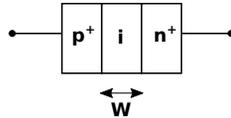


PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 20 Luglio 2022

ESERCIZIO 1

In figura è rappresentata una struttura p^+in^+ , dove i sta per intrinseco, $W = 5 \mu\text{m}$, $S = 1 \text{ mm}^2$.



- 1) Per $V = 0$ determinare l'andamento del campo elettrico e del potenziale. [4]
- 2) Per $V = -5 \text{ V}$ determinare l'andamento del campo elettrico e del potenziale. [3]
- 3) La parte centrale i viene illuminata in maniera tale da avere una generazione ottica $G_{opt} = 10^{16}$ coppie al cm^3 al secondo. Determinare la corrente ai terminali del diodo, con $V = -5 \text{ V}$. [3]

ESERCIZIO 2

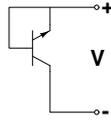
Un condensatore n -MOS ideale ha $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$. Nell'ossido sono presenti dei difetti, uniformemente distribuiti con una concentrazione $N_{dif} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

- 1) Per $V_{GS} = V_{TH}$ determinare l'andamento del campo elettrico e della tensione nel silicio. Determinare inoltre un'espressione per $n(x)$. [3]
- 2) Nel caso in cui i difetti siano carichi negativamente, determinare l'andamento del campo elettrico e della tensione nell'ossido. [5]
- 3) Determinare la tensione di soglia e indicare come si modifica nel caso che il gate sia in polisilicio. [2]

ESERCIZIO 3

Un transistor bipolare n^+pn con $N_{Abase} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{Dcollettore} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, collettore lungo, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $W_{met} = 3 \mu\text{m}$, $S=1 \text{ mm}^2$, ha la base e l'emettitore cortocircuitato (vedi figura).

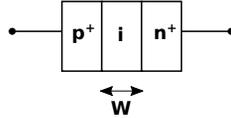
- 1) Determinare la corrente per $V = -5 \text{ V}$ (segno come in figura).[3]
- 2) Determinare la corrente per $V = 0.5 \text{ V}$. [4]



- 3) Determinare la resistenza e la capacità differenziali per $V = 0.5$ V. [3]
NOTA: considerare il contatto di base molto vicino alla giunzione base-emettitore. Inoltre, le ampiezze delle regioni di svuotamento non si possono trascurare.

ESERCIZIO 1

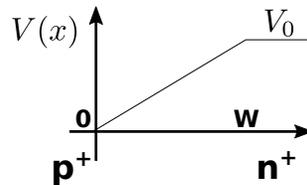
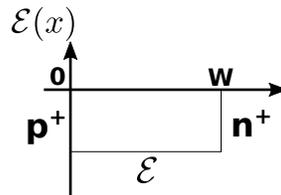
In figura è rappresentata una struttura p^+in^+ , dove i sta per intrinseco, $W = 5 \mu\text{m}$, $S = 1 \text{ mm}^2$.



- 1) Per $V = 0$ determinare l'andamento del campo elettrico e del potenziale. [4]
- 2) Per $V = -5 \text{ V}$ determinare l'andamento del campo elettrico e del potenziale. [3]
- 3) La parte centrale i viene illuminata in maniera tale da avere una generazione ottica $G_{opt} = 10^{16}$ coppie al cm^3 al secondo. Determinare la corrente ai terminali del diodo, con $V = -5 \text{ V}$. [3]

SOLUZIONE 1

1) Tra la zona p^+ e la zona n^+ si instaura una differenza di potenziale di contatto pari a $V_0 = E_G/q = 1.12 \text{ V}$. Il campo elettrico penetra pochissimo nelle zone p^+ e n^+ . Nella parte centrale i intrinseca non ci sono cariche, quindi il campo elettrico \mathcal{E} è costante, come schematicamente rappresentato in figura:



Avremo dunque:

$$\begin{aligned} V_0 &= \mathcal{E} \times W \\ \mathcal{E} &= \frac{V_0}{W} = 224 \text{ kV/m} \end{aligned}$$

Sempre in figura, è rappresentato il potenziale che varia linearmente da 0, sulla parte p^+ assunta come riferimento, a V_0 sulla parte n^+ .

2) La situazione è equivalente a prima, solo che adesso c'è la polarizzazione esterna. Ripetendo gli stessi conti:

$$V_0 + |V| = \mathcal{E} \times W$$

$$\mathcal{E} = \frac{V_0 + |V|}{W} = 1.224 \text{ MV/m}$$

Il potenziale è lineare come nel punto 1), salvo il valore finale pari a $V_0 + |V| = 6.12 \text{ V}$.

