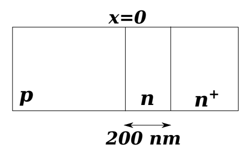
DE e DTE: PROVA SCRITTA DEL 3 Settembre 2015

ESERCIZIO 1 (DE,DTE)

In una giunzione pn la parte n è realizzata come in figura: $N_D = 10^{16}$ cm^{-3} per $0 < x < 0.2$ μm, $N_D = 10^{19}$ cm^{-3} (n^+) per $x > 0.2$ μm.



1) Verificare che per $N_A = 10^{15}$ cm^{-3} la regione di svuotamento si trova tutta nella zona poco drogata.[2]

Per $N_A = 10^{19}$ cm^{-3} (p^+):

2) Verificare che la regione di svuotamento non è tutta nella zona poco drogata, e calcolare il nuovo valore di V_0. [3]

3) Determinare l'andamento del campo elettrico nella regione di svuotamento, calcolandolo per $x = 0$ e $x = 0.2$ μm. SUGGERIMENTO: Trascurare la penetrazione del campo elettrico nelle zone fortemente drogate ($\varepsilon = 0$ per $x < 0$ e $x > 0.2$ μm).[5]

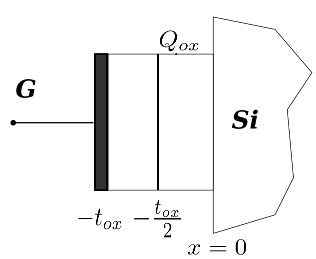
ESERCIZIO 2 (DE,DTE)

Un condensatore n-MOS ideale ha $N_A = 10^{16}$ cm^{-3} e $t_{ox} = 30$ nm. Con un apposito processo, una carica Q_{ox} (Colomb/m^2) viene posta in uno strato molto sottile a metà dell'ossido (vedi figura).

1) Facendo uso del teorema di Gauss, determinare l'espressione del campo elettrico, in funzione di Q_{ox} e di Q_{Si}, per $-\frac{t_{ox}}{2} < x < 0$ e per $-t_{ox} < x < -\frac{t_{ox}}{2}$.[4]

2) Determinare l'espressione della V_{GS}, in funzione di Q_{ox} e di Q_{Si}.[3]

3) Determinare Q_{ox} affinchè $V_{TH} = 5$ V.[3]



ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Ricavare e descrivere la caratteristica $I - V$ per una giunzione pn illuminata uniformemente, e disegnare il grafico per diversi valori di intensità luminosa. [5]

2) Descrivere un processo per la realizzazione di una cella solare. [5]

ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura Q è un transistore bipolare n^+pn con $N_{A\ Base} = N_{D\ Collettore} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ e $W_{metallurgica} = 3$ μm. La tensione di ingresso V_i è pari a 5 V ($V_i = 5$ V).

1) Per $V_u = 3$ V e $V_{BE} \simeq 0.6$ V, determinare il β_f e la resistenza R_B (trascurare le regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta).[4]

2) Considerando il β_f minimo garantito che il transistore può fornire, calcolare R_B affinchè il transistore sia al limite della saturazione con $V_{CE} \simeq V_{BE} = 0.3$ V.[4]

3) Determinare la tensione di uscita per $V_i = 0$ V. [2]

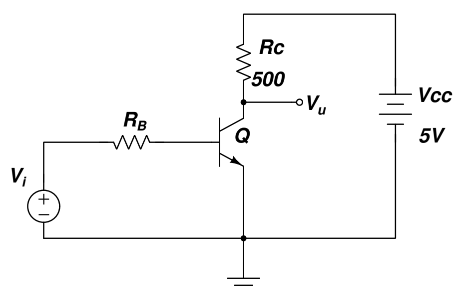
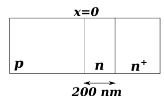


Figura 1: circuito

ESERCIZIO 1 (DE,DTE) In una giunzione pn la parte n è realizzata come in figura: $N_D = 10^{16}$ cm^{-3} per $0 < x < 0.2$ μm, $N_D = 10^{19}$ cm^{-3} (n^+) per $x > 0.2$ μm.

1) Verificare che per $N_A = 10^{15}$ cm^{-3} la regione di svuotamento si trova tutta nella zona poco drogata.[2]

Per $N_A = 10^{19}$ cm^{-3} (p^+):



2) Verificare che la regione di svuotamento non è tutta nella zona poco drogata, e calcolare il nuovo valore di V_0. [3]

3) Determinare l'andamento del campo elettrico nella regione di svuotamento, calcolandolo per $x = 0$ e $x = 0.2$ μm. SUGGERIMENTO: Trascurare la penetrazione del campo elettrico nelle zone fortemente drogate ($\varepsilon = 0$ per $x < 0$ e $x > 0.2$ μm).[5]

SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo V_0 e l'ampiezza della regione di svuotamento:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_T ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} = 0.635 \ \ \text{V} \\ W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_D}+\frac{1}{N_A}\right)V_0} = 0.958 \ \ \mu\text{m} \\ x_n &= W\frac{N_A}{N_D+N_A} = 87 \ \ \text{nm} \end{aligned}$$

È quindi evidente che la regione di svuotamento si trova nella regione poco drogata, poichè $x_n = 0.087 < 0.2$ μm.

