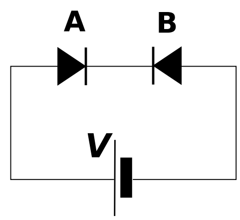
PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 22 Novembre 2018

ESERCIZIO 1

Nel circuito in figura il diodo A è una giunzione Schottky a base corta, substrato $n = N_D = 10^{15}$ cm^{-3} e $W_n = 5$ μm. Il metallo ha una $\Phi_M = 5.2$ V. Si ricorda che per un diodo Schottky $I_S = SA^*T^2\, e^{-\frac{\phi_{BN}}{V_T}}$, con $A^* = 1.201\times10^6$ A/(m^2 K^2) (costante di Richardson), T=300 K, ϕ_{BN} è l'altezza di barriera metallo-silicio e $S = 1$ mm^2. Il diodo B è una giunzione pn con $N_A = 5\times10^{15}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $S = 100$ mm^2, $\mu_n = 0.09$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.045$ m^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s.



1) Determinare le tensioni e le correnti per $V = 5$ V e per $V = -5$ V. [3]

2) Determinare la massima tensione negativa applicabile, per evitare il break-down. [4]

3) Il metallo della giunzione Schottky viene sostituito con un altro, con $\Phi_M = 4$ V. Determinare la corrente per $V = 10$ V e per $V = -0.5$ V.[3]

ESERCIZIO 2

Un condensatore n-MOS è realizzato con gate metallico ($\Phi_M = 3.7$ V), con $t_{ox} = 30$ nm e $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}. Il MOS è illuminato con luce rossa monocromatica con lunghezza d'onda $\lambda = 630$ nm, e potenza pari a 1 W/m^2. Al gate viene applicato un segnale a gradino: $V_{GB} = 0$ V per $t < 0$ e $V_{GB} = 5$ V per $t > 0$. I tempi di generazione termica sono molto maggiori di 5 ms.

1) Calcolare la caduta di tensione nel silicio, nonché le cariche fissa e mobile per $t < 0$ (SUGGERIMENTO: calcolare la V_{TH}). [3]

2) Calcolare la caduta di tensione nel silicio e le cariche fissa e mobile per $t = 0^+$. [4]

3) Determinare la carica generata dall'illuminazione per $t = 5$ ms, verificare che il condensatore MOS non è a regime e calcolare la caduta di tensione nel silicio, nonché le cariche fissa e mobile. [3]

ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, i transistori Q_2 e Q_3 sono npn con $N_{Abase} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $\gamma_E = 0.998$.

1) Determinare la lunghezza metallurgica della base che garantisca un $\beta_{fminimo} = 150$. [3]

La tensione di uscita V_u risulta pari a 6 V. Il transistore Q_1 è un p^+np con $\beta_{fminimo} = 200$.

2) Determinare la tensione di base V_{B3} e le correnti nei transistori. [4]

3) Sapendo che il transistore M è un n-MOS con $t_{ox} = 30$ nm,$\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $V_{TH} = 1$, determinare W/L. [3]

ESERCIZIO 1

Nel circuito in figura il diodo A è una giunzione Schottky a base corta, substrato $n = N_D = 10^{15}$ cm^{-3} e $W_n = 5$ μm. Il metallo ha una $\Phi_M = 5.2$ V. Si ricorda che per un diodo Schottky $I_S = SA^*T^2\, e^{-\frac{\phi_{BN}}{V_T}}$, con $A^* = 1.201\times10^6$ A/(m^2 K^2) (costante di Richardson), T=300 K, ϕ_{BN} è l'altezza di barriera metallo-silicio e $S = 1$ mm^2. Il diodo B è una giunzione pn con $N_A = 5\times10^{15}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $S = 100$ mm^2, $\mu_n = 0.09$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.045$ m^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ s.

1) Determinare le tensioni e le correnti per $V = 5$ V e per $V = -5$ V. [3]

2) Determinare la massima tensione negativa applicabile, per evitare il break-down. [4]

3) Il metallo della giunzione Schottky viene sostituito con un altro, con $\Phi_M = 4$ V. Determinare la corrente per $V = 10$ V e per $V = -0.5$ V.[3]

