ESERCIZIO 1

Un diodo pn è realizzato con $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_p = \tau_n = 10^{-6}$ s. Le basi sono rispettivamente $W_p = 3$ μm e $W_n = 25$ μm, ed $S = 1$ mm^2. Il diodo è polarizzato con $V = 0.5$ V.

1) Determinare il profilo dell'eccesso di portatori minoritari nella base n, verificando l'ipotesi di bassa iniezione. [3]

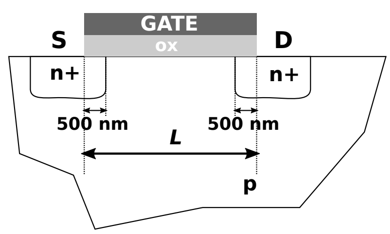
2) Determinare la corrente nel diodo, calcolando il contributo dovuto all'iniezione di lacune usando la derivata del profilo di portatori minoritari.[3]

3) Il diodo è realizzato con un semiconduttore simile al silicio (stesso GAP e stessa n_i), ma a gap diretto (ipotesi ai fini dell'esercizio). L'efficienza di emissione ottica, in caso di ricombinazione di coppie elettrone-lacuna, è pari al 10%.

Determinare la potenza ottica emessa dal diodo. [4]

ESERCIZIO 2

In un transistore n-MOS polysilicon gate, con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 10$ nm, $W = 10$ μm, $L = 3$ μm (L lunghezza del Gate), $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, è presente una sottodiffusione dei pozzetti di Drain e di Source di 500 nm sotto il Gate (vedi figura).



1) Per $V_{GS} = 5$ V e per piccoli valori di V_{DS} è stata misurata una resistenza di canale pari a $R = 200$ Ω.

Determinare la carica parassita all'interfaccia ossido-silicio. [3]

2) Viene applicata una $V_{DS} = 5$ V ($V_{GS} = 5$ V). Determinare la lunghezza effettiva di canale, il punto di riposo e i parametri dinamici (circuito equivalente per le variazioni) del transistore. [4]

3) Sapendo che il campo elettrico di break-down è pari a 2×10^7 V/m, determinare la massima tensione V_{DS} applicabile al dispositivo. [3]

ESERCIZIO 3

Si consideri un transistore n^+pn con $N_{Abase} = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_{Dcollettore} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $W_{met} = 3$ μm, S=1 mm^2.

1) Per $I_B = 0$ determinare V_{BE} e I_C (molto piccola) per $V_{CE} = 5$ V e $V_{CE} = 8$ V.[4]

2) Per $I_B = 20$ μA e $V_{CB} = 5$ V determinare le tensioni e le correnti ai terminali. [3]

3) Determinare la resistenza differenziale collettore-emettitore $\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}$, per $I_B = 20$ μA. SUGGERIMENTO: calcolare I_C e la tensione V_{CE} per $V_{CB} = 8$ V. [3]

ESERCIZIO 1

Un diodo pn è realizzato con $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_p = \tau_n = 10^{-6}$ s. Le basi sono rispettivamente $W_p = 3$ μm e $W_n = 25$ μm, ed $S = 1$ mm^2. Il diodo è polarizzato con $V = 0.5$ V.

1) Determinare il profilo dell'eccesso di portatori minoritari nella base n, verificando l'ipotesi di bassa iniezione. [3]

2) Determinare la corrente nel diodo, calcolando il contributo dovuto all'iniezione di lacune usando la derivata del profilo di portatori minoritari.[3]

3) Il diodo è realizzato con un semiconduttore simile al silicio (stesso GAP e stessa n_i), ma a gap diretto (ipotesi ai fini dell'esercizio). L'efficienza di emissione ottica, in caso di ricombinazione di coppie elettrone-lacuna, è pari al 10%.

