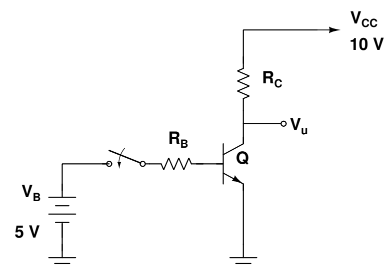
PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 8 Settembre 2016

ESERCIZIO 1

Il transistore in figura è un n^+pn^+, con $W = 3\ \mu$m, $N_{Abase} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m$^2/Vs$, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $S = 1$ mm^2. Trascurare le regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta. Il tasto comanda l'accensione (transistore in saturazione) e lo spengimento del transistore.



1) A tasto chiuso, la corrente di collettore deve essere pari a 10 mA: stimare R_C. Determinare la corrente di base affinché, nel transitorio di spengimento, si abbia uno storage delay time (t_{SD}) minore di 1 μs: stimare R_B. [4]

2) Determinare il profilo di portatori minoritari in base a regime (a transistore acceso), e determinare le tensioni ai terminali, assumendo il valore approssimato di $I_C = 10$ mA. Determinare il valore esatto di V_{CE}. [3]

3) In fase di accensione, determinare il tempo che la corrente di collettore impiega per andare a regime. [3]

ESERCIZIO 2

Un condensatore nMOS ha $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm, funzione di lavoro del gate uguale a quella del silicio. All'interfaccia ossido-silicio (in uno strato molto sottile nell'ossido) è presente una carica negativa, dovuta ad una concentrazione superficiale di accettori pari a 10^{12} cm^{-2} ($Q = -q10^{12}$ C/cm^2). Sul gate viene imposto un gradino di tensione pari a 5 V ($V_{GBulk} = 0$ per $t < 0$, $V_{GBulk} = 5$ V per $t > 0$).

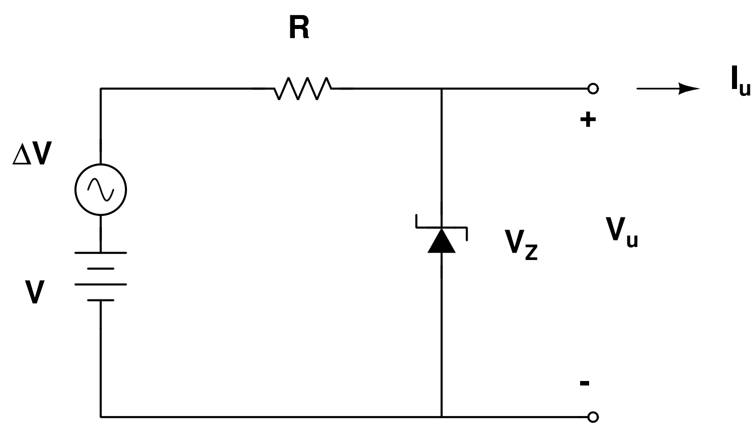
1) Determinare l'ampiezza della regione di svuotamento sotto il gate per $t = 0^+$ e per $t \to \infty$. [4]

2) Determinare il campo elettrico nel silicio, all'interfaccia ossido-silicio, a $t = 0^+$ e a $t \to \infty$ (attenzione! La carica parassita si trova nell'ossido). [3]

3) Determinare il campo elettrico nell'ossido a $t = 0^+$ e a $t \to \infty$. [3]

ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, una sorgente di tensione non stabilizzata viene usata per generare una tensione pari a 5 V stabilizzata. La sorgente di tensione è schematizzabile con un generatore di tensione in continua $V = 9$ V, più un generatore sinusoidale $\Delta V = V_P \cos(\omega t)$, con $V_P = 1$ V. Il diodo zener è costituito da una giunzione $p+n$, ed il campo elettrico di break-down è pari a 50 MV/m.

