

PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 5 giugno 2024

ESERCIZIO 1

Per una giunzione pn⁺ caratterizzata da drogaggio pari a $p = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$:

1. Si calcoli l'ampiezza W della zona di svuotamento, si tracci il grafico del campo elettrico e si calcoli il valore del campo elettrico massimo nell'ipotesi di svuotamento completo. Si ripeta il calcolo per tensione inversa applicata pari a 5V. (2)

In corrispondenza a $\bar{x}_p = 400 \text{ nm}$, il semiconduttore viene drogato fino a diventare p⁺. (Si consideri la stessa V_0 del punto precedente)

2. Si valuti la variazione del grafico del campo elettrico in zona di svuotamento e quale sia il valore massimo ottenuto, per $V=0$. (3)
3. Si valuti la variazione del grafico del campo elettrico in zona di svuotamento e quale sia il valore massimo ottenuto per $V=-5V$.(5)

ESERCIZIO 2

Si consideri un transistor n -MOS polysilicon gate, con $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $t_{ox} = 20 \text{ nm}$, $L = W = 3 \text{ }\mu\text{m}$. La tensione di soglia, con $V_{SBulk} = V_{SB} = 0$, è risultata pari a 1 V. Il transistor viene polarizzato con $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 3.5 \text{ V}$.

1. Determinare la carica nell'ossido all'interfaccia ossido-silicio, la corrente I_{DS} per $V_{SB} = 0$, nonché la carica mobile nel canale per $y = 0$ e per $y = L$. [3]
2. Per $V_{SB} = 15 \text{ V}$, si determini la tensione del punto P di strozzamento rispetto al Source e rispetto al substrato, la lunghezza effettiva di canale, la corrente I_{DS} e la carica Q_n per $y = 0$ e per $y = L$. [4]
3. Si determini la tensione V_{SB} affinché il transistor sia esattamente alla saturazione. [3]

ESERCIZIO 3

Un transistor bipolare p^+np ha la base $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, il collettore $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $S = 1 \text{ mm}^2$. Il transistor viene polarizzato con $V_{EB} = 0.55 \text{ V}$, $V_{EC} = 5 \text{ V}$ e viene misurata $I_B = 10 \text{ }\mu\text{A}$.

1. Determinare le correnti ai terminali, nonché la lunghezza metallurgica della base. [3]

2. Il transistor si scalda, e raggiunge una temperatura di 350 K. Calcolare le correnti ai terminali. Si considerino la mobilità ed il tempo di vita medio dei minoritari costanti con la temperatura. (Si consideri valida l'approssimazione di bassa iniezione) [4]
3. A temperatura ambiente, determinare le capacità parassite della giunzione base-emettitore e base-collettore dovute allo svuotamento e alla diffusione (anche se molto piccole). [3]

ESERCIZIO 1 Per una giunzione pn⁺ caratterizzata da drogaggio pari a $p = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$:

1. Si calcoli l'ampiezza W della zona di svuotamento, si tracci il grafico del campo elettrico e si calcoli il valore del campo elettrico massimo nell'ipotesi di svuotamento completo. Si ripeta il calcolo per tensione inversa applicata pari a 5V. (2)

In corrispondenza a $\bar{x}_p = 400 \text{ nm}$, il semiconduttore viene drogato fino a diventare p⁺. (Si consideri la stessa V_0 del punto precedente)

2. Si valuti la variazione del grafico del campo elettrico in zona di svuotamento e quale sia il valore massimo ottenuto, per $V=0$. (3)
3. Si valuti la variazione del grafico del campo elettrico in zona di svuotamento e quale sia il valore massimo ottenuto per $V=-5V$.(5)

SOLUZIONE 1

1) Si ricava:

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.870 \text{ V}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{1}{N_A} V_0} = 0.337 \text{ } \mu\text{m}$$

$$E_{MAX} = \frac{2V_0}{W} = 5.17 \text{ MV/m}$$

Per $V = -5V$:

$$W(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{1}{N_A} (V_0 - V)} = 0.875 \text{ } \mu\text{m}$$

$$E_{MAX} = \frac{2(V_0 - V)}{W(V)} = 13.4 \text{ MV/m}$$

2) La zona di svuotamento si estende nella zona p per una quantità circa pari all'ampiezza della zona di svuotamento $W = 0.337 \text{ } \mu\text{m}$. La zona p⁺ inserita a 400 nm dall'interfaccia non determina variazioni nel campo elettrico per tensione applicata nulla.

3) Per $V = -5 \text{ V}$ la zona di svuotamento $W(V)$ si estende oltre l'ascissa \bar{x}_p in cui il semiconduttore viene drogato p⁺.