Determinare la potenza ottica emessa dal diodo. [4]

SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo i vari parametri:

$$\begin{aligned} D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.034 \times 10^{-3} \;\; \text{m}^2/\text{s} \\ L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 32.15 \;\; \mu\text{m} \\ D_n &= \frac{kT}{q}\mu_p = 2.585 \times 10^{-3} \;\; \text{m}^2/\text{s} \\ L_n &= \sqrt{D_p \tau_p} = 50.84 \;\; \mu\text{m} \\ V_0 &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.675 \;\; \text{V} \end{aligned}$$

Quindi la base p è corta, mentre la base n è generica. Per il profilo dell'eccesso di portatori in n bisogna risolvere l'equazione di continuità, la cui soluzione generale è:

$$\delta p(x) = A e^{\frac{x}{L_p}} + B e^{-\frac{x}{L_P}} \tag{1}$$

con condizioni a contorno $\delta p(0) = n_i^2/N_D e^{\frac{V}{V_T}}$ all'estremo della regione di svuotamento e $\delta p(W_n) = 0$ sul contatto:

$$A + B = \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V}{V_T}} = 5.6 \times 10^{18} \;\; \text{m}^{-3}$$

$$Ae^{\frac{25}{32.15}} + Be^{-\frac{25}{32.15}} \quad = \quad 0$$

La bassa iniezione è verificata, $5.6 \times 10^{18} \ll 10^{22}$. Risolvendo il sistema avremo:

$$\begin{aligned} A &= -1.5 \times 10^{18} \ \ \mathrm{m}^{-3} \\ B &= 7.1 \times 10^{18} \ \ \mathrm{m}^{-3} \\ \delta p(x) &= -1.5 \times 10^{18} e^{\frac{25}{32.15}} + 7.1 \times 10^{18} e^{-\frac{25}{32.15}} \end{aligned}$$

2) La corrente è dovuta a due contributi. La corrente dovuta all'iniezione di lacune I_p nella parte n puó essere calcolata come derivata del profilo in 0:

$$\begin{aligned} I_p &= -qSD_p \frac{\partial \delta p(x)}{\partial x}|_0 \\ I_p &= -qS\frac{D_p}{L_p}(A - B) = 44.3 \ \ \mu\mathrm{A} \end{aligned}$$

A questa basta aggiungere il contributo dovuto agli elettroni iniettati nella parte p, che è corta:

$$I = qS\frac{D_n}{W_p}\frac{n_i^2}{N_A}\left(e^{\frac{V}{V_T}}\right) + I_p = 1.606 \ \ mathrmmA \tag{2}$$

3) Bisogna calcolare il contributo alla corrente legato alla ricombinazione nelle basi. Trascuriamo la ricombinazione nella base p. Per calcolare la ricombinazione nella base n o calcoliamo la carica Q integrando il profilo, o facciamo la differenza tra le correnti di diffusione in 0 (corrente totale dovuta all'iniezione in n) e in W_n (corrente dovuta alle lacune che arrivano sul contatto). Seguiamo questa seconda strada:

$$\begin{aligned} I_p(W_n) &= -qSD_p \frac{\partial \delta p(x)}{\partial x}|_{W_n} \\ I_p &= -qS\frac{D_p}{L_p}\left(Ae^{\frac{25}{32.15}} - Be^{-\frac{25}{32.15}}\right) = 33.6 \ \ \mu\mathrm{A} \end{aligned}$$

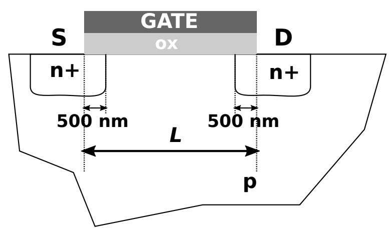
Quindi la corrente dovuta alla ricombinazione di lacune risulta pari a $I_{ric} = 10.7$ μA. Per determinare la potenza ottica basta dividere la corrente per q

(n. di coppie che si ricombinano al secondo), e moltiplicare per l'efficienza (0.1) e per l'energia emessa, che è pari all'energia del gap (E_G in eV):

$$P_{emessa} = \frac{I_{ric}}{q} \, 0.1 \, qE_g = 1.2 \quad \mu(W) \tag{3}$$

ESERCIZIO 2

In un transistore n-MOS polysilicon gate, con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 10$ nm, $W = 10$ μm, $L = 3$ μm (L lunghezza del Gate), $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, è presente una sottodiffusione dei pozzetti di Drain e di Source di 500 nm sotto il Gate (vedi figura).



1) Per $V_{GS} = 5$ V e per piccoli valori di V_{DS} è stata misurata una resistenza di canale pari a $R = 200$ Ω.

