incide poco sul punto di riposo. Avremo che $V_{C2} = V_u = V_{CC} - R_{C2} I_{C2} = 9.3$ V. Il problema si può verificare per la polarizzazione dello zener, che ha bisogno almeno di 1 mA per essere polarizzato oltre il ginocchio. Trascurando la corrente di base, la corrente che scorre nello zener risulta pari a $I_Z = (V_{CC} - V_Z)/R_{C2} = 5.3$ mA, mentre la $I_{B2} < I_{C2}/\beta_{f=min-gar} = 1.8$ mA/20 = 90 μ A. Quindi l'effetto sulla polarizzazione dello zener è trascurabile. Quindi, riassumendo, per il transistor Q_2 avremo:

$$\begin{aligned}
 I_{C2} &= 1.8 \quad \text{mA} \\
 I_{E2} &= 1.9 \quad \text{mA} \\
 V_{BE2} &\simeq V_\gamma = 0.7 \quad \text{V} \\
 V_{CE} &= V_u - V_{E2} = 9.3 - 6 = 3.3 \quad \text{V} \\
 I_{B2 \text{ max}} &= 90 \quad \mu\text{A}
 \end{aligned}$$

Per il transistor Q_1 avremo:

$$\begin{aligned}
 I_{C1} &\simeq I_{E1} = 3.9 \quad \text{mA} \\
 I_{B1 \text{ max}} &= \frac{I_{C1}}{\beta_{fmin}} = 13 \quad \mu\text{A} \\
 V_{BE1} &\simeq V_\gamma = 0.7 \quad \text{V} \\
 V_{CE1} &= 6 - 3.9 = 2.1 \quad \text{V}
 \end{aligned}$$

3) La minima tensione dello zener si può vedere come quella che consente la polarizzazione di Q_1 . Infatti $V_{E1} = 3.9$ V, mentre $V_{C1} = V_{E2} = V_Z - V_\gamma$. Quindi volendo $V_{CE1} > 0.3$ V avremo $V_{C1} > 4.2$ V e quindi $V_Z > 4.9$ V.