PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 10 settembre 2025

ESERCIZIO 1

Un transistore bipolare n^+pn ($N_{AB} = N_{DC} = 10^{16}$ cm$^-3$, $W_{met} = 3$ μm) è polarizzato con $I_B = 10$ μA, $V_{CE} = 5$ V, $S = 1$ mm^2, $\mu_n = 0.11$ m^2/Vs, $\tau_n = 1$ μs.

1) Usando una stima ragionevole per la V_{BE}, determinare le tensioni e le correnti ai terminali. Si valuti poi l'errore commesso sulla V_{BC} e sulla W_{BC} considerando i valori calcolati.[4]

2) Si determinino le capacità differenziali dovute alle regioni di svuotamento. Tra quali coppie di terminali vanno posizionate? [3]

3) Si determini la capacità differenziale dovuta alla carica immagazzinata in base e la coppia di terminali a cui applicarla (qual è la tensione di controllo?). Confrontarla con le capacità calcolate nel punto 2. (Si possono fare delle approssimazioni) [3]

ESERCIZIO 2

Una linea di produzione di circuiti integrati prevede la fabbricazione di transistori n-MOS polysilicon gate, su un substrato $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm. Vengono fabbricati alcuni condensatori MOS di test, da cui risulta che il processo di drogaggio del gate è difettoso: il gate viene drogato solo $n = 10^{17}$ cm^{-3} anziché n^+.

1) Determinare la caduta di tensione nell'elettrodo di gate quando il substrato raggiunge la soglia dell'inversione. [3]

2) Determinare la tensione di soglia, e confrontarla con quella che si avrebbe con il gate correttamente drogato. [3]

3) Si determini la tensione V_{GS} necessaria per portare anche il Gate alla soglia dell'inversione, nonché la carica mobile nel canale (nel substrato p) per questo valore di tensione. [4]

ESERCIZIO 3

Una giunzione pn a drogaggio simmetrico ($\mu_n = 1100$ cm^2/Vs, $\mu_p = 400$ cm^2/Vs, lunghezza di ciascuna base $W_n = W_p = 4$ μm, basi corte, S=1 mm^2) è polarizzato in inversa, con una regione di svuotamento di $W = 5$ μm e campo elettrico massimo di 8 MV/m (negativo).

1) Determinare il drogaggio delle basi.[4]

2) Determinare la tensione applicata.[3]

3) Determinare la corrente nel diodo, e confrontarla con quella che si avrebbe per V=-0.5 V. [3]

ESERCIZIO 1

Un transistore bipolare n^+pn ($N_{AB} = N_{DC} = 10^{16}$ cm$^-3$, $W_{met} = 3$ μm) è polarizzato con $I_B = 10$ μA, $V_{CE} = 5$ V, $S = 1$ mm^2, $\mu_n = 0.11$ m^2/Vs, $\tau_n = 1$ μs.

1) Usando una stima ragionevole per la V_{BE}, determinare le tensioni e le correnti ai terminali. Si valuti poi l'errore commesso sulla V_{BC} e sulla W_{BC} considerando i valori calcolati.[4]

2) Si determinino le capacità differenziali dovute alle regioni di svuotamento. Tra quali coppie di terminali vanno posizionate? [3]

3) Si determini la capacità differenziale dovuta alla carica immagazzinata in base e la coppia di terminali a cui applicarla (qual è la tensione di controllo?). Confrontarla con le capacità calcolate nel punto 2. (Si possono fare delle approssimazioni) [3]

