PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 29 gennaio 2024

ESERCIZIO 1 Un transistore bipolare p^+np è caratterizzato da $N_{DB} = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_{AC} = 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_n = 350$ cm^2/Vs, $\tau_p = 1 \times 10^{-6}$ s, S=1 mm^2. È polarizzato con $V_{EB} = 0.55$ V, e la lunghezza effettiva di base risulta 2.5 μm.

1) Ripercorrendo la dimostrazione svolta a lezione, determinare l'espressione del tempo di transito. Determinare inoltre le correnti ai terminali. [3]

Nella base si aggiunge un campo elettrico costante, pari a 1000 V/m. Questo campo elettrico non modifica sostanzialmente il profilo dell'eccesso dei portatori minoritari(approssimazione ai fini dell'esercizio).

2) Determinare l'espressione della velocità dei portatori nella base. [3]

3) Determinare il nuovo tempo di transito e le correnti ai terminali. SUGGERIMENTO: l'integrale risulta complicato, ma fattibile. Per semplificare, si può supporre che il reciproco del nuovo tempo di transito sia pari alla somma dei reciproci dei tempi di transito dovuti alla diffusione e al trascinamento (come resistenze in parallelo). [4]

ESERCIZIO 2

Un transistore n-MOS polysilicon gate ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm, $L = W = 5$ μm $\mu_n = 800$ cm^2/Vs), è polarizzato con $V_{GS} = 5$ V, $V_{DS} = 8$ V.

1) Determinare la corrente I_{DS}, tenendo conto della lunghezza effettiva del canale, e i parametri differenziali per piccolo segnale. [3]

Considerando le approssimazioni 1D usuali:

2) Determinare una stima del campo elettrico tra 0 e L_{eff} e tra L_{eff} ed L, e discutere i risultati. SUGGERIMENTO: per $0 \leq y \leq L_{eff}$ ricordare la $V(y)$ nel canale. [4]

3) Il campo elettrico di Break-down è pari a 50 MW/m. Determinare la tensione V_{DS} massima applicabile. SUGGERIMENTO: dove si trova il campo elettrico massimo? [3]

ESERCIZIO 3

Un diodo LED è realizzato con una giunzione p^+n lunga con $N_D = 10^{16}$ cm$^-3$, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_p = 10^{-6}$ s, S=10 mm^2. La giunzione è realizzata con un semiconduttore (ideale, ai fini dell'esercizio) in tutto simile al silicio, a parte il gap diretto. La giunzione è polarizzata con $V = 0.6$ V. L'efficienza di ricombinazione radiativa elettrone-lacuna è pari al 20%. Trascurare l'assorbimento dei fotoni da parte del silicio.

1) Determinare il flusso di fotoni in uscita. [3]

2) Determinare la potenza ottica emessa per unità di superficie.[2]

3) Determinare la potenza ottica emessa se il diodo fosse a base corta ($W_n = 5$ μm).[5]

ESERCIZIO 1 Un transistore bipolare p^+np è caratterizzato da $N_{DB} = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_{AC} = 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_n = 350$ cm^2/Vs, $\tau_p = 1 \times 10^{-6}$ s, S=1 mm^2. È polarizzato con $V_{EB} = 0.55$ V, e la lunghezza effettiva di base risulta 2.5 μm.

1) Ripercorrendo la dimostrazione svolta a lezione, determinare l'espressione del tempo di transito. Determinare inoltre le correnti ai terminali. [3]

Nella base si aggiunge un campo elettrico costante, pari a 1000 V/m. Questo campo elettrico non modifica sostanzialmente il profilo dell'eccesso dei portatori minoritari(approssimazione ai fini dell'esercizio).

