

PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 9 gennaio 2025

ESERCIZIO 1 Una giunzione pn ha $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $S=1 \text{ mm}^2$, $W_n = W_p = 5 \text{ }\mu\text{m}$ (basi corte).

1) Si determini la tensione per avere una corrente pari a 1 mA, e si verifichi l'ipotesi di bassa iniezione.[2]

2) Il campo elettrico di break-down avalanche è pari a $\mathcal{E}_{BD} = 50 \text{ MV/m}$. Determinare la tensione di break-down, e il fenomeno che la provoca.[4]

3) Stimare la resistenza differenziale per $V < 0$. SUGGERIMENTO: calcolare la corrente per $V = -1 \text{ V}$ e per $V = -50 \text{ V}$.[4]

ESERCIZIO 2 Un transistor MOS è fabbricato con un condensatore MOS ideale, con $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $W = L = 2 \text{ }\mu\text{m}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$. È polarizzato con $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$. Il comportamento ad alta frequenza del condensatore MOS si è cominciato a manifestare per frequenze maggiori di 100 kHz.

1) Una volta determinata la corrente I_{DS} , si calcoli la carica fissa, la carica mobile immagazzinata nel canale ed il tempo di transito τ_t . [3]

2) A $t = 0$, V_{GS} viene portata a 0. Si calcoli la carica mobile nel canale per $t = 0^+$. Si assuma per la carica (ai fini dell'esercizio) un andamento lineare con il tempo, da 0 a τ_t (per $t = \tau_t$ la carica è 0). Si calcoli l'andamento in funzione del tempo del campo elettrico nell'ossido e della caduta di tensione nel silicio V_S .[4]

3) Nel caso del condensatore MOS (senza pozzetti di Drain e di Source), come potremo stimare il tempo di permanenza della carica Q_n nel canale? Determinare la capacità massima e la capacità minima del condensatore MOS, al variare di V_{GB} .[3]

ESERCIZIO 3 Un transistor bipolare n^+pn è realizzato con un processo di drogaggio che permette di avere $N_{AB} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{DC} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Da una caratterizzazione è risultato $\mu_n = 0.09 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$.

1) Dimensionare la lunghezza metallurgica della base per avere un β_f minimo garantito pari a 300. [3]

2) Il transistor viene polarizzato con $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$. Determinare V_{CE} , per avere $\beta_f = 500$, e dimensionare la superficie del dispositivo per avere $I_C = 5 \text{ mA}$ (calcolare la corrente di base). [4]

3) Nelle stesse condizioni di polarizzazione V_{BE} e V_{CE} , si determinino le correnti ai terminali nel caso in cui sia $N_{DC} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.[3]

ESERCIZIO 1 Una giunzione pn ha $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $S=1 \text{ mm}^2$, $W_n = W_p = 5 \text{ }\mu\text{m}$ (basi corte).

1) Si determini la tensione per avere una corrente pari a 1 mA, e si verifichi l'ipotesi di bassa iniezione.[2]

2) Il campo elettrico di break-down avalanche è pari a $\mathcal{E}_{BD} = 50 \text{ MV/m}$. Determinare la tensione di break-down, e il fenomeno che la provoca.[4]

3) Stimare la resistenza differenziale per $V < 0$. SUGGERIMENTO: calcolare la corrente per $V = -1 \text{ V}$ e per $V = -50 \text{ V}$.[4]

SOLUZIONE 1

1) Le due basi sono corte entrambe. In diretta possiamo trascurare le regioni di svuotamento e calcolare la I_S con W_n e W_p . Avremo:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = 1.034 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$I_S = qS \left(\frac{D_n}{W_p} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{W_n} \frac{n_i^2}{N_D} \right) = 3.35 \text{ pA}$$

$$V = V_T \ln \frac{I}{I_S} = 0.504$$

$$\delta p(0) = \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V}{V_T}} = 6.7 \times 10^{18} \ll 5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$$

$$\delta n(0) = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V}{V_T}} = 3.35 \times 10^{18} \ll 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

I due eccessi sono entrambi molto maggiori della concentrazione dei portatori minoritari all'equilibrio.