Il campo elettrico si annulla in corrispondenza all'ascissa \bar{x}_p . Considerando costante la tensione applicata $V_0 - V$, il campo elettrico massimo $\overline{E_{MAX}}$ si ricava dal calcolo

dell'area del trapezio che ha per base maggiore $\overline{E_{MAX}}$, per base minore $\overline{E_{MAX}} - \frac{qN_A}{\epsilon_S}(\overline{x_p})$ e per altezza $\overline{x_p}$:

$$(V_0 - V) = (\overline{E_{MAX}} + \overline{E_{MAX}} - \frac{qN_A}{\epsilon_S}(\overline{x_p}))\frac{\overline{x_p}}{2};$$

$$\overline{E_{MAX}} = 17.76 \text{ MV/m.}$$

ESERCIZIO 2 Si consideri un transistoro n -MOS polysilicon gate, con $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $t_{ox} = 20 \text{ nm}$, $L = W = 3 \text{ }\mu\text{m}$. La tensione di soglia, con $V_{SBulk} = V_{SB} = 0$, è risultata pari a 1 V. Il transistoro viene polarizzato con $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 3.5 \text{ V}$.

1. Determinare la carica nell'ossido all'interfaccia ossido-silicio, la corrente I_{DS} per $V_{SB} = 0$, nonché la carica mobile nel canale per $y = 0$ e per $y = L$. [3]
2. Per $V_{SB} = 15 \text{ V}$, si determini la tensione del punto P di strozzamento rispetto al Source e rispetto al substrato, la lunghezza effettiva di canale, la corrente I_{DS} e la carica Q_n per $y = 0$ e per $y = L$. [4]
3. Si determini la tensione V_{SB} affinché il transistoro sia esattamente alla saturazione. [3]

SOLUZIONE 2

1) Se non ci fosse la carica nell'ossido avremo:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.726 \times 10^{-3}$$

$$\psi_B = V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347$$

$$\Phi_{MS} = -\left(\frac{E_G}{2q} + \psi_B\right) = -0.887$$

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 0.09 \text{ V}$$

Quindi, se $V_{TH} = 1 \text{ V}$, c'è sicuramente una carica (negativa!) che fa aumentare la V_{TH} :

$$V_{TH} = V_{TH\text{senzacarica}} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$Q_{ox} = C_{ox}(V_{TH\text{senzacarica}} - V_{TH}) = -1.6 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$$

Poiché $V_{DS} = 3.5 \text{ V} < V_{GS} - V_{TH} = 4 \text{ V}$, siamo in zona triodo, quindi la corrente I_{DS} :

$$I_{DS} = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right) = 1.1 \text{ mA} \quad (1)$$

E la carica in 0 e L:

$$\begin{aligned} Q_n(0) &= C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) = 6.9 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2 \\ Q_n(L) &= C_{ox} (V_{GD} - V_{TH}) = C_{ox} (V_{GS} - V_{DS} - V_{TH}) = 6.38 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2 \end{aligned}$$

2) Ricalcoliamo anzitutto la tensione di soglia V_{GSinv} , rispetto al Source. Nell'espressione appare V_{SB} sotto radice:

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B + V_{SB})}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = 2.1 \text{ V} \quad (2)$$

In questo caso il MOS è in saturazione, poiché $V_{DS} = 3.5 \text{ V} > (V_{GS} - V_{TH}) = 2.9 \text{ V}$. Per il resto, non cambia niente se le tensioni sono riferite al Source:

$$\begin{aligned} V_{GP} &= V_{TH} \\ V_{PS} &= V_{GS} - V_{GP} = V_{GS} - V_{TH} = 2.9 \text{ V} \\ V_{Pbulk} &= V_{PS} + V_{SB} = 17.9 \text{ V} \end{aligned}$$

Poi si procede come sempre:

$$\begin{aligned} V_{DP} &= V_{DS} - V_{PS} = V_{DS} - V_{DSsat} = 0.6 \text{ V} \\ V_{0DP} &= -\Phi_{MS} \\ W_{DP} &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A (V_{0DP} + V_{DP})} = 0.44 \text{ } \mu\text{m} \\ L_{eff} &= 3 - 0.44 = 2.56 \text{ } \mu\text{m} \\ I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 0.68 \text{ mA} \end{aligned}$$

Per le cariche:

$$\begin{aligned} Q_n(0) &= C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) = 5 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2 \\ Q_n(L) &= 0 \text{ Siamoinstrozzamentodicanale} \end{aligned}$$

3) Dovremo avere che:

$$\begin{aligned} V_{DS} &= V_{GS} - V_{TH} = 3.5 \text{ V} \\ V_{TH} &= V_{GS} - V_{DS} = 1.5 \text{ V} \\ \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B + V_{SB})}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} &= 1.5 \\ \sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B + V_{SB})} &= C_{ox} \left(1.5 - 2\psi_B - \Phi_{MS} + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \right) \\ \sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B + V_{SB})} &= 1.32 \times 10^{-3} \\ 2\psi_B + V_{SB} &= 5.16 \text{ V} \\ V_{SB} &= 4.37 \text{ V} \end{aligned}$$

ESERCIZIO 3

Un transistor bipolare p^+np ha la base $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, il collettore $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, $S = 1 \text{ mm}^2$. Il transistor viene polarizzato con $V_{EB} = 0.55 \text{ V}$, $V_{EC} = 5 \text{ V}$ e viene misurata $I_B = 10 \text{ }\mu\text{A}$.