2) Determinare l'espressione della velocità dei portatori nella base. [3]

3) Determinare il nuovo tempo di transito e le correnti ai terminali. SUGGERIMENTO: l'integrale risulta complicato, ma fattibile. Per semplificare, si può supporre come approssimazione che il reciproco del nuovo tempo di transito sia pari alla somma dei reciproci dei tempi di transito dovuti alla diffusione e al trascinamento (come resistenze in parallelo). [4]

SOLUZIONE 1

1) Per la dimostrazione di $\tau_t = W^2/2D_p$ Si rimanda al libro suggerito per il corso. Qui ricordiamo l'espressione della velocità di diffusione, nel caso di profilo lineare:

$$
\begin{aligned}
J_{diff} &= -qD_p \frac{d\delta p(x)}{dx} \\
qv_{diff}\delta p(x) &= -qD_p \frac{d\delta p(x)}{dx} \\
\delta px &= \delta p(0)\left(1 - \frac{x}{W}\right) \\
v_{diff}(x) &= \frac{D_p}{W}\left(1 - \frac{x}{W}\right)
\end{aligned}
$$

Procediamo adesso con il calcolo delle correnti:

$$
\begin{aligned}
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 0.904 \times 10^{-3} \quad \mathrm{m^2/s} \\
\tau_t &= \frac{W^2}{2D_p} = 3.45 \quad \mathrm{ns} \\
\delta p(0) &= \frac{n_i^2}{N_A}\left(e^{\frac{V_{EB}}{V_T}} - 1\right) = 3.9 \times 10^{19} \quad \mathrm{m^{-3}} \\
Q &= qS\delta p(0)\frac{W}{2} = 7.83 \times 10^{-12} \quad \mathrm{C} \\
I_B &= \frac{Q}{\tau_p} = 7.8 \quad \mu\mathrm{A} \\
I_C &= \frac{Q}{\tau_t} = 2.27 \quad \mathrm{mA}
\end{aligned}
$$

$$I_E = 2.28 \ \ \text{mA}$$

dove I_E è entrante, mentre I_B e I_C sono uscenti.

2) Alla velocità di diffusione, che determina il tempo di transito, si aggiunge la velocità di trascinamento $\mu_p \mathcal{E}$:

$$v(x) = \frac{D_p}{W} \frac{1}{1 - \frac{x}{W}} + \mu_p \mathcal{E} \tag{1}$$

3) Impostiamo il conto, e poi risolviamo sostituendo i numeri:

$$\begin{aligned}
v(x) &= \frac{dx}{dt} \\
dt &= \frac{dx}{v(x)} \\
dt &= \frac{dx}{D_p \frac{1}{W-x} + \mu_p \mathcal{E}} \\
\tau_t &= \int_0^W \frac{1}{D_p \frac{1}{W-x} + \mu_p \mathcal{E}} dx
\end{aligned}$$

L'integrale è complicato, ma algebricamente fattibile, viene una soluzione con i logaritmi. Il testo suggerisce una via molto semplice, anche se approssimata:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\tau_t} &= \frac{1}{\tau_{t\ diff}} + \frac{1}{\tau_{t\ drift}} \\
\tau_{t\ diff} &= 3.45 \ \ \text{ns} \\
\tau_{t\ drift} &= \frac{W}{v_{drift}} = \frac{2.5 \times 10^{-6}}{\mu_p \mathcal{E}} = 71.4 \ \ \text{ns} \\
\tau_t &= \frac{\tau_{t\ diff} \tau_{t\ drift}}{\tau_{t\ diff} + \tau_{t\ drift}} = 3.29 \ \ \text{ns}
\end{aligned}$$

Avremo dunque (la carica Q e la corrente di base I_B sono quelle calcolate nel punto precedente, poiché il profilo è invariato):

$$\begin{aligned}
I_C &= \frac{Q}{\tau_t} = 2.37 \ \ \text{mA} \\
I_E &= 2.38 \ \ \text{mA}
\end{aligned}$$

ESERCIZIO 2

Un transistore n-MOS polysilicon gate ($N_A = 10^{16}\ cm^{-3}$, $t_{ox} = 30$ nm, $L = W = 5$ μm $\mu_n = 800$ cm^2/Vs), è polarizzato con $V_{GS} = 5$ V, $V_{DS} = 8$ V.