SOLUZIONE

1) Come suggerito dal testo, assumiamo un valore accettabile per V_{BE}, salvo fare i conti a "consuntivo" e vedere di quanto si sbaglia. Prendiamo $V_{BE} \approx 0.6$ V. Quindi procediamo con i conti:

$$
\begin{aligned}
V_{CB} &= V_{CE} - V_{BE} = 4.4 \text{ V} \\
V_{0BC} &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{AB} N_{DC}}{n_i^2} = 0.693 \text{ V} \\
W_{BC} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_{AB}} + \frac{1}{N_{DC}}\right)(V_0 + V_{CB})} = 1.16 \ \mu\text{m} \\
x_{BC} &= 0.58 \ \mu\text{m} \\
W_{eff} &= 2.42 \ \mu\text{m} \\
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.843 \times 10^{-3} \ \text{m}^2/\text{s} \\
\tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} = 1 \ \text{ns} \\
I_C &= \frac{Q}{\tau_t} = I_B \frac{\tau_n}{\tau_t} = 9.2 \ \text{mA} \\
Q &= qS\frac{n_i^2}{N_{AB}} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \frac{W}{2} = I_B \tau_n \\
V_{BE} &= V_T \ln\left(\frac{2 I_B \tau_n N_{AB}}{W q S n_i^2}\right) = 0.58 \ \text{V}
\end{aligned}
$$

Quindi molto vicino al valore ipotizzato. La V_{BE} incide essenzialmente solo nel calcolo della V_{BC}, che si riflette sulla regione di svuotamento, e sulla lunghezza effettiva di base, con una dipendenza come la redice quadrata. Quindi considerare $V_{BE} = 0.6$ o $V_{BE} = 0.58$ non da alcuna differenza. Se si fosse scelto $V_{BE} = 0.7$ V, $V_{BC} = 4.3$ V, $W_{BC} = 1.15$ μm. La differenza sarebbe comunque stata trascurabile.

2) Le due giunzioni sono BE, che ha una capacità differenziale molto grande perché è polarizzata in diretta, e BC, polarizzata in inversa. Calcoliamo le C_W parassite tra base e collettore, e tra base ed emettitore. Per la C_{BE} bisogna calcolare la regione di svuotamento

base-emettitore, che per semplicità di calcolo si trascura nel calcolo delle correnti $N_{DE} = n^+$.

$$\begin{aligned}
C_{BC} &= S\frac{\epsilon_s}{W_{BC}} = 90.8 \ \ \text{pF} \\
V_{0BE} &= \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_{AB}N_{DE}}{n_i^2}\right) = 0.871 \ \ \text{V} \\
W_{BE} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_{AB}}(V_{0BE}+V_{BE})} = 0.44 \ \ \mu\text{m} \\
C_{BE} &= S\frac{\epsilon_s}{W_{BE}} = 239 \ \ \text{pF}
\end{aligned}$$

3) La tensione da cui dipende la carica immagazzinata in base è la V_{BE}, che determina Q. Quindi avremo:

$$\begin{aligned}
Q &= qS\frac{n_i^2}{N_{AB}}e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}\frac{W}{2} \\
C_{BE\ diff} &= \frac{dQ}{dV_{BE}} = \frac{qS}{V_T}\frac{n_i^2}{N_{AB}}e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}\frac{W}{2}
\end{aligned}$$

Nell'ultima equazione abbiamo trascurato la dipendenza della W dalla V_{BE} che, come abbiamo dimostrato nel punto 1, è molto piccola. Quindi l'espressione della capacit'à di diffusione dovuta alla carica in base diventa praticamente:

$$C_{BE\ diff} = \frac{Q}{V_T} = \frac{I_B\tau_n}{V_T} = 38.7 \ \ \text{nF}$$

Quindi, pur essendo in genere la base corta e Q piccola, la capacità dovuta alla carica in base è abbastanza grande, maggiore di quelle dovute alle regioni di svuotamento.
Nelle applicazioni circuitali, oggetto di corsi successivi, vi verrà dimostrato che la capacità parassita più piccola, che è la V_{CB}, è quella con l'effetto maggiore nelle applicazioni circuitali, perché posta tra due punti tra i quali, in genere, c'è una notevole amplificazione di tensione (effetto Miller, che vedrete nei corsi circuitali).

