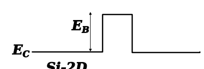
PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 7 giugno 2023

ESERCIZIO 1 Si consideri un transistore n-MOS polysilicon gate, con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs sia nel canale che nel bulk, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $W = 10$ μm, $L = 5$ μm; le aree delle giunzioni Source-substrato e Drain-substrato sono di 100 μm^2 ciascuna.
1) Si consideri il Source non cortocircuitato con il substrato. Per $V_{GS} = 0$ determinare la piccola corrente parassita I_{DS}, e le tensioni V_{SB} e V_{DB}, per $V_{DS} = 5$ V e $V_{DS} = -5$ V. [3]
Si consideri il Source cortocircuitato con il substrato.
2) Per $V_{GS} = 0$ determinare la corrente I_{DS}, e le tensioni V_{SB} e V_{DB}, per $V_{DS} = 5$ V e $V_{DS} = -0.6$ V. [3]
3) Per $V_{GS} = 5$ V e $V_{DS} = 8$ V determinare la corrente I_{DS} e i parametri differenziali per le variazioni g_m, r_d, C_{GS}, C_{GD}. [4]

ESERCIZIO 2 Con tecniche di crescita epitassiale, viene realizzato un semiconduttore composto bidimensionale, la cui banda di conduzione ha l'andamento riportato in figura (altezza di barriera pari a $E_B = 1$ eV). A sinistra della barriera il semiconduttore è silicio (stesse proprietà), a parte la densità degli stati 2D, indipendente dall'energia: $D(E) = \frac{4\pi^2 m_e^*}{\pi h^2}$ m^{-2} J^{-1} (per unità di superficie e di energia), massa efficace degli elettroni $m_e^* = 0.26 m_0$, costante di Plank $h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js.



1) Determinare l'espressione per la densità equivalente degli stati in banda di conduzione, nonché la posizione del livello di Fermi rispetto ad E_C, con $n = 10^{14}$ m^{-2}.[4]
2) Determinare l' espressione per la concentrazione di elettroni con energia tale da superare la barriera. [3]
3) Determinare la posizione del livello di Fermi e la concentrazione di elettroni con energia sufficiente a superare la barriera ad una temperatura di 600 K ($n = 10^{14}$ m^{-2}).[3]

ESERCIZIO 3 Un transistore bipolare n^+pn ($N_{AB} = N_{DC} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 0.1$ ms, S=1 mm^2) è polarizzato con $V_{CE} = 5$ V. Le dimensioni geometriche della base sono: $W_{met} = 3$ μm, S=1 mm^2 (volume $WS = 3 \times 10^{-12}$ m^3). Trascurare l'ampiezza delle regioni di svuotamento per le giunzioni polarizzate in diretta. Il terminale di base è flottante ($I_B = 0$).
1) Determinare le tensioni V_{BE} e V_{CB}, e la piccola corrente di collettore. [3]
La base è illuminata in maniera tale da generare $G_{opt} = 10^{20}$ coppie elettrone-lacuna al secondo per unità di volume (m^{-3}s^{-1}). Si assuma la bassa iniezione.
2) Determinare il numero totale di coppie elettroni-lacune generate nella base, al secondo. Descrivere inoltre le funzionalità delle cariche (dove vanno gli elettroni e le lacune generate?), nonchè la corrente di base equivalente. [3]
3) Determinare le correnti e le tensioni ai terminali. NOTA: per il calcolo della $W_{effettiva}$ trascurare la caduta di tensione emettitore-base (approssimazione da verificare calcolando V_{BE}). [4]
L'esercizio schematizza il funzionamento di un fototransistore (molto semplificato).

ESERCIZIO 1

Si consideri un transistore n-MOS polysilicon gate, con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs sia nel canale che nel bulk, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $W = 10$ μm, $L = 5$ μm; le aree delle giunzioni Source-substrato e Drain-substrato sono di 100 μm^2 ciascuna.

