Prova scritta del 25/06/08

ESERCIZIO 1

Ricordando che $\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-x^2\right) dx = \sqrt{\pi}$

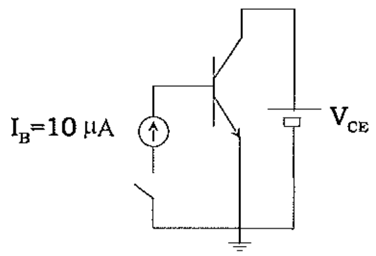
1) dato il profilo di drive-in $A \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$ *ricavare* l'espressione della costante A;

2) ripetere l'operazione per il profilo di impiantazione $A \exp\left(-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right)$.

3) Si supponga poi che in un processo di impiantazione di B attraverso uno strato di ossido risulti nel Si $R_p = 0$; $\Delta R_p = 0.07$ μm. A parità di dose nel Si e ad una $T = 1000$ °C ($D_{0B} = 0.75$ cm^{2}s^{-1}, $E_a = 3.5$ eV) quanto tempo sarebbe stato necessario con un processo di drive-in per ottenere lo stesso profilo ottenuto con l'impiantazione?

ESERCIZIO 2

Il BJT della figura, che per semplicità si suppone simmetrico, ha il drogaggio della base pari a 5×10^{16} cm^{-3} e una sezione $S = 100$ μm^2.



1) Con l'interruttore chiuso e $V_{CE} = 0$ ($W_B = 0.75$ μm, $\tau_n = 10^{-5}$ s).

a) disegnare il profilo dei minoritari nella base;

b) calcolare la V_{BE}.

2) Disegnare la caratteristica per piccoli valori di V_{CE}.

3) Con l'interruttore aperto svolgere a e b del punto precedente nel caso $V_{CE} > 0$.

ESERCIZIO 3

In una struttura MOS ideale ($t_{ox} = 50$ nm, substrato p con $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}) i tempi di generazione termica sono dell'ordine del minuto.

A $t = 0^+$ viene applicata una tensione $V_{GS} = 3$ V e un'illuminazione con luce verde ($\lambda = 500$ nm) di intensità pari a 3 mW/m^2.

1) Supponendo che l'eventuale carica mobile all'interfaccia Si/SiO$_2$ abbia un andamento esponenziale del tipo $n(x) = Ae^{-x/d}$, con $d = 2$ nm, eseguire un disegno quotato della carica fissa a $t = 0^+$; lo stesso disegno per la carica mobile a $t = 1$ s nell'ipotesi semplificativa che tutti gli elettroni fotogenerati in qiuesto intervallo siano raccolti all'interfaccia.

2) Calcolare la capacità differenziale per unità di superficie della struttura MOS a $t = 0^+$ e $t = 1$ s ad alta frequenza (tempo di misura dell'ordine di qualche microsecondo).

SOLUZIONE 1

1) L'integrale del profilo fra 0 e ∞ è la dose Q :

$$A\int_0^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)dx = Q$$

$$2\sqrt{Dt}A\int_0^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)d\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = Q$$

$$2\sqrt{Dt}A\frac{\sqrt{\pi}}{2} = Q;$$

segue immediatamente

$$A = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}.$$

2) Analogamente

$$A\int_{-\infty}^\infty \exp\left(-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right)dx = Q$$

$$A\sqrt{2}\Delta R_p\int_{-\infty}^\infty \exp\left(-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right)d\left(\frac{x-R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p}\right) = Q$$

$$A\sqrt{2}\Delta R_p\sqrt{\pi} = Q$$

$$A = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p}$$

3) Deve essere

$$\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}e^{-\frac{x^2}{4Dt}} = \frac{2Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p}e^{-\frac{x^2}{2\Delta R_p^2}}$$

dove si è tenuto conto nel calcolo di A che nel Si il profilo di impiantazione è ora una mezza gaussiana. Segue

$$Dt = \frac{\Delta R_p^2}{2}$$

e quindi

$$t = \frac{\Delta R_p^2}{2D}.$$

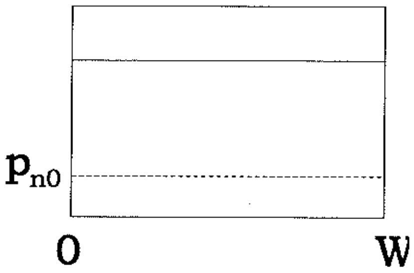
$$D = 0.75\times\exp\left(-\frac{3.5}{1273\times 8.63\times 10^{-5}}\right) = 1.09\times 10^{-14}\ \mathrm{cm^2 s^{-1}}$$

$$t = \frac{(0.07\times 10^{-4})^2}{1.09\times 10^{-14}} = \frac{4495}{3600}s = 1.25hr$$

SOLUZIONE 2

1)

a) Poiché $V_{CE} = 0$ si ha $V_{BE} = V_{BC}$; V_{BE} è > 0 e il profilo cercato sarà quello della figura.