ESERCIZIO 2

Una linea di produzione di circuiti integrati prevede la fabbricazione di transistori n-MOS polysilicon gate, su un substrato $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm. Vengono fabbricati alcuni condensatori MOS di test, da cui risulta che il processo di drogaggio del gate è difettoso: il gate viene drogato solo $n = 10^{17}$ cm^{-3} anziché n^+.

1) Determinare la caduta di tensione nell'elettrodo di gate quando il substrato raggiunge la soglia dell'inversione. [3]

2) Determinare la tensione di soglia, e confrontarla con quella che si avrebbe con il gate correttamente drogato. [3]

3) Si determini la tensione V_{GS} necessaria per portare anche il Gate alla soglia dell'inversione, nonché la carica mobile nel canale (nel substrato p) per questo valore di tensione. [4]

SOLUZIONE

1) Con polarizzazione positiva V_{GS}, sia il gate n che il substrato p tendono all'inversione. Alla soglia dell'inversione avremo che la carica del condensatore MOS è quella della regione di svuotamento nel substrato p:

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_{Bp}} \\ \psi_{Bp} &= \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A}{n_i} = 0.347 \ \ \mathrm{V} \end{aligned}$$

Questa carica è negativa nel substrato, dovuta agli accettori ionizzati. Nel substrato ci cade una tensione ψ_{Bp}. Sul Gate dovremo avere la stessa carica, dovuta ai donatori positivi, e quindi sull'elettrodo di Gate ci sarà una caduta di tensione V_S, minore di $2\psi_{Bn}$. Infatti il Gate è più drogato del substrato, quindi raggiunge l'inversione per tensioni V_{GS} maggiori di quella che serve per il substrato. Quindi avremo:

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_{Bp}} = \sqrt{2\epsilon_s q N_D V_S} \\ N_A 2\psi_{Bp} &= N_D V_S \\ V_S &= \frac{N_A}{N_D} 2\psi_{Bp} = 0.0347 \ \ \mathrm{V} \end{aligned}$$

2) Nel caso di Gate correttamente drogato avremo avuto:

$$\begin{aligned} \Phi_{MS} &= -\frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} = -0.887 \ \ \mathrm{V} \\ C_{ox} &= \frac{\epsilon_s}{t_{ox}} = 1.726 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{F/m^2} \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_{Bp}}}{C_{ox}} + 2\psi_{Bp} + \Phi_{MS} = 0.09 \ \ \mathrm{V} \end{aligned}$$

Nel caso di gate drogato n (non n^+) avremo che alla tensione di soglia va aggiunta la caduta di tensione V_S necessara al Gate per fornire la carica del condensatore MOS. Inoltre, la Φ_{MS} si modifica poich´ il livello di Fermi nel Gate non coincide con la banda di conduzione, ma si trova sopra il livello di Fermi intrinseco di ψ_{Bn}. Quindi Φ_{MS} è negativa, ed in valore assoluto si ottiene sommando le due ψ_B :

$$\begin{aligned} \psi_{Bn} &= \frac{kT}{q}\ln\frac{N_D}{n_i} = 0.406 \ \ \mathrm{V} \\ \Phi_{MS} &= -\psi_{Bn} - \psi_{Bp} = -0.753 \ \ \mathrm{V} \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_{Bp}}}{C_{ox}} + 2\psi_{Bp} + V_{Sgate} + \Phi_{MS} = 0.26 \ \ \mathrm{V} \end{aligned}$$

