Prova scritta del 28/01/09

ESERCIZIO 1

Il drogaggio della base di un BJT npn avviene per diffusione. La dose ottenuta nella fase di predep. vale $Q_B = 8 \times 10^{14}$ cm^{-2}. Il drive-in viene eseguito ad una T alla quale D_B vale 10^{-13} cm^{2}s^{-1} e per un tempo t_0 tale che la concentrazione superficiale risulti pari a 8×10^{18} cm^{-3}.

1) Calcolare la X_{BC} se il drogaggio dello strato epi è $N_D = 10^{15}$ cm^{-3}. [2 p.]

L'emettitore viene poi realizzato per impiantazione di As attraverso uno strato di ossido di spessore tale che il massimo del profilo si trovi all'interfaccia SiO$_2$/Si. $\Delta R_p = 0.08$ μm e la dose totale impiantata è $Q = 10^{15}$ cm^{-2}.

2) Calcolare la lunghezza metallurgica W della base. [5 p.]

3) Utilizzare la carta semilog allegata per disegnare il profilo di drogaggio netto del BJT. [3 p.]

ESERCIZIO 2

Dato un NMOS definito da: $N_A = 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_n = 750$ cm^2/Vs, $t_{ox} = 15$ nm, $W = 4$ μm, $L = 1$ μm:

1) calcolare la transconduttanza g_m per $V_{DS} = 0.1$ V. [3 p.]

2) Dimostrare che g_m può essere scritta come $g_m = C/\tau_t$ (C è la capacità del gate e τ_t il tempo di transito). [7 p.]

ESERCIZIO 3

Un transistore bipolare p^+np^+ ($\mu_h = 400$ cm^2/Vs, $\tau_h = 10^{-6}$ s, $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, S =1 mm^2, $W_{BASE} = 25$ μm) è polarizzato con $V_{EB} = V_{CB} = 0.5$ V.

1) Calcolare le correnti ai terminali, trascurando le regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta. [5 p.]

2) Si calcoli la carica immagazzinata in base integrando il profilo dei portatori minoritari. Assumendo poi che il transistore sia realizzato con un semiconduttore identico al silicio, ma con gap pari a 1.5 eV, determinare, in watt, la potenza ottica emessa (efficienza unitaria). [5 p.]

SOLUZIONE 1

Il profilo di drive-in è dato da

$$N_A(x) = \frac{Q_B}{\sqrt{\pi D_B t_0}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 D_B t_0}\right)$$

in cui $\frac{Q}{\sqrt{\pi D_B t_0}}$ rappresenta la concentrazione superficiale $N_A(0)$; segue

$$N_A(0) = \frac{Q_B}{\sqrt{\pi D_B t_0}}$$

da cui

$$t_0 = \frac{1}{\pi D_B}\left(\frac{Q_B}{N_A(0)}\right)^2 = \frac{1}{\pi \times 10^{-13}}\left(\frac{8 \times 10^{14}}{8 \times 10^{18}}\right)^2 = 3.18 \times 10^4 \text{ s};$$

noto t_0 si ottiene X_{BC} dall'equazione

$$N_A(0)\exp\left(-\frac{X_{BC}^2}{4D_Bt_0}\right)=N_D,$$

$$X_{BC}=\sqrt{4D_Bt_0\ln\left(\frac{N_A(0)}{N_D}\right)}=\sqrt{4\times10^{-13}\times3.18\times10^4\times\ln\left(\frac{8\times10^{18}}{10^{15}}\right)}=3.3\ \mu\text{m}.$$

2) Il profilo di impiantazione nel Si è

$$\begin{aligned}N_{As}(x) &= \frac{Q_{As}}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p}\exp\left(-\frac{x^2}{2\Delta R_p^2}\right)=\frac{10^{15}}{\sqrt{2\pi}\times0.08\times10^{-4}}\exp\left(-\frac{x^2}{2\Delta R_p^2}\right)=\\ &\quad 4.99\times10^{19}\times\exp\left(-\frac{x^2}{2\Delta R_p^2}\right);\end{aligned}$$

la coordinata X_{EB} si trova imponendo

$$4.99\times10^{19}\times\exp\left(-\frac{X_{EB}^2}{2\Delta R_p^2}\right)+N_D=8\times10^{18}\times\exp\left(-\frac{X_{EB}^2}{4D_Bt_0}\right)-N_D$$

dove si può trascurare N_D, dato che $2\Delta R_p^2<<4D_Bt_0$.

$$\frac{4.99\times10^{19}}{8\times10^{18}}=\exp\left(-\frac{X_{EB}^2}{4D_Bt_0}+\frac{X_{EB}^2}{2\Delta R_p^2}\right)$$