1) Si consideri il Source non cortocircuitato con il substrato. Per $V_{GS} = 0$ determinare la piccola corrente parassita I_{DS}, e le tensioni V_{SB} e V_{DB}, per $V_{DS} = 5$ V e $V_{DS} = -5$ V. [3]

Si consideri il Source cortocircuitato con il substrato.
2) Per $V_{GS} = 0$ determinare la corrente I_{DS}, e le tensioni V_{SB} e V_{DB}, per $V_{DS} = 5$ V e $V_{DS} = -0.6$ V. [3]

3) Per $V_{GS} = 5$ V e $V_{DS} = 8$ V determinare la corrente I_{DS} e i parametri differenziali per le variazioni g_m, r_d, C_{GS}, C_{GD}. [4]

SOLUZIONE 1

1) Le due giunzioni n^+p source-substrato e drain-substrato sono due diodi back-to-back, di cui una è in diretta e l'altra è in inversa. Se $V_{DS} > 0$, la giunzione source-substrato è polarizzata in diretta con una tensione molto piccola e pari a $V_T ln2 = 18$ mV. Avremo che la corrente è limitata dalla giunzione drain-substrato in inversa, e sarà pari alla corrente I_0 delle giunzioni ($I_{0DB} = I_{0SB} = I_0$). Infatti, in valore assoluto:

$$
\begin{aligned}
I_{0DB} &= I_{0SB}\left(e^{\frac{V_{SB}}{V_T}} - 1\right) \\
V_{BS} &= V_T \ln(2)
\end{aligned}
$$

Quindi $V_{SB} = -0.018$ V, $V_{DB} = V_{DS} - V_{SB} \simeq V_{DS}$. Per il calcolo della I_0 possiamo usare l'espressione del diodo a base lunga, anche se sarebbe più corretto considerare la lunghezza di canale L (base corta) che separa il source dal drain. Trascurando l'ampiezza della regione di svuotamento della giunzione polarizzata in diretta avremo:

$$
\begin{aligned}
V_{0DB} &= 0.872 \ \ \text{V} \\
W_{DB} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}\left(V_{0DB} + V_{DB}\right)} = 0.88 \ \ \mu\text{m} \\
W_p &= L = W_{DB} = 4.12 \ \ \mu\text{m} \\
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.068 \times 10^{-3} \ \ \text{m}^2/\text{s} \\
I_0 &= I_{DS} = qS\frac{D_n}{W_p}\frac{n_i^2}{N_A} = 1.8 \times 10^{-16} \ \ \text{A}
\end{aligned}
$$

Il caso $V_{DS} = -5$ V è analogo, ma le tensioni e la corrente sono scambiate: $V_{SB} = 5$ V, $V_{DB} = 18$ mV, $I_{DS} = -I_0$

2) In questo caso avremo che, nel caso di $V_{DS} = 5$ V, la tensione $V_{SB} = 0$ perchè il source ed il bulk sono cortocircuitati, $V_{DB} = V_{DS}$ (esattamente uguale), e I_{DS} è la corrente di saturazione inversa I_0 della giunzione drain-substrato. Per $V_{DS} = -0.6$ V, la giunzione drain-substrato è polarizzata in diretta, quindi la corrente I_{DS} è quella di polarizzazione diretta. Per correttezza, ricalcoliamo W_p che stavolta è pari alla lunghezza di canale L, trascurando le regioni di svuotamento.

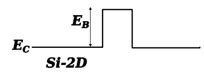
$$\begin{aligned} I_0 &= qS\frac{D_n}{L}\frac{n_i^2}{N_A} = 1.49 \times 10^{-16} \ \ \text{A} \\ I_{DS} &= I_{DB} = 1.79 \ \ \mu\text{A} \end{aligned}$$

3) Procediamo nel modo standard, calcolando la tensione di soglia, poi la corrente I_{DS} in saturazione ($V_{DS} = V_{GS} < V_{GS} - V_{TH}$), e quindi i parametri differenziali:

$$\begin{aligned} \psi_B &= \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A}{n_i} = 0.347 \ \ \text{V} \\ \phi_{MS} &= -\frac{E_G}{2q} - \psi_B = 0.88 \ \ \text{V} \ \simeq V_{0DB} \\ C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.151 \times 10^{-3} \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \phi_{MS} = 0.234 \ \ \text{V} \\ W_{DP} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}\left(V_{DS} - (V_{GS} - V_{TH})\right)} = 0.65 \ \ \mu\text{m} \\ L_{eff} &= L - W_{DP} = 5 - 0.65 = 4.35 \ \ \mu\text{m} \\ I_{DS}(8\text{ V}) &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L_{eff}}\left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 = 2.4 \ \ \text{mA} \\ g_m &= \mu_n C_{ox}\frac{W}{L_{eff}}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 10^{-3} \\ C_{GS} &= \frac{2}{3}C_{ox}WL_{eff} = 3.34 \times 10^{-14} \ \ \text{F} \\ C_{GD} &= 0 \\ I_{DS}(V_{DSSat} &= 4.77\text{ V}) = \frac{\mu_n C_{ox}}{2}\frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 = 2.1 \ \ \text{mA} \\ r_d &\simeq 11 \ \ \text{k}\Omega \end{aligned}$$