SOLUZIONE 1

1) Calcoliamo ϕ_{BN}:

$$\begin{aligned}
\Phi_S &= \chi + \frac{E_C - E_F}{q} \\
E_C - E_f &= V_T \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) = 0.205 \text{ eV} \\
\Phi_S &= \chi + \frac{E_C - E_F}{q} = 4.31 \text{ V} \\
\Phi_{MS} = V_0 &= \Phi_M - \Phi_S = 0.894\text{V}
\end{aligned}$$

dove Φ_{MS} è la differenza di potenziale di contatto V_0, ed è la barriera per gli elettroni da silicio a metallo. La barriera da metallo a silicio risulta invece:

$$\phi_{BN} = V_0 + \frac{E_C - E_F}{q} = 1.10 \text{ V} \tag{1}$$

La corrente di saturazione inversa del diodo Schottky risulta dunque:

$$I_S = SA^*T^2\, e^{-\frac{\phi_{BN}}{V_T}} = 3.57 \times 10^{-14} \text{ A} \tag{2}$$

Calcoliamo la corrente di saturazione inversa del diodo pn a base lunga:

$$D_n = \frac{kT}{q}\mu_n = 2.32 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$
\begin{aligned}
L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 48.23 \quad \mu\text{m} \\
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.16 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2/\text{s} \\
L_p &= \sqrt{D_n \tau_p} = 34.11 \quad \mu\text{m} \\
I_{Spn} &= qS\left(\frac{n_i^2}{N_D}\frac{D_p}{L_p} + \frac{n_i^2}{N_A}\frac{D_n}{L_n}\right) = 3.47 \times 10^{-11} \quad \text{A}
\end{aligned}
$$

Per $V = 5$ V avremo che la giunzione Schottky è polarizzata in diretta, la giunzione pn in inversa. Quindi avremo che:

$$
\begin{aligned}
I &= I_{Spn} = 3.47 \times 10^{-11} \quad \text{A} \\
I &= I_S\left(e^{\frac{V_{sch}}{V_T}} - 1\right) = I_{Spn} \\
V_{sch} &= V_T\left(\ln\frac{I_{Spn}}{I_S} + 1\right) = 0.18 \quad \text{V}
\end{aligned}
$$

quindi $V_{pn} = 5 - V_{sch} = 4.82$ V.

Nel caso invece di $V = -5$ V è il diodo Schottky ad essere polarizzato in inversa. Avremo dunque che la corrente scorre nel verso opposto e, in valore assoluto:

$$
\begin{aligned}
I &= I_S = 3.57 \times 10^{-14} \quad \text{A} \\
I &= I_{Spn}\left(e^{\frac{V_{pn}}{V_T}} - 1\right) = I_S \\
V_{pn} &= V_T\left(\ln\frac{I_S}{I_{Spn}} + 1\right) = 0.15 \quad \text{V}
\end{aligned}
$$

2) Il break-down può essere ovviamente causato dal punch-through del diodo Schottky, che è a base corta. Quindi avremo che la massima tensione inversa applicabile è quella che provoca una regione di svuotamento nel diodo Schottky pari a $w_n = 5$ μm:

$$
\begin{aligned}
W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}\left(V_0 + V_{BN}\right)} = W_n \\
V_0 + V_{BN} &= W_n^2 \frac{qN_D}{2\epsilon_s} = 19 \quad \text{V} \\
V_{Bn} &= 18.11 \quad \text{V}
\end{aligned}
$$

3) È semplice verificare che se $\Phi_M = 4$ V avremo $\Phi_M < \Phi_S$. Quindi la giunzione metallo-silicio è un contatto ohmico (non rettificante, non diodo). La tensione V, quindi, si considera direttamente applicata alla giunzione pn. Nel caso di $V > 0$ la giunzione pn è polarizzata in inversa, e avremo $I = I_{Spn} = 3.47 \times 10^{-11}$ A. Nel caso $V = -0.5$ V la giunzione pn è polarizzata in diretta e la corrente, in valore assoluto, risulta:

$$I = I_{Spn} \left(e^{\frac{0.5}{V_T}} - 1 \right) = 8.7 \text{ mA} \tag{3}$$

ESERCIZIO 2

Un condensatore n-MOS è realizzato con gate metallico ($\Phi_M = 3.7$ V), con $t_{ox} = 30$ nm e $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}. Il MOS è illuminato con luce rossa monocromatica con lunghezza d'onda $\lambda = 630$ nm, e potenza pari a 1 W/m^2. Al gate viene applicato un segnale a gradino: $V_{GB} = 0$ V per $t < 0$ e $V_{GB} = 5$ V per $t > 0$. I tempi di generazione termica sono molto maggiori di 5 ms.