Determinare la carica parassita all'interfaccia ossido-silicio. [3]

2) Viene applicata una $V_{DS} = 5$ V ($V_{GS} = 5$ V). Determinare la lunghezza effettiva di canale, il punto di riposo e i parametri dinamici (circuito equivalente per le variazioni) del transistore. [4]

3) Sapendo che il campo elettrico di break-down è pari a 2×10^7 V/m, determinare la massima tensione V_{DS} applicabile al dispositivo. [3]

SOLUZIONE 2

1) La resistenza di canale per piccoli valori di V_{DS} (zona lineare) è data da:

$$R_{can} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})} \tag{4}$$

dove L è la distanza effettiva tra i pozzetti, pari a 3-0.5-0.5=2 μm. Avremo dunque:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 3.453 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2$$

$$
\begin{aligned}
V_{GS} - V_{TH} &= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} R_{can}} = 3.63 \ \ \mathrm{V} \\
V_{TH} &= 1.38 \ \ \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

Quindi:

$$
\begin{aligned}
\psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \ \ \mathrm{V} \\
\Phi_{MS} &= -\frac{E_G}{2q} - \psi_B = -0.887 \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \\
\frac{Q_{ox}}{C_{ox}} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} - V_{TH} = -1.43 \ \ \mathrm{V} \\
Q_{ox} &= -4.94 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{C/m^2}
\end{aligned}
$$

Negativa, quindi costituita da elettroni.

2) Il canale, prima dello strozzamento, è lungo 2 μm. Per $V_{DS} = 5$ V, il punto di strozzamento P arretra rispetto al Drain:

$$
\begin{aligned}
V_{DP} &= V_{DS} - V_{DS\ Sat} = V_{DS} - (V_{GS} - V_{TH}) = 1.37 \ \ \mathrm{V} \\
W_{DP} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q N_A} \left(V_{0Dbulk} + V_{DP}\right)} \\
V_{0Dbulk} &= \frac{E_g}{2q} + \psi_B = 0.887 \ \ \mathrm{V} \\
W_{DP} &= 0.55 \ \ \mu\mathrm{m} \\
L_{eff} &= 2 - 0.55 = 1.45 \ \ \mu\mathrm{m} \\
I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L_{eff}} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 = 12.5 \ \ \mathrm{mA}
\end{aligned}
$$

Per quanto riguarda i parametri dinamici:

$$
\begin{aligned}
g_m &= \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}} \left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 6.91 \times 10^{-3} \\
C_{GS} &= \frac{2}{3} C_{ox} W L_{eff} = 33.3 \ \ \mathrm{pF}
\end{aligned}
$$

Discorso a parte per la C_{GD}, che deve essere calcolata considerando la sottodiffusione di 500 nm, larga 10 μm (W):

$$C_{GD} = \epsilon_{ox} \frac{W \times 0.500\mu\text{m}}{t_{ox}} = 1.72 \times 10^{-14} \text{ F} \tag{5}$$

Manca solo la resistenza differenziale Drain-Source r_d. Calcoliamo la I_{DS} alla saturazione ($V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$, $L_{eff} = L = 2$ μm):

$$\begin{aligned} I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 9.1 \text{ mA} \\ r_d &\approx \frac{5 - 3.63}{12.5\text{m} - 9.1\text{m}} = 403 \ \Omega \end{aligned}$$

3) Considerando la regione di svuotamento x_p Drain-Substrato $n^+ p$:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{max} &= \frac{qN_A}{\epsilon_s} x_p = \mathcal{E}_{BD} \\ x_p &= \mathcal{E}_{BD} \frac{1}{\frac{qN_A}{\epsilon_s}} = 1.31 \ \mu\text{m} \\ x_p &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} V_{DS\ BD}} \\ V_{DS\ BD} &= x_p^2 \frac{qN_A}{2\epsilon_s} = 13.15 \text{ V} \end{aligned}$$

ESERCIZIO 3

Si consideri un transistore n^+pn con $N_{Abase} = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_{Dcollettore} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $W_{met} = 3$ μm, S=1 mm^2.