2) Il break-down può essere provocato o dal punch-through di una delle due basi o dall'avalanche per il superamento del campo di break-down. Da notare che le due basi hanno la stessa lunghezza, ma il drogaggio p è maggiore di quello n . Quindi la regione di svuotamento in inversa è maggiore nella base n , che raggiunge per prima (a parità di lunghezza) il punch-through. Calcoliamo la tensione inversa necessaria a svuotare completamente la regione n :

$$x_n = 5 \text{ }\mu\text{m}$$

$$x_p = x_n \frac{N_D}{N_A} = 2.5 \text{ }\mu\text{m}$$

$$W = 7.5 \text{ }\mu\text{m}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + |V|)}$$

$$V_0 = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.675$$

$$V = W^2 \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{q}{2\epsilon_s} - V_0 = 142 \text{ V}$$

Per $V = 142 \text{ V}$ in inversa (ovviamente negativa) avremo che il campo elettrico massimo alla giunzione risulta:

$$\mathcal{E}_{max} = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x_n = 38 \text{ MV/m} \quad (1)$$

Il campo elettrico massimo al pass-through è minore di quello di break-down avalanche, quindi si raggiunge lo svuotamento completo della base n prima dell'avalanche.

3) In inversa avremo che la I_S dipende pesantemente dalle regioni di svuotamento. Per $V = -1$ la corrente di saturazione inversa sarà praticamente la I_S calcolata prima. Per $V = 50 \text{ V}$ avremo:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 + |V|)} = 4.47 \text{ } \mu\text{m}$$

$$x_n = W \frac{N_A}{N_D + N_A} = 3 \text{ } \mu\text{m}$$

$$x_p = 1.5 \text{ } \mu\text{m}$$

$$I_S = qS \left(\frac{D_n}{W_p - x_p} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{W_n - x_n} \frac{n_i^2}{N_D} \right) = 3.72 \text{ pA}$$

ESERCIZIO 2

Un transistor MOS è fabbricato con un condensatore MOS ideale, con $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $W = L = 2 \text{ } \mu\text{m}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$. È polarizzato con $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$. Il comportamento ad alta frequenza del condensatore MOS si è cominciato a manifestare per frequenze maggiori di 100 kHz .

1) Una volta determinata la corrente I_{DS} , si calcoli la carica fissa, la carica mobile immagazzinata nel canale ed il tempo di transito τ_t . [3]

2) A $t = 0$, V_{GS} viene portata a 0. Si calcoli la carica mobile nel canale per $t = 0^+$. Si assuma per la carica (ai fini dell'esercizio) un andamento lineare con il tempo, da 0 a τ_t (per $t = \tau_t$ la carica è 0). Si calcoli l'andamento in funzione del tempo del campo elettrico nell'ossido e della caduta di tensione nel silicio V_S . [4]

3) Nel caso del condensatore MOS (senza pozzetti di Drain e di Source), come potremo stimare il tempo di permanenza della carica Q_n nel canale? Determinare la capacità massima e la capacità minima del condensatore MOS, al variare di V_{GB} . [3]

SOLUZIONE

1) Calcoliamo la tensione di soglia e la corrente I_{DS} , sapendo che per $V_{DS} = 0.1$ V siamo in zona lineare.

$$\begin{aligned}\psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\ C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{C_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_b}}{C_{ox}} + 2\psi_B = 1.11 \text{ V} \\ I_{DS} &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} = 35.7 \text{ } \mu\text{A}\end{aligned}$$

La carica fissa è dovuta alla regione di svuotamento sotto il Gate, la carica mobile si calcola semplicemente perché è costante con L . Le cariche sono entrambe negative:

$$\begin{aligned}Q_W &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_b} W L = 1.94 \times 10^{-15} \text{ C} \\ Q_n &= C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) W L = 1.78 \times 10^{-14} \text{ C}\end{aligned}$$

Da cui il tempo di transito (bisogna usare la carica TOTALE, non la carica per unità di superficie):

$$\begin{aligned}I_{DS} &= \frac{Q_n \text{ totale}}{\tau_t} \\ \tau_t &= \frac{Q_n \text{ totale}}{I_{DS}} = 0.5 \text{ ns}\end{aligned}$$

2) A $t = 0^+$ la V_{GS} va a 0, ma la carica mobile rimane $Q_n(0^+) = Q_n(V_{GS} = 5)$. Quindi l'andamento della carica nel tempo risulta:

$$Q_n(t) = Q_n(0^+) \left(1 - \frac{t}{\tau_t}\right) \quad (2)$$

Il campo elettrico nell'ossido è positivo, e risulta pari alla carica nel silicio (negativa, l'espressione sopra è in valore assoluto) per unità di superficie diviso la costante dielettrica. La carica fissa è 0, poiché la V_{GS} è 0. C'è un eccesso di elettroni non in equilibrio, che si smaltisce o via ricombinazione termica, o sui pozzetti. Ma la ricombinazione termica è molto più lenta del drift verso i pozzetti. Il campo elettrico porta ad una V_{Si} . Quindi avremo:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{ox} &= \frac{Q_n(t)}{\epsilon_{ox}} \\ V_{Si} &= \mathcal{E}_{ox} t_{ox} \\ V_{Si} &= \frac{Q_n(t)}{C_{ox}}\end{aligned}$$

