PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 11 settembre 2024

ESERCIZIO 1

Una giunzione p^+n ha $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_p = 1$ μs, $S = 1$ mm^2.

1) Determinare la barriera di energia vista dagli elettroni che tendono a muoversi dalla parte n alla parte p^+ e scrivere l'espressione integrale della concentrazione di elettroni che hanno energia sufficiente a superare la barriera. [4]

2) Viene applicata $V = 0.55$ V. Dopo aver determinato la corrente nel diodo, scrivere l'espressione integrale della concentrazione di elettroni con energia sufficiente a superare la barriera. [3]

3) Determinare l'eccesso di lacune in x_n e calcolare la differenza di energia tra E_V e i due quasi-livelli di Fermi per le lacune e per gli elettroni ($E_{fp} - E_V$ e $E_{fn} - E_V$, in x_n).[3]

ESERCIZIO 2

Si richiede di progettare un transistore bipolare n^+pn. E' noto il processo di drogaggio: $N_{AB} = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_{DC} = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s. Il transistore deve avere un β_f almeno pari a 300 (meglio se superiore). Inoltre, se $V_{BE} = 0.55$ V deve poter erogare una corrente I_C di almeno 10 mA.

1) Progettare la $W_{metallurgica}$ per soddisfare le specifiche. [3]

2) Progettare la superficie del transistore (si pensi alla carica in base). [4]

3) Il transistore viene polarizzato con la tensione di progetto $V_{BE} = 0.55$ V, e con $V_{CE} = 5$ V. Si verifichi che le specifiche siano soddisfatte in questa condizione di polarizzazione. All'aumentare della V_{CE} si migliora rispetto alle specifiche? [3]

ESERCIZIO 3

Un condensatore n-MOS con gate in polisilicio è costruito su un substrato con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm. La carica nell'ossido è assente. Viene eseguita una caratterizzazione tramite una curva $C - V$.

1) Determinare il valore della capacità massima e minima, nonché la tensione per cui si misura la capacità minima. [3]

Il processo è difettoso, ed il drogaggio del gate risulta $N_D = 5 \times 10^{16}$ cm^{-3}.

2) Determinare le capacità massima e minima nel caso di drogaggio difettoso (calcolare la capacità del gate moderatamente drogato). [4]

2) Determinare la tensione per cui la capacità assume il valore minimo. [3]

ESERCIZIO 1

Una giunzione p^+n ha $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_p = 1$ μs, $S = 1$ mm^2.

1) Determinare la barriera di energia vista dagli elettroni che tendono a muoversi dalla parte n alla parte p^+ e scrivere l'espressione integrale della concentrazione di elettroni che hanno energia sufficiente a superare la barriera. [4]

2) Viene applicata $V = 0.55$ V. Dopo aver determinato la corrente nel diodo, scrivere l'espressione integrale della concentrazione di elettroni con energia sufficiente a superare la barriera. [3]

3) Determinare l'eccesso di lacune in x_n e calcolare la differenza di energia tra E_V e i due quasi-livelli di Fermi per le lacune e per gli elettroni ($E_{fp} - E_V$ e $E_{fn} - E_V$, in x_n).[3]

Si consiglia di eseguire un grafico dell'andamento delle bande all'equilibrio.

SOLUZIONE 1

1) La barriera che gli elettroni devono superare da n a p^+ è pari a qV_0, dove V_0 è la differenza di potenziale di contatto, che può essere calcolata come differenza dei livelli di Fermi prima del contatto:

$$\begin{aligned}
qV_0 &= E_G - (E_C - E_f) \\
n &= N_D = N_C e^{-\frac{E_C - E_f}{kT}} \\
E_C - E_f &= KT \ln \frac{N_C}{N_D} = 0.205 \\
qV_0 &= 1.08 - 0.205 = 0.875
\end{aligned}$$

Per quanto riguarda alla densità (concentrazione) di elettroni con energia sufficiente a superare la barriera si pu'ò scrivere come:

$$\begin{aligned}
n &= \int_{qV_0}^{\infty} D(E) f(E) dE \\
n &= \int_{qV_0}^{\infty} \left(\frac{2m^*}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E - E_C}\ \frac{1}{1 + e^{E - E_f/overkT}} dE
\end{aligned}$$

2) A questo punto la barriera si è abbassata di $-qV$, quindi risulta pari a $q(V_0 - V)$. Basta riscrivere l'integrale cambiando l'estremo di integrazione:

$$n = \int_{q(V_0 - V)}^{\infty} \left(\frac{2m^*}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E - E_C}\ \frac{1}{1 + e^{E - E_f/overkT}} dE \tag{1}$$

Per quanto riguarda la corrente avremo:

$$\begin{aligned}
I &= I_S e^{\frac{V}{V_T}} \\
I_S &= qS \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D}
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.034 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{m^2/s} \\
L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 32.15 \ \ \mu\mathrm{m} \\
I &= 0.2 \ \ \mathrm{mA}
\end{aligned}
$$

