

Prova scritta del 16/07/08

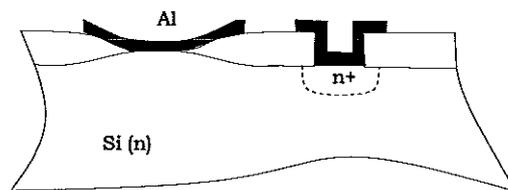
### ESERCIZIO 1

Una struttura MOS ( $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) ha un gate di poly  $n^+$ .

- 1) Calcolare lo spessore dell'ossido per il quale si ha nel silicio la condizione di inversione quando  $V_{GS} = 0$ ;
- 2) calcolare la coordinata alla quale il substrato è intrinseco.

### ESERCIZIO 2

Il dispositivo della figura viene realizzato con il processo LOCOS.



- 1) Descrivere i passi di processo necessari;
- 2) disegnare dopo ogni passo la struttura in sezione;
- 3) disegnare le maschere (fotoresist positivo);
- 4) dire infine di che dispositivo si tratta disegnandone la caratteristica  $I - V$  in scala semilogaritmica.

### ESERCIZIO 3

Un transistor bipolare  $npn$  ( $N_{ABase} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_{DColl} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , in tutto il transistor  $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\mu_n = 1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $\tau_p = \tau_n = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $W_{Base} = 3 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $S = 1 \text{ mm}^2$ ) è polarizzato in zona attiva diretta con  $V_{CB} = 5 \text{ V}$ ; le correnti di base e di collettore sono risultate  $I_C = 4 \text{ mA}$ ,  $I_B = 0.5 \text{ mA}$ .

Si trascuri la regione di svuotamento base-emettitore, e nel calcolo di  $\alpha_F$  si considerino almeno 6 cifre decimali dopo la virgola.

- 1) Si determini l'efficienza di emettitore.
- 2) Si determini l'eccesso di carica nella base alla giunzione emettitore-base e la tensione base-emettitore.

Suggerimento: si ricordi che  $I_B$  è composta da due termini.

- 3) Si determini il drogaggio dell'emettitore (l'emettitore è lungo).

## SOLUZIONE 1

1) Deve essere

$$0 = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\Psi_B}}{\varepsilon_{ox}} t_{ox} + 2\Psi_B + \Phi_{MS}$$

e quindi

$$t_{ox} = \frac{(-2\Psi_B - \Phi_{MS}) \varepsilon_{ox}}{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A 2\Psi_B}}$$

con

$$2\Psi_B = 2 \times 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{15}}{1.5 \times 10^{10}}\right) = 0.577 \text{ V}$$

e

$$\Phi_{MS} = -\frac{E_g}{q} + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) = -1.08 + 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{19}}{10^{15}}\right) = -0.841 \text{ V.}$$

$$t_{ox} = \frac{(-0.577 + 0.841) \times 3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}}{\sqrt{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21} \times 0.577}} = 65.6 \text{ nm.}$$

2) Si sa che in generale

$$n(x) = n_{p0} e^{\frac{q\Psi(x)}{kT}};$$

alla soglia  $\Psi(x)$  è dato dall'espressione (approssimazione di svuotamento completo)

$$\Psi(x) = \frac{qN_A(x - W)^2}{2\varepsilon_s}$$

per cui

$$n(x) = n_{p0} \exp\left(\frac{q^2 N_A (x - W)^2}{2\varepsilon_s kT}\right)$$

e quindi

$$n_i = n_{p0} \exp\left(\frac{q^2 N_A (x_i - W)^2}{2\varepsilon_s kT}\right)$$

con

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s 2\Psi_B}{qN_A}} = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.577}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}} = 0.869 \text{ } \mu\text{m.}$$

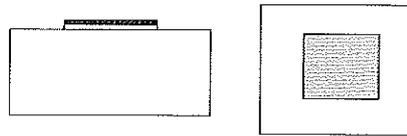
$$x_i = W - \sqrt{\frac{2\varepsilon_s kT}{q^2 N_A} \ln\left(\frac{n_i}{n_{p0}}\right)}$$

$$x_i = 0.869 \times 10^{-6} - \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.026}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21}}} \ln\left(\frac{1.5 \times 10^{10}}{2.25 \times 10^5}\right) = 0.256 \text{ } \mu\text{m.}$$

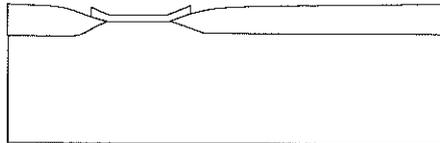
## SOLUZIONE 2

Una possibile sequenza di passi di processo è la seguente:

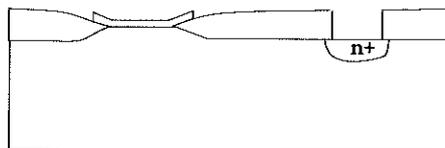
1) definizione dell' $\text{Si}_3\text{N}_4$  :



2) ossidazione LOCOS:



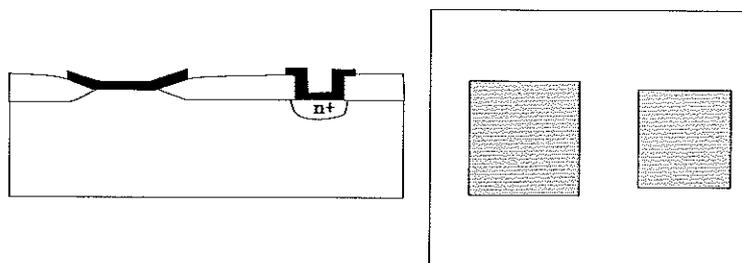
3) apertura della finestra  $n^+$  con attacco dry (pareti verticali) e impiantazione  $n^+$ :



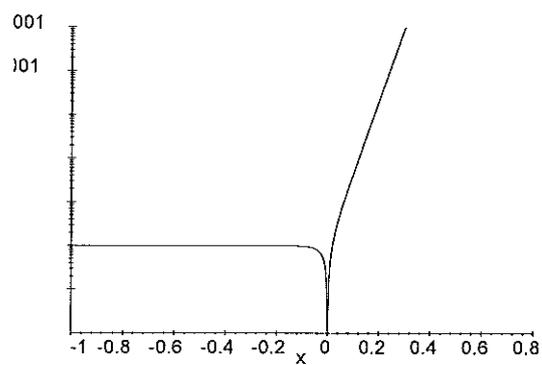
4) attacco dry selettivo per eliminare nitruro e pad oxide;

5) crescita di un ossido sacrificale e sua eliminazione in soluzione di HF;

6) deposizione di un film di Al e sua definizione:



Si tratta di un diodo Schottky la cui caratteristica su scala semilog è la seguente:



## SOLUZIONE 3

1) Dai dati del problema si può calcolare  $\beta_F$  e  $\alpha_F$ :

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} = 8$$

$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} = 0.888889.$$

Per determinare  $\gamma$  basta ricordare che  $\alpha_F = \gamma\alpha_T$ ; il fattore di trasporto può essere determinato dai dati del transistor. Per la lunghezza effettiva di base:

$$V_{0BC} = 0.659 \text{ V}$$

$$W_{BC} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{0BC} + V_{BC})}{qN_{D=A}}} 2 = 1.72 \text{ } \mu\text{m}$$

$$X_{BC} = \frac{W_{BC}}{2} = 0.86 \text{ } \mu\text{m}$$

$$W_{Beffettiva} = 3 - 0.86 = 2.14 \text{ } \mu\text{m}$$

$$L_n = \sqrt{kT/q\mu_n\tau_n} = 55.75 \text{ } \mu\text{m}$$

e quindi il fattore di trasporto:

$$\alpha_T = \frac{1}{1 + \frac{w^2}{2L_n^2}} = 0.999264$$

e l'efficienza di emettitore risulta:

$$\gamma = \frac{\alpha_F}{\alpha_T} = 0.8895$$

2) La tensione di emettitore (emettitore-base) è tale da sostenere la corrente di collettore, pari a 4 mA, dovuta al transito di portatori minoritari nella base. Quindi la corrente di base è composta dalla ricombinazione in base che comanda la corrente di collettore, come se il transistor avesse efficienza unitaria, e dalla componente di emissione dalla base all'emettitore. Se l'efficienza di emettitore fosse unitaria,  $\beta_F = \alpha_T / (1 - \alpha_T) = 1357$ , quindi molto grande. La corrente di base risulterebbe:

$$I_B = 2.95 \text{ } \mu\text{A}$$

Per il modello a controllo di carica avremmo:

$$I_B = \frac{Q}{\tau_n} = \frac{Sq\delta n(0) W_{Beff}}{2\tau_n}$$

e quindi:

$$\delta n(0) = \frac{2\tau_n I_B}{SqW_{Beff}} = 1.72 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

che è molto minore del drogaggio della base (ipotesi di bassa iniezione verificata).  
La tensione base-emettitore risulta dunque:

$$\delta n(0) = n_{p0} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right)$$

$$V_{BE} \approx V_T \ln \left( \frac{\delta n(0)}{n_{p0}} \right) = V_T \ln \left( \frac{\delta n(0)}{n_i^2} N_{ABase} \right) = 0.51 \text{ V}$$

3) La corrente di base è costituita per la massima parte dalla corrente iniettata dalla base nell'emettitore, e per una piccola parte ( $2.95 \mu\text{A}$ ) dalla ricombinazione in base. Avremo dunque:

$$\gamma = \frac{I_{En}}{I_{En} + I_{Ep}}$$

$$I_{Ep \text{ Base} \rightarrow \text{Emettitore}} = 0.5 \text{ mA}$$

Poichè l'emettitore è lungo:

$$I_{Ep} = qS \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right)$$

e quindi:

$$D_p = 1.04 \times 10^{-3}$$

$$L_p = 3.22 \times 10^{-5}$$

$$N_D = qS \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{I_{Ep}} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) = 8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$