1) Calcolare la caduta di tensione nel silicio, nonché le cariche fissa e mobile per $t < 0$ (SUGGERIMENTO: calcolare la V_{TH}). [3]

2) Calcolare la caduta di tensione nel silicio e le cariche fissa e mobile per $t = 0^+$. [4]

3) Determinare la carica generata dall'illuminazione per $t = 5$ ms, verificare che il condensatore MOS non è a regime e calcolare la caduta di tensione nel silicio, nonché le cariche fissa e mobile. [3]

SOLUZIONE 2

1)Calcoliamo anzitutto la tensione di soglia:

$$\begin{aligned}
\psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \\
\Phi_{MS} &= \Phi_M - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = -1.29 \text{ V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_b}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = -0.17 \text{ V}
\end{aligned}$$

Quindi per $V_{GB} = 0$ V il condensatore MOS è già all'inversione. Quindi avremo:

$$\begin{aligned}
V_S &= 2\psi_B = 0.694 \;\; \text{V} \\
Q_W &= Q_W(2\psi_B) = -\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_b} = 4.8 \times 10^{-4} \;\; \text{C/m}^2 \\
Q_n &= -C_{ox}\left(V_{GB} - V_{TH}\right) = -1.96 \times 10^{-4} \;\; \text{C/m}^2
\end{aligned}$$

2) A $t = 0^+$ dobbiamo scrivere l'equazione:

$$\begin{aligned}
V_{GS} &= -\frac{Q_W(V_s) + Q_n(t = 0^-)}{C_{ox}} + V_s + \Phi_{MS} \\
Q_W(V_s) &= -\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_s} \\
V_{GB} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_s} - Q_n(t = 0^-)}{C_{ox}} + V_s + \Phi_{MS}
\end{aligned}$$

Dove $Q_n(t = 0^-)$ è la carica mobile che si aveva prima di applicare il gradino. Risolvendo questa equazione otteniamo per V_s il valore accettabile $V_s = 5.0$ V. Quindi la carica mobile è pari a quella per $t = 0^-$, mentre quella fissa è negativa e risulta, in valore assoluto:

$$Q_W = \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_s} = 1.30 \times 10^{-3} \;\; \text{C/m}^2 \tag{4}$$

3) Calcoliamo il rate di generazione di coppie elettrone-lacuna. Le lacune sono portate via dal polo negativo della batteria V_{GB}, gli elettroni si accumulano nello strato di inversione e formano la Q_n. Il rate di generazione è pari al rate di arrivo dei fotoni:

$$\begin{aligned}
\text{En.Fotone} &= \frac{hc}{\lambda} = 3.14 \times 10^{-19} \;\; \text{J} \\
\text{FlussoFotoni} &= \frac{\text{Pot.}}{\text{En.fotone}} = 3.18 \times 10^{18} 1/(\text{sm}^2) \\
Q_{n\ gen}(5\text{ms}) &= 3.18 \times 10^{18}\ 1.602 \times 10^{-19}\ 5 \times 10^{-3} = 2.55 \times 10^{-3} \;\; \text{C/m}^2
\end{aligned}$$

Verifichiamo che non siamo all'equilibrio, perché dovremo avere $Q_n = C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 5.9 \times 10^{-3}$ C/m^2. La carica generata otticamente si aggiunge alla Q_n presente a $t = 0^-$, per cui l'equazione da risolvere è adesso:

$$V_{GS} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_s} - Q_n(t = 0^-) - Q_{n\ gen}}{C_{ox}} + V_s + \Phi_{MS} \tag{5}$$

La soluzione accettabile di questa equazione è $V_s = 3.022$ V, per cui si ha una carica fissa pari a:

$$Q_W = \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_s} = 1.01 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{C/m^2} \tag{6}$$

ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, i transistori Q_2 e Q_3 sono npn con $N_{Abase} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $\gamma_E = 0.998$.

1) Determinare la lunghezza metallurgica della base che garantisca un $\beta_{fminimo} = 150$. [3]

La tensione di uscita V_u risulta pari a 6 V. Il transistore Q_1 è un p^+np con $\beta_{fminimo} = 200$.