3) Applicando una tensione, non si può più parlare di livello di Fermi perch'é non siamo più all'equilibrio. Si parla allora di quasi-livelli di Fermi per le lacune E_{fp} e E_{fn}. La posizione di E_V rispetto al quasi livello di Fermi E_{fp} esprime la concentrazione di lacune, mentre la posizione di E_{fn} rispetto ad E_V è invariata poichè la concentrazione di elettroni in x_n è invariata, in condizione di bassa iniezione. Possiamo ragionare o con le bande, tenendo conto che $E_{fn} - E_{fp} = qV$, dove V è la tensione esterna applicata, oppure direttamente sulla concentrazione di lacune in x_n.

$$
\begin{aligned}
p(x_n) &= \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V}{V_T}} = 3.9 \times 10^{19} \ \ \mathrm{m^{-3}} \\
E_{fp} - E_V &= kT \ln \frac{N_V}{p(x_n)} = 0.322 \ \ \mathrm{eV}
\end{aligned}
$$

ESERCIZIO 2

Si richiede di progettare un transistore bipolare n^+pn. E' noto il processo di drogaggio: $N_{AB} = 10^{16}$ cm^{-3}, $N_{DC} = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s. Il transistore deve avere un β_f almeno pari a 300 (meglio se superiore). Inoltre, se $V_{BE} = 0.55$ V deve poter erogare una corrente I_C di almeno 10 mA.

1) Progettare la $W_{metallurgica}$ per soddisfare le specifiche. [3]

2) Progettare la superficie del transistore (si pensi alla carica in base). [4]

3) Il transistore viene polarizzato con la tensione di progetto $V_{BE} = 0.55$ V, e con $V_{CE} = 5$ V. Si verifichi che le specifiche siano soddisfatte in questa condizione di polarizzazione. All'aumentare della V_{CE} si migliora rispetto alle specifiche? [3]

SOLUZIONE 2

1) Per essere sicuri di soddisfare le specifiche, consideriamo una $W_{metallurgica}$ tale da ottenere $\beta_f = 300$. Sicuramente con la $W_{effettiva}$, che è sempre minore, qualsiasi sia il valore di V_{BC} otterremo dei valori di β_f più elevati. Quindi:

$$
\begin{aligned}
\beta_f &= \frac{\tau_n}{\tau_t} = \frac{\tau_n}{\frac{W^2}{2D_n}} \\
W &= \sqrt{\frac{\tau_n 2D_n}{\beta_f}}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \quad \mathrm{m}^2/s \\
W &= 4.15 \quad \mu\mathrm{m}
\end{aligned}
$$

Se facciamo $W_{metallurgica} = 4\ \mu$m, sicuramente, una volta polarizzato, la lunghezza effettiva sarà minore ed il β_f maggiore di quello richiesto dalle specifiche.

2) Se vogliamo $I_C = 10$ mA, la carica in base deve essere pari a:

$$
\begin{aligned}
I_C &= \frac{Q}{\tau_t} \\
\tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} \\
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \quad \mathrm{m}^2/\mathrm{s} \\
\tau_t &= 3.1 \quad \mathrm{ns} \\
Q &= I_C\tau_t
\end{aligned}
$$

Quindi:

$$
\begin{aligned}
Q &= qS\delta n(0)\frac{W}{2} \\
\delta n(0) &= \frac{n_i^2}{N_{AB}}e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = 3.9 \times 10^{19} \quad \mathrm{m}^{-3} \\
S &= \frac{Q}{q\delta n(0)\frac{W}{2}} = \frac{I_C\tau_t}{q\delta n(0)\frac{W}{2}} = 2.5 \quad \mathrm{mm}^2
\end{aligned}
$$

Nel conto abbiamo considerato ancora la $W_{metallurgica}$, sapendo che la $W_{effettiva}$ sarà sicuramente inferiore.

3) Calcoliamo i vari parametri. Poiché la lunghezza effettiva W sarà sicuramente minore di quella metallurgica pari a 4 μm, le specifiche saranno sicuramente soddisfatte.

$$
\begin{aligned}
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \quad \mathrm{m}^2/\mathrm{s} \\
L_n &= \sqrt{D_n\tau_n} = 50.84 \quad \mu\mathrm{m} \\
V_{0\ CB} &= V_T \ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.675 \quad \mathrm{V} \\
W_{CB} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_{AB}} + \frac{1}{N_{DC}}\right)(V_{O\ CB} + V_{CB})} = 1.43 \quad \mu\mathrm{m} \\
x_{n\ CB} &= W_{CB}\frac{N_{DC}}{N_{AB} + N_{DC}} = 0.48 \quad \mu\mathrm{m}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
W_{eff} &= W - x_{n\ CB} = 3.52 \quad \mu\text{m} \\
\alpha_F &= \alpha_T = \frac{1}{1+\frac{W^2}{2L_n^2}} = 0.997609 \\
\beta_F &= \frac{\alpha_F}{1-\alpha_F} = 417
\end{aligned}
$$