3) Tutte le lacune e gli elettroni generati, sotto l'effetto del campo elettrico, vengono portati immediatamente sulla parte n^+ (gli elettroni) e sulla parte p^+ (le lacune). Quindi la corrente totale sarà pari a 2 volte la quantità di portatori totali:

$$I = 2qG_{opt} \text{ Vol}$$

$$I = 2qG_{opt}W S = 16 \text{ nA}$$

ESERCIZIO 2

Un condensatore n -MOS ideale ha $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$. Nell'ossido sono presenti dei difetti, uniformemente distribuiti con una concentrazione $N_{dif} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

- 1) Per $V_{GS} = V_{TH}$ determinare l'andamento del campo elettrico e della tensione nel silicio. Determinare inoltre un'espressione per $n(x)$. [3]
- 2) Nel caso in cui i difetti siano carichi negativamente, determinare l'andamento del campo elettrico e della tensione nell'ossido. [5]
- 3) Determinare la tensione di soglia e indicare come si modifica nel caso che il gate sia in polisilicio. [2]

SOLUZIONE 2

1) Per $V_{GS} = V_{TH}$ la caduta di tensione nel silicio è pari a $2\psi_B$, il campo elettrico varia linearmente da $\mathcal{E}(0^+) = 0$ in $W(2\psi_B)$ e il potenziale varia

parabolicamente da $2\psi_B$ sulla superficie a 0 in $W(2\psi_B)$: Quindi:

$$\begin{aligned}
 \psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\
 V(0) &= 2\psi_B \\
 W(2\psi_B) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}} 2\psi_B = 0.302 \text{ } \mu\text{m} \\
 \mathcal{E}(0^+) &= W(2\psi_B) = 4.59 \text{ MV/m} \\
 \mathcal{E}(x) &= \frac{qN_a}{\epsilon_s} (W - x) \quad 0 < x < W \\
 V(x) &= \frac{qN_a}{2\epsilon_s} (W - x)^2
 \end{aligned}$$

La concentrazione di $n(x)$ varia dalla superficie fino a $x = W$ con l'espressione (vedi dispense):

$$n(x) = n_0 e^{\frac{V(x)}{V_T}} \quad (1)$$

2) Il campo elettrico nell'ossido è pari a:

$$\mathcal{E}(0^-) = \mathcal{E}(0^+) \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} = 3\mathcal{E}(0^+) = 13.78 \text{ MV/m} \quad (2)$$

Poichè la carica è distribuita uniformemente, il campo elettrico aumenta tra 0 e $-t_{ox}$. q è da intendersi in valore assoluto, infatti dall'applicazione del teorema di Gauss risulta che il campo elettrico aumenta di una quantità positiva se la carica è negativa, x è negativo:

$$\mathcal{E}(x) = \mathcal{E}(0) - \frac{qN_{dif}}{\epsilon_{ox}} x \quad -t_{ox} < x < 0 \quad (3)$$

È massimo sul Gate, e pari a $\mathcal{E}(-t_{ox}) = \mathcal{E}(0) + \frac{qN_{dif}}{\epsilon_{ox}} t_{ox} = 13.92 \text{ MV/m}$. Il potenziale si può ottenere integrando l'andamento del campo elettrico per x tra $-t_{ox}$ e 0, e sapendo che $V(0) = 2\psi_B$:

$$\begin{aligned}
 V(x) &= \int_x^0 \mathcal{E}(x) dx + V(0) \\
 V(x) &= V(0) - \mathcal{E}(0)x + \frac{qN_{dif}}{\epsilon_{ox}} \frac{x^2}{2} \\
 V(x) &= 2\psi_B - \mathcal{E}(0)x + \frac{qN_{dif}}{\epsilon_{ox}} \frac{x^2}{2} \\
 V(x = -t_{ox}) &= 1.11 \text{ V}
 \end{aligned}$$

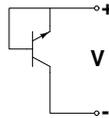
Da notare che $V(x = -t_{ox}) = V_{TH}$ del condensatore MOS considerando la carica nell'ossido.