3) Nel caso di gate alla soglia dell'inversione, avremo che la carica del condensatore MOS è pari a:

$$Q = \sqrt{2\epsilon_s q N_D 2\psi_{Bn}} \tag{1}$$

Questa sarà uguale a $Q_n + Q_W$ del substrato p, che è oltre l'inversione. La caduta di tensione sull'elettrodo di Gate è a questo punto $2\psi_{Bn}$. Avremo che la tensione V_{GS} si può scrivere come:

$$\begin{aligned} V_{GS} &= -\frac{Q_n + Q_W}{C_{ox}} + 2\psi_{Bp} + 2\psi_{Bn} + \Phi_{MS} \\ V_{GS} &= -\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_D 2\psi_{Bn}}}{C_{ox}} + 2\psi_{Bp} + 2\psi_{Bn} + \Phi_{MS} = 1.71 \quad \text{V} \end{aligned}$$

La carica mobile nel canale sarà data da:

$$\begin{aligned} Q_n &= Q - Q_W \\ Q_n &= \sqrt{2\epsilon_s q N_D 2\psi_{Bn}} - \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_{Bp}} \\ Q_n &= 1.65 \times 10^{-3} - 4.84 \times 10^{-4} = 1.17 \times 10^{-3} \quad \text{C/m}^2 \end{aligned}$$

ESERCIZIO 3

Una giunzione pn a drogaggio simmetrico ($\mu_n = 1100$ cm^2/Vs, $\mu_p = 400$ cm^2/Vs, lunghezza di ciascuna base $W_n = W_p = 4$ μm, basi corte, S=1 mm^2) è polarizzato in inversa, con una regione di svuotamento di $W = 5$ μm e campo elettrico massimo di 8 MV/m (negativo).

1) Determinare il drogaggio delle basi.[4]

2) Determinare la tensione applicata.[3]

3) Determinare la corrente nel diodo, e confrontarla con quella che si avrebbe per V=-0.5 V. [3]

SOLUZIONE

1) Avremo che $x_p = x_n = W/2$, poiché i due drogaggio sono uguali. I profilo del campo elettrico è triangolare tra $-x_p = -2.5$ μm e $x_n = 2.5$ μm, e la derivata del campo elettrico (la pendenza dei lati del triangolo) è proporzionale al drogaggio:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{max} &= \frac{qN_A}{\epsilon_s} x_p = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x_n \\ N_A &= \frac{\mathcal{E}_{max}}{x_p} \frac{\epsilon_s}{q} = 2 \times 10^{15} \quad \text{cm}^{-3} \end{aligned}$$

2) La tensione applicata più la differenza di potenziale di contatto V_0 è l'integrale del profilo del campo elettrico, che è triangolare. Quindi avremo:

$$V + V_0 = \frac{1}{2} W \mathcal{E}_{max} = 20 \quad \text{V} \tag{2}$$

Quindi avremo:

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} = 0.65 \quad \text{V} \\ V &= 20 - V_0 = 19.35 \quad \text{V} \end{aligned}$$

3) La corrente è quella di saturazione inversa, che dipende dalla lunghezza delle basi meno x_p e x_n:

$$
\begin{aligned}
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.843 \times 10^{-4} \quad \mathrm{m^2/s} \\
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.034 \times 10^{-3} \quad \mathrm{m^2/s} \\
I_S &= qS\frac{D_n}{W_n - x_n}\frac{n_i^2}{N_D} + qS\frac{D_p}{W_p - x_p}\frac{n_i^2}{N_A} = 23.3 \quad \mathrm{pA}
\end{aligned}
$$

Ovviamente diretta da n a p, cioè negativa. Nel caso $V = -0.5$ V, dovremo ricalcolare la regione di svuotamento ($N = N_A = N_D$):

$$
\begin{aligned}
W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\frac{2}{N}\left(V_0 - 0.5\right)} = 0.444 \ \mu\mathrm{m} \\
x_n = x_p &= \frac{W}{2} = 0.222 \quad \mu\mathrm{m} \\
I_S &= qS\frac{D_n}{W_n - x_n}\frac{n_i^2}{N_D} + qS\frac{D_p}{W_p - x_p}\frac{n_i^2}{N_A} = 6.3 \quad \mathrm{pA}
\end{aligned}
$$