ESERCIZIO 2

Con tecniche di crescita epitassiale, viene realizzato un semiconduttore composto bidimensionale, la cui banda di conduzione ha l'andamento riportato in figura (altezza di barriera pari a $E_B = 1$ eV). A sinistra della barriera il semiconduttore è silicio (stesse proprietà), a parte la densità degli stati 2D, indipendente dall'energia: $D(E) = \frac{4\pi^2 m_e^*}{\pi h^2}$ m^{-2} J^{-1} (per unità di superficie e di energia), massa efficace degli elettroni $m_e^* = 0.26 m_0$, costante di Plank $h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js.



1) Determinare l'espressione per la densità equivalente degli stati in banda di conduzione, nonché la posizione del livello di Fermi rispetto ad E_C, con $n = 10^{14}$ m^{-2}.[4]

2) Determinare l' espressione per la concentrazione di elettroni con energia tale da superare la barriera. [3]

3) Determinare la posizione del livello di Fermi e la concentrazione di elettroni con energia sufficiente a superare la barriera ad una temperatura di 600 K ($n = 10^{14}$ m^{-2}).[3]

SOLUZIONE 1

1) Si svolgono i conti come nel caso 3D, solo che adesso la densità degli stati è costante con l'energia:

$$\begin{aligned} n &= \int_{E_C}^{\infty} D(E) f(E) dE \\ n &= \int_{E_C}^{\infty} A e^{-\frac{E-E_F}{kT}} dE \end{aligned}$$

dove $A = \frac{4\pi^2 m_e^*}{\pi h^2}$ e abbiamo applicato l'approssimazione usuale per la Fermi-Dirac, valida se il livello di Fermi è dentro il gap.

$$\begin{aligned} n &= A \int_{E_C}^{\infty} e^{-\frac{E-E_C+E_C-E_F}{kT}} dE \\ n &= A e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}} \int_{E_C}^{\infty} e^{-\frac{E-E_C}{kT}} dE \\ x &= \frac{E-E_C}{kT} \qquad kT dx = dE \\ n &= kTA e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}} \int_0^{\infty} e^{-x} dx \\ n &= kTA e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}} \\ N_C = kTA &= 2.81 \times 10^{16} \quad \text{m}^{-2} \\ n &= N_C e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}} \end{aligned}$$

Quindi avremo, per $n = N_D = 10^{14}$ m$^-2$:

$$E_C - E_F = kT \ln \frac{N_C}{n} = 0.145 \quad \text{eV} \tag{1}$$

2) Basta eseguire l'integrale tra $E_C + E_B$ e infinito, invece che tra E_C e infinito:

$$n(E > E_B) \;=\; A e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}} \int_{E_C+E_B}^{\infty} e^{-\frac{E-E_C}{kT}} dE$$

$$
\begin{aligned}
n(E > E_B) &= kTAe^{-\frac{E_C+E_B-E_F}{kT}} \\
n(E > E_B) &= N_C e^{-\frac{E_C-E_F}{kT}} e^{-\frac{E_B}{kT}} \\
n(E > E_B) &= ne^{-\frac{E_B}{kT}}
\end{aligned}
$$

2) A 800 K avremo:

$$
\begin{aligned}
kT_{600} &= kT_{300}\frac{600}{300} = 0.0517 \\
N_C(600) &= N_C(300)\frac{600}{300} = 5.62 \times 10^{16} \quad \mathrm{m}^{-2} \\
E_C - E_F &= kT_{600} \ln \frac{N_C(600)}{n} = 0.163 \quad \mathrm{eV} \\
n(E > E_B) &= ne^{-\frac{E_B}{kT}} = 4 \times 10^5 \quad \mathrm{m}^{-2}
\end{aligned}
$$

ESERCIZIO 3

Un transistore bipolare n^+pn ($N_{AB} = N_{DC} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 0.1$ ms, S=1 mm^2) è polarizzato con $V_{CE} = 5$ V. Le dimensioni geometriche della base sono: $W_{met} = 3$ μm, S=1 mm^2 (volume $WS = 3 \times 10^{-12}$ m^3). Trascurare l'ampiezza delle regioni di svuotamento per le giunzioni polarizzate in diretta. Il terminale di base è flottante ($I_B = 0$).

