

DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 19 febbraio 2011

ESERCIZIO 1 (DTE) Un wafer n ($N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) ossidato ($t_{ox} = 0.8 \mu\text{m}$) e coperto di fotoresist positivo viene impressionato con una maschera circolare: cerchio trasparente di raggio pari a $2 \mu\text{m}$. Dopo la rimozione del resist impressionato l'attacco isotropo dell'ossido dura un tempo doppio rispetto a quello necessario a rimuovere t_{ox} .

1) Determinare il raggio della zona priva di ossido.

2) Dopo la rimozione completa del resist viene eseguita una predeposizione di B ($Q = 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) e quindi un drive-in a $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ($D_{0B} = 0.76 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$, $E_{aB} = 3.46 \text{ eV}$) per 30'. Nell'ipotesi che la diffusione laterale sia il 50% di quella verticale, determinare il raggio della zona p alla superficie del Si.

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) In una giunzione p^+n polarizzata direttamente scorre una corrente I_1 . All'istante $t = 0$ la corrente assume il valore zero.

1) Ricavare l'espressione del transitorio di tensione in modo che contenga esplicitamente I_1 e I_0 .

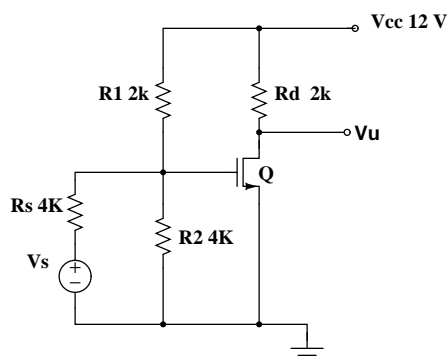
2) Il tempo necessario per raggiungere un certo valore di tensione dipende dal drogaggio della parte n ? E dalla concentrazione di difetti?

ESERCIZIO 3 (DE) Nel circuito in figura, il transistore è un n -MOS con $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $t_{OX} = 50 \text{ nm}$, $V_{TH} = 1 \text{ V}$, $W = 4L$.

1) Determinare il punto di riposo del transistore.

2) Disegnare il circuito equivalente per piccoli segnali a bassa frequenza, calcolando i parametri dinamici, e determinare l'amplificazione V_u/V_s .

3) Togliendo R_2 dal circuito, è possibile polarizzare il transistore? Quali parametri vengono modificati?



ESERCIZIO 4 (DE,DTE) Un transistor bipolare n^+pn ($\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$, $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) è polarizzato con $I_B = 20 \mu\text{A}$, $V_{CE} = 100 \text{ V}$, $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$. Viene misurata una corrente di collettore $I_C = 15 \text{ mA}$. Il drogaggio della base è uguale a quello del collettore e la lunghezza metallurgica della base è pari a $6 \mu\text{m}$. Si considerino trascurabili le ampiezze delle regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta, e si approssimi la tensione di contatto della giunzione base-collettore con 0.6 V .

1) Determinare le tensioni ai contatti e i parametri α_F e β_F del transistor bipolare.

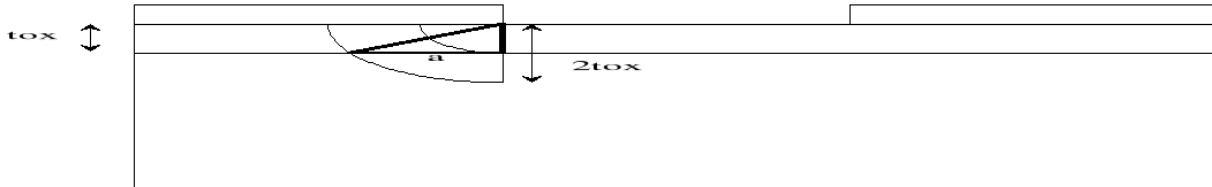
2) Determinare la lunghezza effettiva di base e il drogaggio della base e del collettore.

3) Calcolare la corrente di collettore per $V_{CE} = 20 \text{ V}$ e determinare la resistenza di uscita $1/h_{oe}$ del transistor.