1. Determinare le correnti ai terminali, nonché la lunghezza metallurgica della base. [3]
2. Il transistor si scalda, e raggiunge una temperatura di 350 K. Calcolare le correnti ai terminali. Si considerino la mobilità ed il tempo di vita medio dei minoritari costanti con la temperatura. (Si consideri valida l'approssimazione di bassa iniezione) [4]
3. A temperatura ambiente, determinare le capacità parassite della giunzione base-emettitore e base-collettore dovute allo svuotamento e alla diffusione (anche se molto piccole). [3]

SOLUZIONE 3

1) Determiniamo la lunghezza effettiva, il β_f e la corrente di collettore I_C (uscente):

$$\delta p(0) = \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} = 3.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

$$Q = I_B \tau_p = qS \delta p(0) \frac{W}{2}$$

$$W = \frac{2I_B \tau_p}{qS \delta p(0)} = 3.2 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\beta_f = 2 \frac{L_p^2}{W^2}$$

$$D_p = V_T \mu_p = 1.034 \times 10^{-3}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 32.15 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\beta_f = 202$$

$$I_C = 2.02 \text{ mA}$$

Quindi $I_E = 2.03$ entrante (I_C e I_B uscenti). Per la lunghezza metallurgica della base determiniamo prima la tensione collettore-base: $V_{BC} = V_{EC} - V_{EB} = 4.45$, in inversa. Avremo:

$$V_{0BC} = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.634$$

$$W_{BC} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{0BC} + V_{BC})} = 2.6 \text{ }\mu\text{m}$$

$$x_n = W_{BC} \frac{N_A}{N_D + N_A} = 0.24 \text{ }\mu\text{m}$$

$$W_{met} = 3.2 + 0.24 = 3.44 \text{ }\mu\text{m}$$

2) Cambia la concentrazione intrinseca e il coefficiente di diffusione:

$$\begin{aligned}
 N_C(350) &= N_C(300) \left(\frac{350}{300} \right)^{\frac{3}{2}} = 3.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \\
 N_V(350) &= N_V(300) \left(\frac{350}{300} \right)^{\frac{3}{2}} = 1.26 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \\
 n_i &= \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{qE_G}{2kT}} = 3.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \\
 V_T(350) &= \frac{kT}{q} = 0.030 \\
 D_p &= V_T \mu_p = 1.21 \times 10^{-3} \\
 L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 34.72 \text{ } \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

La W è la stessa, poiché le tensioni non sono cambiate (sono imposte dall'esterno). Quindi avremo che il β_f è simile (cambia poiché la lunghezza di diffusione è aumentata), mentre la corrente di base è più grande. Nelle seguenti espressioni, $V_T = 0.030 \text{ V}$ ($V_T(350)$), $n_i = 3.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$:

$$\begin{aligned}
 \delta p(0) &= \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} = 1.12 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \\
 Q &= qS \delta p(0) \frac{W}{2} \\
 I_B &= \frac{Q}{\tau_p} = qS \delta p(0) \frac{W}{2\tau_p} = 0.23 \text{ mA} \\
 \beta_f &= 2 \frac{L_p^2}{W^2} = 235 \\
 I_C &= 54 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Le correnti sono molto elevate, poiché a tensione costante aumentano esponenzialmente con la temperatura.

3) La giunzione base-emettitore è polarizzata in diretta, e quindi avrà la capacità di diffusione e la capacità dovuta alla regione di svuotamento:

$$\begin{aligned}
 Q &= I_B \tau_p = qS \delta p(0) \frac{W}{2} = qS \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} \frac{W}{2} \\
 C_{diff\ BE} &= \frac{dQ}{dV_{EB}} = \frac{1}{V_T} Q = \frac{I_B \tau_p}{V_T} = 387 \text{ pF}
 \end{aligned}$$

Per quanto riguarda la regione di svuotamento, che in questo caso non possiamo trascurare, introduce la capacità differenziale:

$$\begin{aligned}
 V_{0EB} &= 0.872 \\
 W_{BE} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{0BE} - V_{BE})} = 0.206 \text{ } \mu\text{m} \\
 C_{diffBE} &= S \frac{\epsilon_s}{W_{BE}} = 511 \text{ pF}
 \end{aligned}$$

Tra base e collettore c'è solo la capacità dovuta allo svuotamento:

$$C_{BC} = S \frac{\epsilon_s}{W_{BC}} = 40 \text{ pF} \quad (3)$$