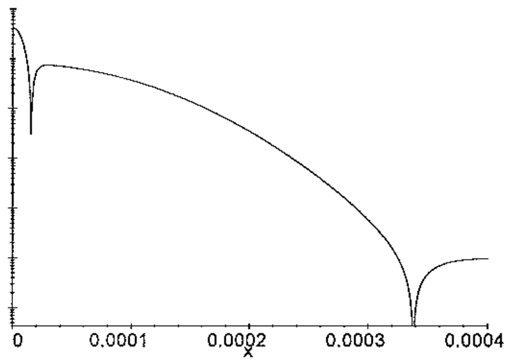
$$\frac{4.99\times10^{19}}{8\times10^{18}}=\exp\left(\frac{X_{EB}^2\left(2D_Bt_0-\Delta R_p^2\right)}{4D_Bt_0\Delta R_p^2}\right)$$

$$X_{EB}=\left(\frac{4\times10^{-13}\times3.18\times10^4\times\left(0.08\times10^{-4}\right)^2}{\left(2\times10^{-13}\times3.18\times10^4-\left(0.08\times10^{-4}\right)^2\right)}\ln\left(\frac{4.99\times10^{19}}{8\times10^{18}}\right)\right)^{\frac{1}{2}}=0.15\ \mu\text{m}$$

e infine

$$W=3.3-0.15=3.15\ \mu\text{m}.$$

3)



SOLUZIONE 2

1) Per definizione

$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}_{V_{DS0}};$$

in zona lineare ($V_{DS} = 0.1$ V)

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

$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{DS} = 750 \times 10^{-4} \times \frac{3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}}{15 \times 10^{-9}} \times 4 \times 0.1 = 6.9 \times 10^{-5} \text{ S}.$$

2) Nell'espressione di g_m compare il campo elettrico (costante) $\mathcal{E} = \frac{V_{DS}}{L}$

$$g_m = \mu_n C_{ox} W \frac{V_{DS}}{L} = \mu_n \mathcal{E} C_{ox} W = v_d C_{ox} W = \frac{L}{\tau_t} C_{ox} W = \frac{C}{\tau_t} \text{ cvd.}$$

SOLUZIONE 3

1) Si noti che la base non è propriamente corta. Infatti:

$$D_h = \frac{kT}{q} \mu_h = 1.036 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h} = 32.18\ \mu\text{m};$$

è necessario quindi determinare il profilo dei portatori minoritari dalla soluzione generica dell'equazione di continuità:

$$\delta p_n (x) = A e^{-\frac{x}{L_h}} + B e^{\frac{x}{L_h}}$$

con le condizioni a contorno in 0 e W (trascurando le regioni di svuotamento) determinate dalle condizioni di polarizzazione:

$$\delta p_n (0) = p_{n0} \left(e^{\frac{V_{EB}}{VT}} - 1 \right) = 5.45 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

$$\delta p_n (W) = p_{n0} \left(e^{\frac{V_{CB}}{VT}} - 1 \right) = 5.45 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

Quindi il profilo di portatori in base può essere calcolato risolvendo il sistema:

$$5.45 \times 10^{18} = A + B$$

$$5.45 \times 10^{18} = A e^{-\frac{W}{L_h}} + B e^{\frac{W}{L_h}} = 0.460 \times A + 2.175 \times B$$

che, svolgendo i conti, ha come soluzione:

$$A = 3.734 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

$$B = 1.716 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}.$$

A questo punto è possibile determinare le correnti di emettitore e di collettore dalle derivate in 0 e W del profilo dei portatori:

$$I_E = -SqD_h \left. \frac{\partial \delta p_n (x)}{\partial x} \right|_{x=0} = -SqD_h \left(-\frac{A}{L_h} + \frac{B}{L_h} \right) = 10.4\ \mu\text{A}$$

$$I_C = SqD_h \left. \frac{\partial \delta p_n (x)}{\partial x} \right|_{x=W} = SqD_h \left(-\frac{A}{L_h} e^{-\frac{W}{L_h}} + \frac{B}{L_h} e^{\frac{W}{L_h}} \right) = 10.4\ \mu\text{A}$$

Entrambe le correnti sono positive, che vuol dire entranti nel dispositivo. La corrente di base sarà la somma delle due, e sarà uscente (negativa):

$$I_B = -I_E - I_C = -20.80\ \mu\text{A}$$

2) La potenza ottica emessa è data dalle cariche che si ricombinano in base. La carica in base può essere determinata integrando il profilo dei portatori:

$$Q = Sq \int_0^W \delta p_n(x)\, dx$$

$$Q = Sq \int_0^W \left(Ae^{-\frac{x}{L_h}} + Be^{\frac{x}{L_h}} \right) dx$$

$$Q = Sq \left(-L_h A \left(e^{-\frac{W}{L_h}} - 1 \right) + L_h B \left(e^{\frac{W}{L_h}} - 1 \right) \right) = 2.066 \times 10^{-11}\ \text{C}$$

Il numero di ricombinazioni al secondo N è dato da:

$$N = \frac{1}{q} \frac{Q}{\tau_h}$$

e quindi la potenza ottica è pari a:

$$P_W = \frac{1}{q} \frac{Q}{\tau_h} E_{geV}\, q = \frac{Q}{\tau_h} E_g\,(\text{eV}) = 30.99\ \mu\text{W}.$$