1) Determinare la corrente I_{DS}, tenendo conto della lunghezza effettiva del canale, e i parametri differenziali per piccolo segnale. [3]

Considerando le approssimazioni 1D usuali:

2) Determinare una stima del campo elettrico tra 0 e L_{eff} e tra L_{eff} ed L, e discutere i risultati. SUGGERIMENTO: per $0 \leq y \leq L_{eff}$ ricordare la $V(y)$ nel canale. [4]

3) Il campo elettrico di Break-down è pari a 50 MW/m. Determinare la tensione V_{DS} massima applicabile. SUGGERIMENTO: dove si trova il campo elettrico massimo? [3]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo anzitutto la tensione di soglia:

$$
\begin{aligned}
\psi_B &= V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \ \ \mathrm{V} \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.151 \times 10^{-3} \\
\Phi_{MS} &= -\frac{E_G}{2q} - \psi_B = -0.887 \ \ \mathrm{V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 0.227 \ \ \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

Per calcolare la corrente, serve la lunghezza effettiva del canale. Indicando con P il punto di strozzamento, e $V_{DSSat} = V_{GS} - V_{TH} = 5 - 0.227 = 4.773$:

$$
\begin{aligned}
V_{0Dbulk} &= \Phi_{MS} = 0.887 \ \ \mathrm{V} \\
W_{DP} &= x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}\left(V_0 + (V_{DS} - V_{DSSat})\right)} = 0.73 \ \ \mu\mathrm{m} \\
L_{eff} &= L - W_{DP} = 4.3 \ \ \mu\mathrm{m} \\
I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L_{eff}} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 = 1.22 \ \ \mathrm{mA}
\end{aligned}
$$

I parametri per piccolo segnale (g_m, C_{GS}, C_{GD}, r_d):

$$
\begin{aligned}
g_m &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}} \left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 0.5 \times 10^{-3} \\
C_{GS} &= \frac{2}{3} C_{ox} W L_{eff} = 16.5 \ \ \mathrm{fF} \\
C_{GD} &= 0 \\
\frac{1}{r_d} &= \frac{I_{DS}(L_{eff}) - I_{DS}(L)}{V_{DS} - V_{DSsat}} \\
I_{DS}(L) &= 1.04 \ \ \mathrm{mA} \\
r_d &= 18 \ \ \mathrm{k}\Omega
\end{aligned}
$$

2) Il campo elettrico è determinato da $V(y)$ nel canale, per $0 \leq y`L_{eff}$. Dall'espressione della $V(y)$ (vedi dispense):

$$
\begin{aligned}
V(y) &= (V_{GS} - V_{TH}) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{y}{L_{eff}}}\right) \\
\mathcal{E}(y) &= -\frac{dV(y)}{dy} = -\frac{1}{2L_{eff}\sqrt{1 - \frac{y}{L_{eff}}}}
\end{aligned}
$$

Da notare che il campo elettrico è negativo poichè gli elettroni scorrono dal Source al Drain, quindi il campo elettrico deve essere rivolto dal Drain al Source. Da notare inoltre che per $y = L_{eff}$ il campo elettrico è infinito, poichè la concentrazione di carica mobile (elettroni) tende a zero. Questa è evidentemente una limitazione del modello. Il campo elettrico massimo che può provocare il break-down (vedi sotto) è quello dovuto alla giunzione Drain-substrato, che è polarizzata in inversa. Tra L_{eff} ed L il campo elettrico è dovuto alla regione di svuotamento Drain-punto di strozzamento P. Secondo l'usuale approssimazione di svuotamento completo abbiamo:

$$
\begin{aligned}
W_{DP} &= x_p\sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}\left(V_0 + (V_{DS} - V_{DSSat})\right)} \\
\mathcal{E}(y) &= -\frac{qN_A}{\epsilon_s}\left(y - L_{eff}\right) \quad L_{eff} < y < L
\end{aligned}
$$

ee è massimo in prossimità del Drain dove vale:

$$
\mathcal{E}(L) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s}W_{DP} \tag{2}
$$

3) Il campo elettrico massimo da considerare è quello in prossimità del Drain, dovuto alla tensione V_{DS}, come descritto nel punto precedente. Quindi avremo (campo elettrico in valore assoluto):

$$
\begin{aligned}
\mathcal{E}_{max} &= \frac{qN_A}{\epsilon_s}W_{DS} \\
\mathcal{E}_{max} &= \frac{qN_A}{\epsilon_s}\sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}\left(V_0 + (V_{DS})\right)} \\
V_{DS} &= \mathcal{E}^2\frac{\epsilon_s}{2qN_A}
\end{aligned}
$$

Dove nell'ultima espressione è stato trascurato il V_0. Avremo $V_{DS\ max}$=82 V.