2) Ricalcoliamo il V_0 e la regione di svuotamento con il nuovo drogaggio, supponendo che stia tutta nella zona poco drogata:

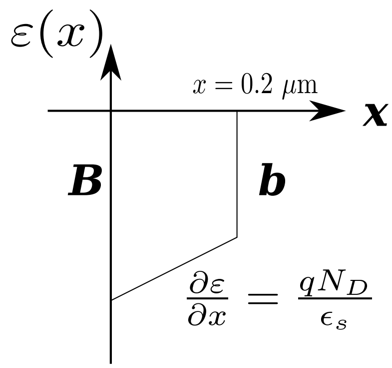
$$\begin{aligned} V_0 &= V_T ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} = 0.873 \ \ \text{V} \\ W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}V_0} = 0.363 \ \ \mu\text{m} \\ x_n &= W \end{aligned}$$

Quindi adesso la regione di svutamento va ad interessare anche la parte n^+. Di conseguenza avremo che:

$$V_0 = V_T ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} = 1.05 \ \ \text{V} \tag{1}$$

La V_0 è molto prossima all'ampiezza del gap E_g/q, poichè entrambi i semiconduttori sono fortemente drogati.

3) L'andamento del campo elettrico è trapezoidale (vedi figura), e l'area del trapezio deve essere pari a V_0. Avremo anche che la pendenza del campo elettrico $\partial\varepsilon/\partial x$ è data (in valore assoluto) dal drogaggio: $\frac{\partial\varepsilon}{\partial x} = \frac{qN_D}{\epsilon_s}$ Avremo



dunque ($\varepsilon(0) = B$ e $\varepsilon(0.2 \times 10^{-6}) = b$):

$$\begin{aligned} \frac{B+b}{2} 0.2 \times 10^{-6} &= V_0 \\ b &= B - \frac{qN_D}{\epsilon_s}\, 0.2 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

Risolvendo il sistema avremo:

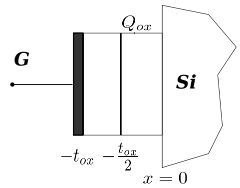
$$\begin{aligned} \varepsilon(0) &= B = 6.770 \ \text{ MV/m} \\ \varepsilon(0.2\ \mu\text{m}) &= b = 3.7290 \ \text{ MV/m} \end{aligned}$$

ESERCIZIO 2 (DE,DTE) Un condensatore n-MOS ideale ha $N_A = 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ e $t_{ox} = 30$ nm. Con un apposito processo, una carica Q_{ox} (Colomb/m^2) viene posta in uno strato molto sottile a metà dell'ossido (vedi figura).

1) Facendo uso del teorema di Gauss, determinare l'espressione del campo elettrico, in funzione di Q_{ox} e di Q_{Si}, per $-\frac{t_{ox}}{2} < x < 0$ e per $-t_{ox} < x < -\frac{t_{ox}}{2}$.[4]

2) Determinare l'espressione della V_{GS}, in funzione di Q_{ox} e di Q_{Si}.[3]

3) Determinare Q_{ox} affinchè $V_{TH} = 5$ V.[3]



SOLUZIONE 2

1) Per $-\frac{t_{ox}}{2} < x < 0$ avremo che il campo elettrico è costante con x poichè la carica è nulla. Applicando il teorema di Gauss ad un cilindro con una superficie nel bulk del silicio avremo:

$$\varepsilon(x) = -\frac{Q_{Si}}{\epsilon_{ox}} \quad \text{per} \quad -\frac{t_{ox}}{2} < x < 0 \tag{2}$$

Per $-t_{ox} < x < -\frac{t_{ox}}{2}$, applicando sempre il teorema di Gauss, avremo che la carica totale è pari alla somma di Q_{ox} e di Q_{Si}. Quindi:

$$\varepsilon(x) = -\frac{Q_{Si} + Q_{ox}}{\epsilon_{ox}} \quad \text{per} \quad -t_{ox} < x < -\frac{t_{ox}}{2} \tag{3}$$

2) Per ottenere V_{GS} basta sommare la caduta nell'ossido e la caduta nel silicio V_{Si} (o ψ_S).

$$V_{GS} = V_{ox} + V_{Si} \tag{4}$$

La caduta nell'ossido può essere ottenuta integrando il campo elettrico, calcolato al punto precedente. Avremo:

$$V_{GS} = -\frac{Q_{Si}}{\epsilon_{ox}} t_{ox} - \frac{Q_{ox}}{\epsilon_{ox}} \frac{t_{ox}}{2} + V_{Si} \tag{5}$$

che può essere scritta come:

$$V_{GS} = -\frac{Q_{Si}}{C_{ox}} + V_{Si} - \frac{1}{2}\frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + V_{Si} \tag{6}$$