Quindi la condizione $\beta_f > 300$ è soddisfatta. Controlliamo la condizione sulla I_C, calcolandola usando la carica in base:

$$
\begin{aligned}
I_C &= \frac{Q}{\tau_t} \\
Q &= qS\delta n(0)\frac{W_{effettiva}}{2} = 27.49 \quad \text{pC} \\
\tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} = 2.4 \quad \text{ns} \\
I_C &= 11 \quad \text{mA}
\end{aligned}
$$

Quindi le specifiche sono ampliamente soddisfatte.

ESERCIZIO 3

Un condensatore n-MOS con gate in polisilicio è costruito su un substrato con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm. La carica nell'ossido è assente. Viene eseguita una caratterizzazione tramite una curva $C - V$.

1) Determinare il valore della capacità massima e minima, nonché la tensione per cui si misura la capacità minima. [3]

Il processo è difettoso, ed il drogaggio del gate risulta $N_D = 5 \times 10^{16}$ cm^{-3}.

2) Determinare le capacità massima e minima nel caso di drogaggio difettoso (calcolare la capacità del gate moderatamente drogato). [4]

2) Determinare la tensione per cui la capacità assume il valore minimo. [3]

SOLUZIONE

1) La curva $C - V$ mostra un minimo per $V_{GB} = V_{TH}$, quindi avremo:

$$
\begin{aligned}
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.75 \times 10^{-3} \quad \text{F/m}^2 \\
\psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \\
\Phi_{MS} &= -\left(\frac{E_G}{2q} + \psi_B\right) = -0.887 \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 0.08 \quad \text{V}
\end{aligned}
$$

Il valore massimo della capacità è pari a C_{ox}, quello minimo è dato dalla serie della capacità dell'ossido e di quella del silicio all'inversione, dovuta alla regione di svuotamento:

$$\begin{aligned}
W_{inv} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{qN_A}2\psi_B} = 0.302 \ \ \mu\mathrm{m} \\
C_{Si} &= \frac{\epsilon_{Si}}{W_{inv}} = 0.348 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{F/m^2} \\
C &= \frac{C_{ox}C_{Si}}{C_{ox} + C_{Si}} = 0.29 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{F/m^2}
\end{aligned}$$

2) La carica sul gate, che in questo caso è di silicio moderatamente drogato, deve essere la stessa di quella nel silicio. Poichè il gate è comunque più drogato del substrato, con la stessa carica il gate non è in inversione. Avremo tre capacità in serie: quella del gate, data da $\frac{\epsilon_{Si}}{W_{gate}}$, quella dell'ossido e quella del silicio calcolata nel punto precedente. Avremo:

$$\begin{aligned}
qW_{gate}N_{Dgate} &= qW_{Si}N_A \\
W_{gate} &= W_{Si}\frac{N_A}{N_{Dgate}} = 6.04 \times 10^{-8} \ \ \mathrm{m} \\
C_{gate} &= \frac{\epsilon_{Si}}{W_{gate}} = 1.74 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{F/m^2} \\
\frac{1}{C} &= \frac{1}{C_{gate}} + \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{Si}} = 4019.70 \ \ \mathrm{m^2/F} \\
C &= 0.249 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{F/m^2}
\end{aligned}$$

3) Il minimo della capacità si ottiene per $V_{GB} = V_{TH}$. Basta calcolare la nuova tensione di soglia considerando (aggiungendoci) la caduta di tensione V_{gate} necessaria al gate per svuotarsi di W_{gate} e fornire la carica positiva di gate al condensatore MOS. Bisogna anche ricalcolare la Φ_{MS}, che è sempre negativa e si può ottene come differenza tra i due livelli di Fermi prima del contatto. O più semplicemente come la V_0, tra gate n e substrato p:

$$\begin{aligned}
W_{gate} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}V_{gate}} \\
V_{gate} &= W_{gate}^2\frac{qN_D}{2\epsilon_s} = 0.03 \ \ \mathrm{V} \\
\Phi_{MS} &= -V_0 = -\frac{kT}{q}\ln\frac{N_AN_D}{n_i^2} = -0.734 \ \ \mathrm{V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s qN_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} + V_{gate} = 0.263 \ \ \mathrm{V}
\end{aligned}$$

La Φ_{MS} poteva essere anche calcolata come (è assolutamente equivalente):

$$\begin{aligned}
q\Phi_{MS} = q\Phi_M - q\Phi_S &= q\chi + (E_C - E_{fn}) - (q\chi + E_g - (E_{fp} - E_V)) \\
E_C - E_{fn} &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_C}{N_D} \\
E_{fp} - E_V &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_V}{N_A}
\end{aligned}$$