ESAME DE e DTE del 19 Febbraio 2011

SOLUZIONE 1

1) Poichè l'attacco ha la stessa velocità in tutte le direzioni si ottiene (vedi figura)



$$a^2 + t_{ox}^2 = 4t_{ox}^2$$

$$a = t_{ox}\sqrt{3} = 0.8 \times \sqrt{3} = 1.38 \mu\text{m}$$

e quindi $R = 3.38 \mu\text{m}$.

2) Si determina la profondità di giunzione secondo x utilizzando l'espressione del profilo di drive-in

$$N_A(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_B t_{di}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_B t_{di}}\right);$$

è necessario prima conoscere D_B (1100 °C)

$$D_B = D_{0B} e^{-\frac{E_{aB}}{kT}} = 0.76 \times \exp\left(-\frac{3.46}{8.63 \times 10^{-5} \times (1100 + 273)}\right) = 1.58 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

La profondità di giunzione secondo x si ottiene risolvendo

$$N_D = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_B t_{di}}} \exp\left(-\frac{x_j^2}{4D_B t_{di}}\right)$$

$$10^{15} = \frac{10^{15}}{\sqrt{\pi \times 1.58 \times 10^{-13} \times 1800}} \exp\left(-\frac{x_j^2}{4 \times 1.58 \times 10^{-13} \times 1800}\right);$$

$x_j = 1.09 \times 10^{-4} \text{ cm} = 1.09 \mu\text{m}$. In direzione r ($r = \sqrt{y^2 + z^2}$) $x_j = 0.545 \mu\text{m}$ e quindi il raggio della zona p superficiale vale $3.38 + 0.545 = 3.925 \mu\text{m}$.

SOLUZIONE 2

La soluzione dell'equazione di continuità

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{\tau}$$

è

$$Q(t) = A + Be^{-\frac{t}{\tau}}$$

con le condizioni al contorno

$$\begin{aligned} t &= 0, Q(t) = I_1\tau \\ t &= \infty, Q(t) = 0 \end{aligned}$$

e quindi

$$Q(t) = I_1\tau e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

$Q(t)$ va messa adesso in relazione con la tensione e questo è possibile nell'ipotesi di profilo di diffusione del tipo

$$\delta p(x, t) = \delta p(0, t)e^{-\frac{x}{L_h}};$$

infatti in questo caso

$$Q(t) = qSL_h p_{n0} \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right)$$

e quindi

$$\begin{aligned} qSL_h p_{n0} \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right) &= I_1\tau e^{-\frac{t}{\tau}} \\ \frac{qSL_h p_{n0}}{\tau} \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right) &= I_1 e^{-\frac{t}{\tau}}; \end{aligned}$$

moltiplicando e dividendo per L_h il primo membro

$$\begin{aligned} \frac{qSL_h^2 p_{n0}}{\tau L_h} \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right) &= I_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \\ \frac{qSD_h p_{n0}}{L_h} \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right) &= I_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \\ I_0 \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right) &= I_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned}$$

e infine

$$v(t) = V_T \ln \left(\frac{I_1}{I_0} e^{-\frac{t}{\tau}} + 1 \right).$$

2) Non dipende dal drogaggio (rapporto fra I_1 e I_0); dipende dalla concentrazione di difetti (τ).

SOLUZIONE 3

1) Calcoliamo la tensione V_{GS} :

$$V_{GS} = V_{CC} \frac{R_2 \parallel R_S}{R_1 + R_2 \parallel R_S} = 6 \text{ V}$$

Supponiamo il transistoro in saturazione, ipotesi da verificare a posteriori. In questo caso, la corrente I_{DS} si può scrivere come:

$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{OX} W}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$C_{OX} = \frac{\epsilon_{OX}}{t_{OX}} = 6.88 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

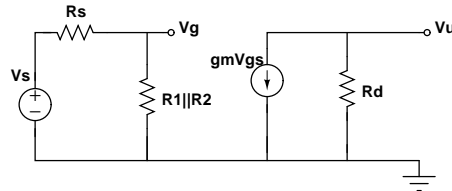
$$I_{DS} = 2.75 \text{ mA}$$

Quindi la tensione drain-source risulta:

$$V_{DS} = V_{CC} - R_D I_{DS} = 6.5 \text{ V}$$

Essendo $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ l'ipotesi iniziale di transistorore in saturazione è verificata.