b) I_B con il modello del controllo di carica è data dall'espressione

$$I_B = \frac{qS\delta n(0)W}{\tau_n}$$

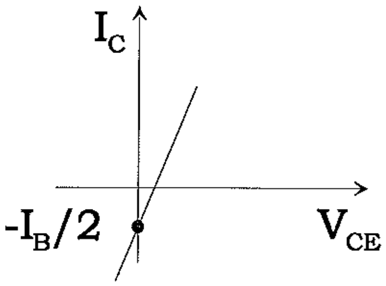
dalla quale

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

$$V_{BE} = V_T \ln\left(\frac{\tau_n I_B}{qSWn_{p0}} + 1\right)$$

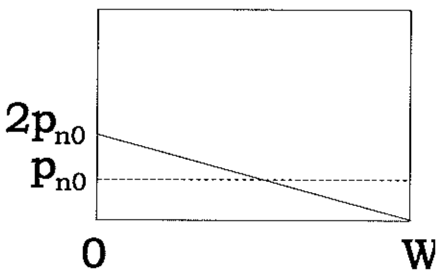
$$= 0.026 \times \ln\left(\frac{10^{-5} \times 10^{-5}}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{2} \times 10^{-12} \times 0.75 \times 10^{-6} \times 0.45 \times 10^{10}}\right) = 0.91 \text{ V}.$$

2) La caratteristica di uscita non passa per l'origine; infatti per $V_{CE} = 0$ $I_C = -I_B/2$ (il BJT è simmetrico) e quindi



3) La corrente di base è nulla; la giunzione CB è polarizzata inversamente, quella BE direttamente.

a)



b) deve essere

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

$$V_{BE} = 0.026 \times \ln 2 = 18 \text{ mV}.$$

SOLUZIONE 3

1) A $t = 0^+$ non c'è carica mobile, e la V_{GS} deve essere generata dalla carica fissa nel silicio, che si deve svuotare per una profondità opportuna (W_{0^+}):

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_s}{t_{ox}} = 6.906 \times 10^{-4} \text{ F/m}^2$$

$$V_{GS} = \frac{Q_W}{C_{OX}} + \psi_{\text{Si}}$$

$$Q_W = \sqrt{2\varepsilon_s q N_A \psi_{\text{Si}}}$$

quindi avremo l'equazione in ψ_{Si}:

$$V_{GS} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A \psi_{\text{Si}}}}{C_{OX}} + \psi_{\text{Si}}$$

facilmente risolvibile per $V_{GS} = 3$ V. Le due soluzioni sono:

$$\psi_{\text{Si}\,1} = 4.22 \text{ V}$$

$$\psi_{\text{Si}\,2} = 2.13 \text{ V}$$

dove la seconda soluzione è evidentemente quella accettabile. La regione di svuotamento risulta dunque:

$$W_{0^+} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A}\psi_{\text{Si}}} = 0.75 \ \mu\text{m}$$

La carica mobile a $t = 0^+$ è dunque nulla, mentre la carica fissa è quella dovuta alla regione di svuotamento W_{0^+} ($qN_A W_{0^+}$).

A $t = 1$ s la carica mobile sarà quella dovuta alla generazione ottica:

$$E_{fot} = \frac{hc}{\lambda} = 3.965 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$n_{fot/s} = \frac{P_{ottica}}{E_{fot}} = 7.57 \times 10^{15} \text{ fot./sm}^2$$

e quindi in un secondo la concentrazione di elettroni per unità di superficie è proprio 7.57×10^{15} m^{-2}. Dal momento che:

$$A \int_0^{+\infty} e^{-x/d} dx = Ad = 7.57 \times 10^{15}$$

$$A = \frac{2.52 \times 10^{15}}{d} = 3.78 \times 10^{24}\ \mathrm{m}^{-3}$$

Per quanto riguarda l'ampiezza della regione di svuotamento avremo adesso:

$$V_{GS} = \frac{Q_W + Q_n}{C_{OX}} + \psi_{\mathrm{Si}\,1s}$$

dove $Q_n = q \times 7.57 \times 10^{15}$. L'equazione da risolvere è simile alla precedente:

$$V_{GS} - \frac{Q_n}{C_{OX}} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A \psi_{\mathrm{Si}\,1s}}}{C_{OX}} + \psi_{\mathrm{Si}\,1s}$$

Risolvendo avremo ancora due soluzioni, e quella accettabile risulta $\psi_{\mathrm{Si}\,1s} = 0.73$ V. La regione di svuotamento W_1 risulta dunque:

$$W_1 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A}\psi_{\mathrm{Si}\,1s}} = 0.44\ \mu\mathrm{m}$$

2) In entrambi i casi, la capacità differenziale è data dalla serie della capacità dell'ossido e della capacità dovuta alla regione di svuotamento, poichè non si ha variazione di carica (ad alta frequenza anche la generazione ottica si può trascurare). A $t = 0^+$ risulta:

$$C_{W\,\mathrm{Si}} = \frac{\varepsilon_{\mathrm{Si}}}{W_{0+\mathrm{Si}}} = 1.41 \times 10^{-4}\ \mathrm{F/m^2}$$

$$C = \frac{C_{ox} C_{W\,\mathrm{Si}}}{C_{ox} + C_{W\,\mathrm{Si}}} = 1.17 \times 10^{-4}\ \mathrm{F/m^2}$$

mentre dopo un secondo la regione di svuotamento nel silicio si è ridotta per la presenza di cariche mobili:

$$C_{W\,\mathrm{Si}} = \frac{\varepsilon_{\mathrm{Si}}}{W_{1\,\mathrm{Si}}} = 2.39 \times 10^{-4}\ \mathrm{F/m^2}$$

$$C = \frac{C_{ox} C_{W\,\mathrm{Si}}}{C_{ox} + C_{W\,\mathrm{Si}}} = 1.78 \times 10^{-4}\ \mathrm{F/m^2}$$