3) Avremo che:

$$\begin{aligned}\Phi_{MS} &= -\left(\frac{E_g}{2q} + \psi_B\right) = 0.907 \text{ V} \\ V_{TH \Phi_{MS}} &= V_{TH_{ox}} + \Phi_{MS} = 0.193 \text{ V}\end{aligned}$$

ESERCIZIO 3

Un transistor bipolare n^+pn con $N_{Abase} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{Dcollettore} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, collettore lungo, $\mu_n = 0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $W_{met} = 3 \text{ }\mu\text{m}$, $S=1 \text{ mm}^2$, ha la base e l'emettitore cortocircuitato (vedi figura).



- 1) Determinare la corrente per $V = -5 \text{ V}$ (segno come in figura).[3]
- 2) Determinare la corrente per $V = 0.5 \text{ V}$. [4]
- 3) Determinare la resistenza e la capacità differenziali per $V = 0.5 \text{ V}$. [3]

NOTA: considerare il contatto di base molto vicino alla giunzione base-emettitore. Inoltre, le ampiezze delle regioni di svuotamento non si possono trascurare.

SOLUZIONE 3

1) Dato che $V_{BE} = 0$ avremo che il dispositivo si riduce alla giunzione base-collettore, che si comporta come un diodo con una base lunga (il collettore), e una base corta (la base): Per $V = -5 \text{ V}$ la giunzione base-collettore è polarizzata in inversa, e avremo ($N_A = N_{Abase}$, $N_D = N_{Dcollettore}$):

$$V_{0BC} = V_T \ln \frac{N_{Abase} N_{Dcollettore}}{n_i^2} = 0.675 \text{ V}$$

$$\begin{aligned}
W_{BC} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{0BC} + 5)} = 1.50 \text{ } \mu\text{m} \\
x_{BC}(5 \text{ V}) &= W_{BC} \frac{N_D}{N_A + N_D} = 0.5 \text{ } \mu\text{m} \\
V_{0BE} &= V_T \ln \frac{N_{Abase} N_D^+}{n_i^2} = 0.872 \text{ V} \\
W_{BE} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q N_A} V_{0BE}} = 0.34 \text{ } \mu\text{m} \\
W_{eff} &= 3 - 0.5 - 0.34 = 2.16 \text{ } \mu\text{m} \\
I(-5) &= -I_{SC} = -qS \left(\frac{D_n}{W_{eff}} \frac{n_i^2}{N_{Abase}} + \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_{Dcoll}} \right) \\
D_n &= \frac{kT}{q} \mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{s} \\
D_p &= \frac{kT}{q} \mu_p = 1.034 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{s} \\
L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 32.15 \text{ } \mu\text{m} \\
I(-5) &= -I_{SC} = -4.54 \text{ pA}
\end{aligned}$$

2) Per $V = 0.5 \text{ V}$ la giunzione base-collettore (pn) è polarizzata in diretta. Cambia solo la W_{eff} per il calcolo della $I_S = I_{SC}$:

$$\begin{aligned}
W_{BC} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{0BC} - 0.5)} = 0.26 \text{ } \mu\text{m} \\
x_{BC}(5 \text{ V}) &= W_{BC} \frac{N_D}{N_A + N_D} = 0.087 \text{ } \mu\text{m} \\
W_{eff} &= 3 - 0.5 - 0.087 = 2.41 \text{ } \mu\text{m} \\
I_S = I_{SC} &= qS \left(\frac{D_n}{W_{eff}} \frac{n_i^2}{N_{Abase}} + \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_{Dcoll}} \right) = 4.1 \text{ pA} \\
I &= I_S e^{\frac{V}{V_T}} = 1.03 \text{ mA}
\end{aligned}$$

3) La resistenza differenziale ha la solita espressione, riportata nelle dispense:

$$r_d = \frac{V_T}{I} = 25 \text{ } \Omega \quad (4)$$

Le capacità differenziali sono quella dovuta alla regione di svuotamento base-collettore:

$$C_W = \frac{\epsilon_s}{W_{CB}} S = 405 \text{ pF} \quad (5)$$

e quella dovuta all'iniezione delle lacune nel collettore, che è lungo. Indichiamo con Q_p la carica dovuta all'iniezione delle lacune nel collettore:

$$Q_p = qSL_p \frac{n_i^2}{N_{Dcoll}} e^{\frac{V}{V_T}}$$
$$C_{diff} = \frac{dQ_p}{dV} = \frac{1}{V_T} qSL_p \frac{n_i^2}{N_{Dcoll}} e^{\frac{V}{V_T}} = 2.25 \text{ nF}$$

La giunzione base-emettitore non influisce, perché è cortocircuitata, e l'iniezione nella base non influisce (è trascurabile) sulla capacità perché è corta.