1) Determinare le tensioni V_{BE} e V_{CB}, e la piccola corrente di collettore. [3]

La base è illuminata in maniera tale da generare $G_{opt} = 10^{20}$ coppie elettrone-lacuna al secondo per unità di volume (m^{-3}s^{-1}). Si assuma la bassa iniezione.
2) Determinare il numero totale di coppie elettroni-lacune generate nella base, al secondo. Descrivere inoltre le funzionalità delle cariche (dove vanno gli elettroni e le lacune generate?), nonchè la corrente di base equivalente. [3]

3) Determinare le correnti e le tensioni ai terminali. NOTA: per il calcolo della $W_{effettiva}$ trascurare la caduta di tensione emettitore-base (approssimazione da verificare calcolando V_{BE}). [4]

L'esercizio schematizza il funzionamento di un fototransistore (molto semplificato).

SOLUZIONE 3

1) La tensione V_{BE} è pari a 18 mV, come nel punto 1. Quindi praticamente tutta la V_{CE} cade sulla giunzione base-collettore. Calcoliamo la regione di svuotamento base-

collettore, nonché la corrente.

$$
\begin{aligned}
V_{CB} &\simeq V_{CE} \\
V_{0BC} &= V_T \ln \frac{N_{AB}N_{DC}}{n_i^2} = 0.693 \ \ \mathrm{V} \\
W_{BC} &= 1.22 \ \ \mu\mathrm{m} \\
X_{BC} &= \frac{W_{BC}}{2} = 0.61 \ \ \mu\mathrm{m} \\
W_{eff} &= W_{met} - X_{BC} = 2.39 \ \ \mu\mathrm{m} \\
D_n &= V_T \mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \\
\delta n(0) &= n_0 = \frac{n_i^2}{N_A} \\
\delta n(W) &= -n_0 \\
I_C &= I_E = qSD_n \frac{\delta_n(0) - \delta_n(w)}{W} = qSD_n \frac{2n_0}{W} = 7.79 \times 10^{-18} \ \ \mathrm{A}
\end{aligned}
$$

Come era da aspettarsi, la corrente è molto piccola, trascurabile nelle normali applicazioni.

2) Il numero totale di coppie elettroni-lacune generate al secondo è pari a $10^{20} \times$ volume $= 3 \times 10^8$ 1/s. Gli elettroni generati sono minoritari, e vengono portati via dalla giunzione base-collettore polarizzata in inversa. Le lacune si ricombinano nella base, con gli elettroni che vengono iniettati dall'emettitore (polarizzato in diretta), con un tempo di vita media pari a τ_n. Quindi le lacune in eccesso, dovute alla generazione ottica, si comportano come una corrente di base $I_B = q \ 3 \times 10^8 = 48$ pA.

3) Avremo che l'emettitore inietta nella base una quantità di elettroni proporzionale alle lacune generate:

$$
\begin{aligned}
W_{effettiva} &= W_{met} - x_{CB} \\
X_{CB} &= \frac{W_{CB}}{2} \\
W_{CB} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_{AB}} + \frac{1}{N_{DC}} \right) (V_{0CB} + V_{CB})} \\
V_{0CB} &= V_T \ln \frac{N_{AB}N_{DC}}{n_i^2} = 0.693 \ \ \mathrm{V} \\
W_{CB} &= 1.22 \ \ \mu\mathrm{m} \\
X_{CB} &= 0.61 \ \ \mu\mathrm{m} \\
W_{eff} &= 2.39 \ \ \mu\mathrm{m} \\
Q &= I_B \tau_n = \frac{1}{2} qS\delta n(0) W_{eff} = qS \frac{n_i^2}{N_{AB}} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \\
\delta n(0) &= \frac{2 I_B \tau_n}{qSW_{eff}} = 2.5 \times 10^{19} \ \ \mathrm{m}^{-3}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\delta n(0) &= \frac{n_i^2}{N_{AB}}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right) \\
V_{BE} &= 0.54 \quad \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

Quindi per il calcolo della regione di svuotamento base-collettore possiamo assumere $V_{CB} \simeq V_{CE}$. Calcoliamo la corrente di collettore:

$$
\begin{aligned}
D_n &= V_T \mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \\
\tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} = 2.2 \quad \mathrm{ns} \\
\beta_f &= \frac{\tau_n}{\tau_t} = 45254 \\
I_C &= \beta_f I_B = 2.17 \quad \mathrm{mA}
\end{aligned}
$$