3) Il comportamento ad alta frequenza inizia a 100 kHz, quindi il tempo di vita medio degli elettroni è approssimabile come $\tau_n = 1/100 \text{ kHz} = 10^{-5} \text{ s}$. Quindi il tempo che impiega Q_n a ricombinarsi, senza pozzetti in cui gettarsi, è dell'ordine di $3/5 \tau_n$. Le capacità massime e minime si hanno rispettivamente per $V_{GS} < 0$ e per $V_{GS} = V_{TH}$:

$$\begin{aligned} C_{max} &= C_{ox} \\ C_{min} &= \frac{C_{ox}C_{Si}}{C_{ox} + C_{Si}} \\ C_{Si}(V_{GB} = V_{TH}) &= \frac{\epsilon_s}{W(2\psi_B)} = 0.348 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2 \\ C_{min} &= 0.268 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2 \end{aligned}$$

ESERCIZIO 3

Un transistor bipolare n^+pn è realizzato con un processo di drogaggio che permette di avere $N_{AB} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{DC} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Da una caratterizzazione è risultato $\mu_n = 0.09 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$.

1) Dimensionare la lunghezza metallurgica della base per avere un β_f minimo garantito pari a 300. [3]

2) Il transistor viene polarizzato con $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$. Determinare V_{CE} , per avere $\beta_f = 500$, e dimensionare la superficie del dispositivo per avere $I_C = 5 \text{ mA}$ (calcolare la corrente di base). [4]

3) Nelle stesse condizioni di polarizzazione V_{BE} e V_{CE} , si determinino le correnti ai terminali nel caso in cui sia $N_{DC} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. [3]

SOLUZIONE

1) Manca la lunghezza metallurgica della base, che per garantire un $\beta_f = 300$ può essere scelta in maniera opportuna: se W_{met} da $\beta_f = 300$, in ogni condizione di polarizzazione (in zona attiva diretta) il β_f sarà sicuramente maggiore per l'effetto Early.

$$\begin{aligned} \beta_f &= \frac{\tau_n}{\tau_t} \\ \tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} \\ \beta_f &= \frac{\tau_n}{\frac{W^2}{2D_n}} \\ W &= \sqrt{\frac{2\tau_n D_n}{\beta_f}} \end{aligned}$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = 2.32 \times 10^{-3}$$

$$W_{met} = 4 \mu\text{m}$$

2) Supponiamo di poter trascurare la regione di svuotamento della giunzione base-emettitore (può essere comunque calcolata per correttezza). Avremo:

$$W = \sqrt{\frac{2\tau_n D_n}{\beta_f}} = 3 \mu\text{m}$$

$$x_n = W_{met} - W = 1 \mu\text{m}$$

$$W_{BE} = x_n \frac{N_{AB} + N_{DC}}{N_{DC}} = 3 \mu\text{m}$$

$$V_{0\ BE} = V_T \ln \frac{N_{AB} N_{DC}}{n_i^2} = 0.675 \text{ V}$$

$$V_{BE} = W_{BE}^2 \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{q}{2\epsilon_s} - V_{0\ BE} = 22 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 22.6 \text{ V}$$

Per la superficie Avremo:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_f} = 50 \mu\text{A}$$

$$I_B = Sq\delta_n(0) \frac{W}{2} \frac{1}{\tau_n}$$

$$\delta_n(0) = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = 2.7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$S = \frac{2I_B \tau_n}{q\delta_n(0)W} = 0.77 \text{ mm}^2$$

3) Con le stesse tensioni applicate avremo:

$$W_{BE} = x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} (V_{BE} + V_{0\ BE})} = 1.7 \mu\text{m}$$

$$V_{0\ BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{10^{22} 10^{25}}{(1.5 \times 10^{16})^2} = 0.872 \text{ V}$$

$$W = W_{met} - x_n = 2.3 \mu\text{m}$$

$$\tau_t = 1.14 \text{ ns}$$

$$\beta_f = 877$$

$$I_B = Sq\delta_n(0) \frac{W}{2} \frac{1}{\tau_n} = 38 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta_f I_B = 33 \text{ mA}$$