ESERCIZIO 3

Un diodo LED è realizzato con una giunzione p^+n lunga con $N_D = 10^{16}$ cm$^-3$, $\mu_p =$ 0.04 m^2/Vs, $\tau_p = 10^{-6}$ s, S=10 mm^2. La giunzione è realizzata con un semiconduttore (ideale, ai fini dell'esercizio) in tutto simile al silicio, a parte il gap diretto. La giunzione è polarizzata con $V = 0.6$ V. L'efficienza di ricombinazione radiativa elettrone-lacuna è pari al 20%. Trascurare l'assorbimento dei fotoni da parte del silicio.

1) Determinare il flusso di fotoni in uscita. [3]

2) Determinare la potenza ottica emessa per unità di superficie.[2]

3) Determinare la potenza ottica emessa se il diodo fosse a base corta ($W_n = 5$ μm).[5]

SOLUZIONE 3

1) Calcoliamo la corrente per $V = 0.6$ V:

$$\begin{aligned}
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.034 \times 10^{-3} \\
L_p &= 32.15 \quad \mu\text{m} \\
I &= qS\frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D}e^{\frac{V}{V_T}} = 1.16 \times 10^{-12} e^{\frac{V}{V_T}} = 13.9 \quad \text{mA} \\
I_S &= qS\frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D} = 1.16 \times 10^{-12} \quad \text{A}
\end{aligned}$$

Questa corrente è dovuta alla ricombinazione di lacune nella parte n, pari a $13.9 \times 10^{-3}/q$ lacune al secondo. Da notare che tutte le lacune si ricombinano nel silicio, quindi tutta la corrente contribuisce all'emissione luminosa. Quindi avremo,per unità di superficie:

$$\begin{aligned}
\frac{I}{q} &= \frac{13.9 \times 10^{-3}}{q} = 8.7 \times 10^{16} \quad \text{s}^{-1} \\
\frac{I}{qS} &= 8.7 \times 10^{21} \quad \text{s}^{-1}\text{m}^{-2} \\
\text{fotoni emessi} &= 8.7 \times 10^{21} \ \times \ 0.2 = 1.74 \times 10^{21} \quad \text{s}^{-1}\text{m}^{-2}
\end{aligned}$$

2) La potenza ottica Psarà pari a questa quantità moltiplicata per l'energia di un fotone, che è pari all'energia del gap:

$$\begin{aligned}
E_g &= 1.08 \text{ eV} = 1.08q = 1.73 \times 10^{-19} \quad \text{J} \\
P &= qE_g \times \text{fotoni emessi} = 301 \quad \text{W/m}^2
\end{aligned}$$

che sono circa 3 mW totali.

3) In questo caso, la gran parte delle lacune si ricombinano sul contatto. Soltanto le lacune che si ricombinano nel silicio contribuiscono all'emissione luminosa. Il numero

di lacune che si ricombinano nel silicio può essere calcolato con il modello a controllo di carica:

$$I = qS\frac{D_p}{W_n}\frac{n_i^2}{N_D}e^{\frac{V}{V_T}} = 89.7 \ \ \text{mA} \tag{3}$$

Questa corrente è dovuta alla ricombinazione sul contatto, e quindi non ci interessa. La ricombinazione nel silicio può essere calcolata come $\frac{Q}{\tau_p}$:

$$\begin{aligned}
Q &= qS\delta p(0)\frac{W}{2} = qS\frac{n_i^2}{N_A}e^{\frac{V}{V_T}}\frac{W}{2} = 1.23 \times 10^{-9} \ \ \text{C} \\
\frac{Q}{\tau_p} &= 1.23 \times 10^{-3} \ \ \text{A} \\
\text{fotoni emessi} &= \frac{Q}{\tau_p q}0.2 = 1.23 \times 10^{15} \ \ \text{s}^{-1} \\
P &= qE_g\frac{Q}{\tau_p q}0.2 = 0.26 \ \ \text{mW}
\end{aligned}$$