2) Determinare la tensione di base V_{B3} e le correnti nei transistori. [4]

3) Sapendo che il transistore M è un n-MOS con $t_{ox} = 30$ nm,$\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $V_{TH} = 1$, determinare W/L. [3]

SOLUZIONE 3

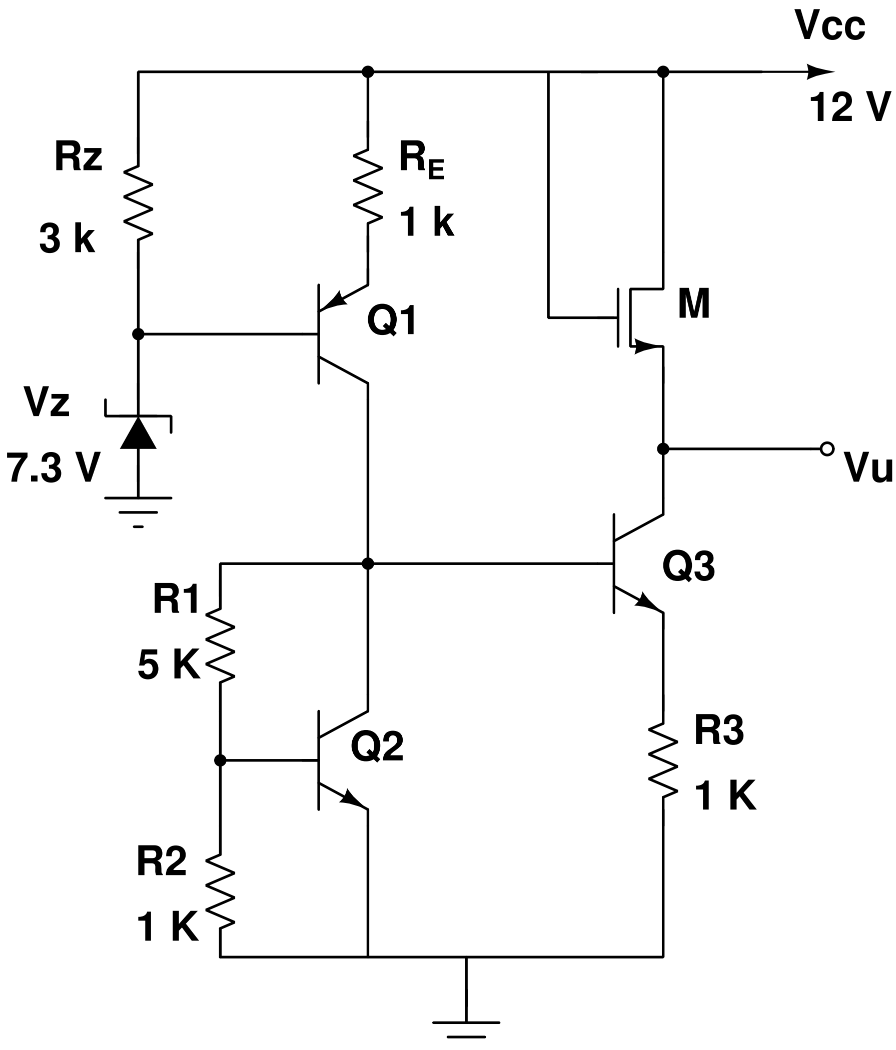
1) Dal β_f è possibile ricavare α_f, e quindi α_T conoscendo l'efficienza di emettitore. Da questo è possibile calcolare W_{met} che garantisca il $\beta_{fminimo}$, poiché W_{eff} è senz'altro inferiore (e quindi $\alpha_T \to \alpha_f \to \beta_f$ più grandi):

$$\begin{aligned}
\alpha_f &= \frac{\beta_f}{\beta_f + 1} = 0.993377 \\
\alpha_f &= \gamma_E \alpha_T \\
\alpha_T &= \frac{\alpha_f}{\gamma_E} = 0.995368 \\
\alpha_T &= \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2_n^2}} \\
W &= \sqrt{\frac{1-\alpha_T}{\alpha_T} 2_n^2} \\
D_n &= V_T \mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{m^2/Vs} \\
L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.80 \ \ \mu\mathrm{m} \\
W_{met} &= 4.9 \ \ \mu\mathrm{m}
\end{aligned}$$

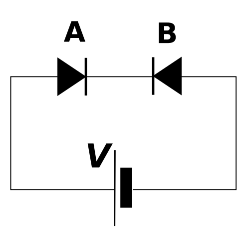
2) La corrente erogata da Q_1 è la corrente di collettore di Q_2, trascurando la corrente di base di Q_3. Avremo $V_{E1} = V_Z + 0.7 = 8$ V, $I_{E1} = (12 - 8)/1 = 4$ mA. La tensione di base di Q_3 non è altro che la $V_{BE2} \approx V_\gamma$ moltiplicata per $(R_1 + R_2)/R1 = 0.7 \times 6 = 4.2$ V, quindi $V_{B3} = 4.2$ V. Quindi la corrente che scorre in Q_3 è pari a $I_{C3} \simeq I_{E3} = (V_{B3} - V_\gamma)/R_E = 3.5$ mA. È semplice verificare che tutti i transistori sono correttamente polarizzati, e che I_B è trascurabile per tutti e tre i transistori, relativamente alle reti di polarizzazione.