1) Per $I_B = 0$ determinare V_{BE} e I_C (molto piccola) per $V_{CE} = 5$ V e $V_{CE} = 8$ V.[4]

2) Per $I_B = 20$ μA e $V_{CB} = 5$ V determinare le tensioni e le correnti ai terminali. [3]

3) Determinare la resistenza differenziale collettore-emettitore $\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}$, per $I_B = 20$ μA. SUGGERIMENTO: calcolare I_C e la tensione V_{CE} per $V_{CB} = 8$ V. [3]

SOLUZIONE 3

1) Se $I_B = 0$, la carica in base $Q_B = 0$. Da ciò si ricava, da considerazioni fatte a lezione,

$$V_{BE} = V_T \ln 2 = 0.018 \ \ \mathrm{V} \tag{6}$$

indipendentemente dalla V_{CE}. Avremo anche che $n(0) = 2n_0$ e $n(W) = 0$. Quindi la I_C si può calcolare come derivata del profilo:

$$I_C = qSD_n \frac{\partial n(x)}{\partial x}|_{x=W} = qSD_n \frac{2n_0}{W} \tag{7}$$

Quindi la corrente dipende da W, la lunghezza effettiva della base, che cambia in base a $V_{CB} \simeq V_{CE}$ (dato che V_{BE} è piccola). Avremo quindi:

$$\begin{aligned}
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \\
n_0 &= \frac{n_i^2}{N_D} = 2.25 \times 10^{10} \ \ \mathrm{m}^{-3} \\
V_{0BC} &= V_T \ln \frac{N_{Abase} N_{Dcollettore}}{n_i^2} = 0.693 \\
x_{BC}(5 \ \mathrm{V}) &= \frac{W_{BC}}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_{0BC} + 5)} = 0.61 \ \ \mu\mathrm{m} \\
W(5 \ \mathrm{V}) &= 3 - 0.61 = 2.39 \ \ \mu\mathrm{m}
\end{aligned}$$

$I_C(5 \ \mathrm{V}) = 7.8 \ \ \mathrm{pA}$

$$\begin{aligned}
x_{BC}(8 \ \mathrm{V}) &= \frac{W_{BC}}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_{0BC} + 5)} = 0.76 \ \ \mu\mathrm{m} \\
W(8 \ \mathrm{V}) &= 3 - 0.76 = 2.24 \ \ \mu\mathrm{m}
\end{aligned}$$

$I_C(8 \ \mathrm{V}) = 8.3 \ \ \mathrm{pA}$

2) Calcoliamo la regione di svuotamento base-collettore (facendo riferimento ai conti precedenti), e trascuriamo la regione di svutamento della giunzione base-emettitore polarizzata in diretta:

$$\begin{aligned}
x_{BC}(5 \ \mathrm{V}) &= 0.61 \ \ \mu\mathrm{m} \\
W(5 \ \mathrm{V}) &= 3 - 0.61 = 2.39 \ \ \mu\mathrm{m}
\end{aligned}$$

Abbiamo:

$$I_B = \frac{Q_B}{\tau_n} = qS\delta n(0)W \ \frac{1}{2\tau_n}$$

$$
\begin{aligned}
\delta n(0) &= \frac{2I_B\tau_n}{qSW} = 1 \times 10^{20} \ \ \mathrm{m}^{-3} \\
\delta n(0) &= \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \\
V_{BE} &= V_T \ln \frac{N_A \delta n(0)}{n_i^2} = 0.57 \ \ \mathrm{V} \\
V_{CE} &= 5.57 \ \ \mathrm{V} \\
\tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} = 1.1 \ \ \mathrm{ns} \\
I_C &= I_B \frac{\tau_n}{\tau_t} = 18.1 \ \ \mathrm{mA}
\end{aligned}
$$

Da cui calcolare I_C

3) Possiamo fare riferimento ai conti del punto 1 per calcolare I_C con $V_{CB} = 8$ V.

$$
\begin{aligned}
x_{BC}(8 \ \mathrm{V}) &= 0.76 \ \ \mu\mathrm{m} \\
W(8 \ \mathrm{V}) &= 3 - 0.76 = 2.24 \ \ \mu\mathrm{m} \\
\tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} = 0.97 \ \ \mathrm{ns} \\
I_C &= I_B \frac{\tau_n}{\tau_t} = 20.6 \ \ \mathrm{mA} \\
\delta n(0) &= \frac{2I_B\tau_n}{qSW} = 1.14 \times 10^{20} \ \ \mathrm{m}^{-3} \\
\delta n(0) &= \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \\
V_{BE} &= V_T \ln \frac{N_A \delta n(0)}{n_i^2} = 0.58 \ \ \mathrm{V} \\
V_{CE} &= 8.58 \ \ \mathrm{V} \\
r_d &= \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = 1204 \ \ \Omega
\end{aligned}
$$