3) Per $V_{GS} = V_{TH}$ dovremo avere $V_{Si} = 2\psi_B$, e quindi $Q_{Si} = -\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}$. Avremo dunque:

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \frac{1}{2}\frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \tag{7}$$

Calcolando i valori:

$$\psi_B = V_T ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347$$
$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2$$

Quindi avremo:

$$V_{TH\ id} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B = 1.11 \quad \text{V}$$
$$Q_{ox} = -2C_{ox}\left(V_{TH} - V_{TH\ id}\right) = -8.93 \times 10^{-3} \quad \text{C/m}^2$$

ESERCIZIO 3 (DTE)

1) Ricavare e descrivere la caratteristica $I - V$ per una giunzione *pn* illuminata uniformemente, e disegnare il grafico per diversi valori di intensità luminosa. [5]

2) Descrivere un processo per la realizzazione di una cella solare. [5]

SOLUZIONE 3

1) e 2) Si rimanda alla dispensa del Prof. Diligenti.

ESERCIZIO 4 (DE) Nel circuito in figura Q è un transistore bipolare n^+pn con $N_A = N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ e $W_{metallurgica} =$ 3 μm. La tensione di ingresso V_i è pari a 5 V ($V_i = 5$ V).

1) Per $V_u = 3$ V e $V_{BE} \simeq 0.6$ V, determinare il β_f e la resistenza R_B (trascurare le regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta).[4]

2) Considerando il β_f minimo garantito che il transistore può fornire, calcolare R_B affinchè il transistore sia al limite della saturazione con $V_{CE} \simeq V_{BE} = 0.3$ V.[4]

3) Determinare la tensione di uscita per $V_i = 0$ V. [2]

SOLUZIONE 4

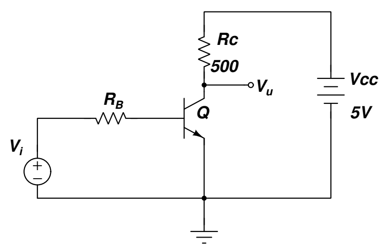


Figura 2: circuito

1) Per calcolare β_f bisogna calcolare α_f, determinando la lunghezza effettiva di base W. La tensione $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = V_u - V_{BE} = 2.4$ V. Quindi:

$$
\begin{aligned}
V_{0BC} &= V_T ln \frac{N_{D\ Coll} N_{A\ Base}}{n_i^2} = 0.695 \quad \text{V} \\
W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_{D\ Coll}} + \frac{1}{N_{A\ Base}}\right)(V_0 + 2.4)} = 0.902 \quad \mu\text{m} \\
x_p = x_n &= \frac{W}{2} = 451 \quad \text{nm} \\
W_{eff} &= W - x_p = 2.549 \quad \mu\text{m} \\
D_n &= V_T \mu_n = 2.59 \times 10^{-3} \qquad \text{m}^2/\text{s} \\
L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.89 \qquad \mu\text{m} \\
\alpha_f = \alpha_T &= \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_n^2}} = 0.998747 \\
\beta_f &= \frac{\alpha_f}{1 - \alpha_f} = 797
\end{aligned}
$$

La corrente di collettore $I_C = \frac{V_{CC} - V_u}{R} = 4$ mA, quindi la corrente di base deve essere $I_B = I_C/\beta_f = 5$ μA. Avremo dunque:

$$
\begin{aligned}
V_i &= R_B I_B + V_{BE} \\
R_B &= \frac{V_i - V_{BE}}{I_B} = 880 \quad \text{k}\Omega
\end{aligned}
$$

2) Il β_f minimo che può garantire il transistore è quello che si ottiene considerando la lunghezza metallurgica di base. Infatti, essendo sempre

$W_{effettiva} < W_{metallurgica}$, avremo che in ogni condizione di polarizzazione $\beta_f > \beta_{f\ minimo}$. Quindi:

$$\begin{aligned}
\alpha_f = \alpha_T &= \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_n^2}} = 0.998265 \\
\beta_{f\ minimo} &= \frac{\alpha_f}{1 - \alpha_f} = 575
\end{aligned}$$

Avremo dunque:

$$\begin{aligned}
I_C &= \frac{V_{CC} - V_u}{R} = 8.8 \ \ \text{mA} \\
I_B &= \frac{I_C}{\beta_f} = 15.3 \ \ \mu\text{A} \\
R_B &= \frac{V_i - 0.6}{I_B} = 287 \ \ \text{k}\Omega
\end{aligned}$$

3) Se $V_i = 0$ il transistore è interdetto, perciò $I_C = 0$ e $V_u = V_{CC}$.