3) Il transistore n-MOS è sicuramente in saturazione, poiché $V_{GS} = V_{DS} > V_{DS} - V_{TH}$. Abbiamo quindi:

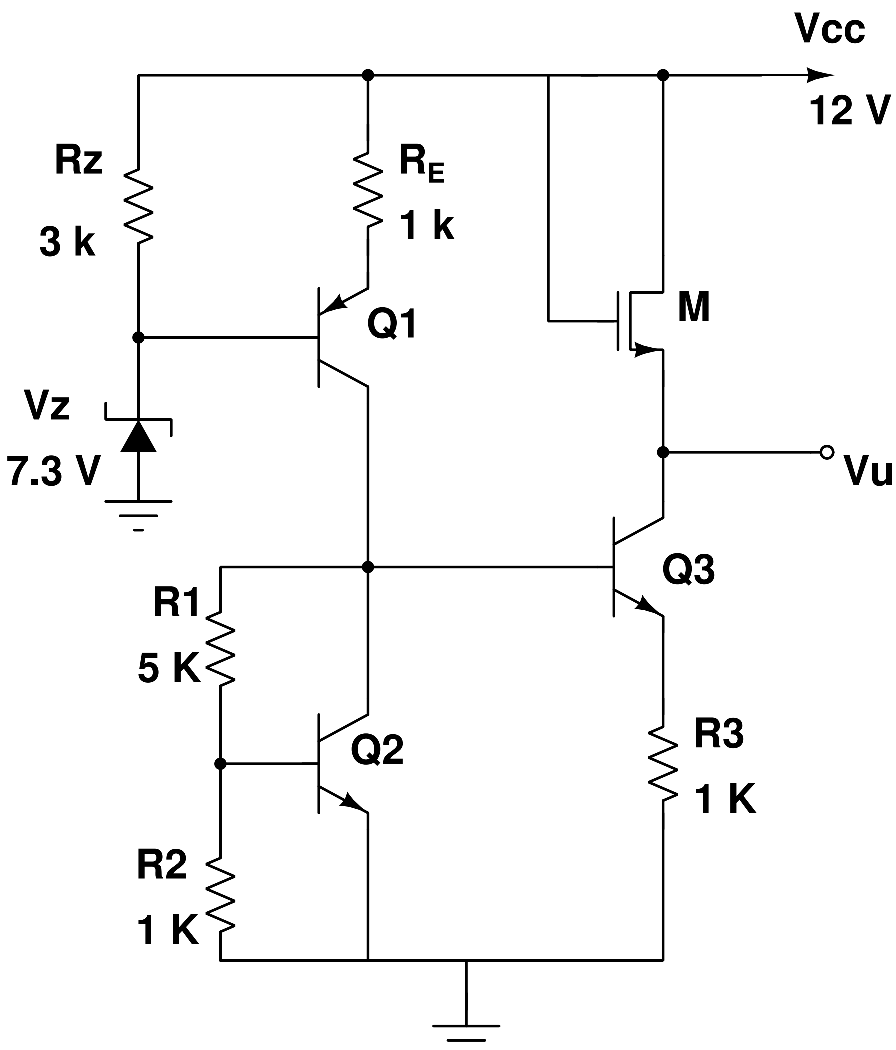
$$
\begin{aligned}
I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2 \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{F/m^2} \\
V_S &= V_u = 6 \ \ \mathrm{V}, \qquad I_{DS} = I_{C3} \simeq I_{E3} = 3.5 \ \ \mathrm{mA} \\
\frac{W}{L} &= \frac{2 I_{DS}}{\mu_n C_{ox} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)^2} = 3
\end{aligned}
$$



Vcc
12 V
Rz
3 k
RE
1 k
Q1
M
Vz
7.3 V
Vu
Q3
R1
5 K
Q2
R3
1 K
R2
1 K



A
B
V


Vcc
12 V
Rz
3 k
R_E
1 k
Q1
M
Vz
7.3 V
Vu
Q3
R1
5 K
Q2
R3
1 K
R2
1 K