2) Il circuito equivalente è:



dove $g_m = \partial I_{DS} / \partial V_{GS}$:

$$g_m = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) = 1.1 \times 10^{-3} \text{ A/V}$$

L'amplificazione può essere determinata come:

$$\frac{V_u}{V_s} = -g_m R_d \frac{R_1 \parallel R_2}{R_s + R_1 \parallel R_2} = 0.55$$

<http://servizi.ing.unipi.it/cgi-bin/hamasy/scripts/presidents.php>

3) Rimuovendo R_2 , il transistorore può polarizzarsi ugualmente, con una tensione V_{GS} più alta. In realtà, facendo i conti con i dati del circuito, la corrente di polarizzazione è molto più elevata del caso precedente, e la V_{DS} risulterebbe negativa. Quindi per polarizzare il transistorore, togliendo R_2 bisogna modificare anche R_1 . Con $R_1 = 4 \text{ K}\Omega$, la V_{GS} , e quindi anche la I_{DS} , ritornano esattamente quelle del caso precedente.

SOLUZIONE 4

1) L'unica tensione incognita è la differenza di potenziale tra base e collettore:

$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 99.4 \text{ V}$$

Il parametro β_F si calcola immediatamente come:

$$\beta_F = \left| \frac{I_C}{I_B} \right| = 750$$

come anche α_F :

$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} = 0.9986684$$

calcolato con molti decimali per rendere più precise le successive elaborazioni. Dal parametro α_F si può ricavare la lunghezza effettiva della base, che dipende dalla lunghezza metallurgica, dalla tensione V_{CB} e dal drogaggio di base e collettore:

$$\alpha_F = \frac{1}{1 + \frac{W_{eff}^2}{2L_n^2}}$$

Ricavando W_{eff} :

$$W_{eff} = L_n \sqrt{2 \left(\frac{1}{\alpha_F} - 1 \right)}$$

dove:

$$L_n = \sqrt{V_i \mu_n \tau_n} = 50.89 \text{ } \mu\text{m}$$

e quindi $W_{eff} = 2.63 \text{ } \mu\text{m}$. Dalla lunghezza effettiva di base, possiamo ricavare l'ampiezza della regione di svuotamento base-collettore X_{BC} :

$$W_{eff} = W_{metallurgica} - X_{BC}$$

$$X_{BC} = W_{metallurgica} - W_{eff} = 6 - 2.63 = 3.37 \text{ } \mu\text{m}$$

La regione di svuotamento base-collettore dipende dal drogaggio:

$$X_{BC} = W_{BC}/2$$

$$W_{BC} = 2 X_{BC} = 6.74 \text{ } \mu\text{m}$$

$$W_{BC} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{2}{N} (V_0 + V_{BC})}$$

Il drogaggio è stato indicato genericamente con N , essendo lo stesso per la base e per il collettore. Da questa espressione, con l'approssimazione di V_0 , è possibile determinare il drogaggio N :

$$N = \frac{2\epsilon_s}{q} \frac{2}{W_{BC}} (V_0 + V_{BC}) = 5.8 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$$

$$N = 5.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

3) Per calcolare la corrente di collettore con $V_{CE} = 20 \text{ V}$, basta ripetere i conti in senso inverso, calcolando la regione di svuotamento collettore-base per $V_{CE} = 20 \text{ V}$:

$$W_{BC} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{2}{N} (V_0 + V_{BC})} = 3 \text{ } \mu\text{m}$$

$$X_{BC} = \frac{W_{BC}}{2} = 1.5 \text{ } \mu\text{m}$$

e quindi:

$$W_{eff} = 6 - 1.5 = 4.5 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\alpha_f = \frac{1}{1 + \frac{W_{eff}^2}{2L_n^2}} = 0.9961056$$

$$\beta_f = 257$$

$$I_C = \beta_f I_B = 5.1 \text{ mA}$$

Quindi la resistenza di uscita $\frac{1}{h_{OE}}$ si calcola come:

$$\frac{1}{h_{OE}} = \frac{100 - 20}{15 - 5} = 8 \text{ k}\Omega$$

La resistenza di uscita risulta abbastanza piccola. Questo è congruente con il drogaggio non elevato della base e del collettore.