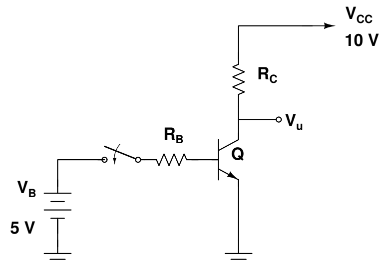


1) Determinare il drogaggio della parte n, in maniera tale da avere $V_Z = 5$ V (trascurare V_0). [3]

2) Determinare la resistenza R in maniera tale che il generatore possa funzionare con un carico massimo, posto ai morsetti di uscita (non indicato), pari a 10 Ω (resistenza minima). [4]

3) Il diodo zener ha una resistenza differenziale pari a 1 Ω. Determinare il valore massimo del fattore di regolazione in uscita $\frac{\Delta V_u}{\Delta V}$. [3]

ESERCIZIO 1 Il transistore in figura è un n^+pn^+, con $W = 3\ \mu$m, $N_{Abase} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m$^2/Vs$, $\tau_n = 10^{-6}$ s, $S = 1$ mm^2. Trascurare le regioni di svuotamento delle giunzioni polarizzate in diretta. Il tasto comanda l'accensione (transistore in saturazione) e lo spengimento del transistore.



1) A tasto chiuso, la corrente di collettore deve essere pari a 10 mA: stimare R_C. Determinare la corrente di base affinchè, nel transitorio di spengimento, si abbia uno storage delay time (t_{SD}) minore di 1 μs: e stimare R_B. [4]

2) Determinare il profilo di portatori minoritari in base a regime (a transistore acceso), e determinare le tensioni ai terminali, assumendo il valore approssimato di $I_C = 10$ mA. Determinare il valore esatto di V_{CE}. [3]

3) In fase di accensione, determinare il tempo che la corrente di collettore impiega per andare a regime. [3]

SOLUZIONE 1

1) Per V_{CE} piccole ($< V_{BE}$) il transistore è in saturazione, e quindi avremo che $I_C \simeq \frac{V_{CC}}{R_C} \rightarrow R_C = 1$ kΩ. Consideriamo una situazione a regime, con il tasto chiuso, e calcoliamo il tempo che impiega il transistore ad uscire dalla saturazione, che per definizione è t_{SD}. La carica in base si evolve come:

$$
\begin{aligned}
Q_B(t) &= Q_B(t = 0^-)e^{-\frac{t}{\tau_n}} \\
Q_B(t = 0^-) &= I_B\tau_n
\end{aligned}
$$

Per $t > 0$ e $t < t_{SD}$ avremo che la corrente di collettore rimane praticamente costante, e pari ad approssimativamente $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$. Il tempo t_{SD} è tale che la carica in base raggiunge la condizione di soglia della saturazione:

$$I_C = \frac{Q_B(t_{SD})}{\tau_t} \tag{1}$$

Avremo dunque per t_{SD}:

$$\begin{aligned} I_C &= I_B \frac{\tau_n}{\tau_t} e^{-\frac{t_{SD}}{\tau_n}} \\ \beta_F &= \frac{\tau_n}{\tau_t} \\ t_{SD} &= \tau_n \ln\left(\frac{I_B \beta_F}{I_C}\right) \end{aligned}$$

o anche, per il progetto della I_B dato t_{SD}:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_F} e^{\frac{t_{SD}}{\tau_n}} \tag{2}$$

Calcoliamo β_F in saturazione, assumendo trascurabili le ampiezze delle regioni di svuotamento. In realtà, dovremo calcolare β_F con $V_{CB} = 0$, cioè al limite della saturazione (con $W_{CB} = W_{CB}(V_{0\ CB})$). Semplificando i conti ($SW = 3\ \mu$m):

$$\begin{aligned} D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.59 \times 10^{-3}\ \ \text{m}^2/\text{Vs} \\ \tau_t &= \frac{W^2}{2D_n} \\ \beta_F &= \frac{\tau_n}{\tau_t} = \frac{\tau_n 2D_n}{W^2} = 575 \\ I_B &= \frac{I_C}{\beta_F} e^1 = 47\ \ \mu\text{A} \end{aligned} \tag{4}$$

La corrente di base viene fornita tramite un generatore di tensione $V_B = 5$ V ed una resistenza, il cui valore stimato considerando $V_{BE} = 0.7$ V è:

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{V_B - V_\gamma}{R_B} \\ R_B &= \frac{V_B - V_\gamma}{I_B} = 90\ \ \text{k}\Omega \end{aligned}$$

2) Avremo che il profilo in base è trapezoidale, e possiamo scrivere:

$$\begin{aligned} I_C &= qSD_n\frac{d\delta n}{dx} = qSD_n\frac{\delta n(0) - deltan(W)}{W} \\ I_B &= \frac{qS}{\tau_n}\frac{\delta n(0) + \delta n(W)}{2}W \end{aligned}$$

Risolvendo il sistema avremo:

$$\begin{aligned} \delta n(0) &= 1.35 \times 10^{20} \quad \mathrm{m}^{-3} \\ \delta n(W) &= 6.08 \times 10^{19} \quad \mathrm{m}^{-3} \end{aligned}$$

Da notare che è verificata la bassa iniezione. Dagli eccessi in 0 e W possiamo risalire alle tensioni V_{BE} e V_{CE}:

$$\begin{aligned} \delta n(0) &= \frac{n_i^2}{N_A}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right) \simeq \frac{n_i^2}{N_A}e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \\ V_{BE} &= V_T\ln\left(\frac{\delta n(0)N_A}{n_i^2}\right) = 0.58 \quad \mathrm{V} \\ \delta n(W) &\simeq \frac{n_i^2}{N_A}e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \\ V_{BC} &= V_T\ln\left(\frac{\delta n(W)N_A}{n_i^2}\right) = 0.56 \quad \mathrm{V} \end{aligned}$$

Quindi la V_{CE} risulta effettivamente molto piccola, pari a 0.02 V.

3) Nel transitorio di accensione abbiamo:

$$Q(t) = I_B\tau_n\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}\right) \tag{5}$$

La corrente I_C assume il valore di regime quando il transistore arriva al limite della zona attiva diretta:

$$\begin{aligned} Q(t_{ON}) &= I_{Cmax}\tau_t \\ I_B\tau_n\left(1 - e^{-\frac{t_{ON}}{\tau_n}}\right) &= I_{Cmax}\tau_t \\ \left(1 - e^{-\frac{t_{ON}}{\tau_n}}\right) &= \frac{I_C}{I_B\beta_F} \\ t_{ON} &= \tau_n\ln\frac{1}{1 - \frac{I_C}{I_B\beta_F}} = 0.47 \quad \mu\mathrm{s} \end{aligned}$$

ESERCIZIO 2

Un condensatore nMOS ha $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm, funzione di lavoro del gate uguale a quella del silicio. All'interfaccia ossido-silicio (in uno strato molto sottile nell'ossido) è presente una carica negativa, dovuta ad una concentrazione superficiale di accettori pari a 10^{12} cm^{-2} ($Q = -q10^{12}$). Sul gate viene imposto un gradino di tensione pari a 5 V ($V_{GBulk} = 0$ per $t < 0$, $V_{GBulk} = 5$ V per $t > 0$).

1) Determinare l'ampiezza della regione di svuotamento sotto il gate per $t = 0^+$ e per $t \to \infty$. [4]

2) Determinare il campo elettrico nel silicio, all'interfaccia ossido-silicio, a $t = 0^+$ e a $t \to \infty$ (attenzione! La carica parassita si trova nell'ossido). [3]

3) Determinare il campo elettrico nell'ossido a $t = 0^+$ e a $t \to \infty$. [3]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo la tensione di soglia a temperatura ambiente.

$$\begin{aligned}
Q &= -1.602 \times 10^{-3} \quad \mathrm{C/m^2} \\
\psi_B &= \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.329 \quad \mathrm{V} \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.726 \times 10^{-3} \quad \mathrm{F/m^2} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \frac{Q}{C_{ox}} = 1.86 \quad \mathrm{V}
\end{aligned}$$

A $t = 0^+$ la carica mobile è nulla, poichè non si è ancora generata termicamente. Quindi possiamo scrivere l'equazione:

$$\begin{aligned}
V_{GS} &= -\frac{Q}{C_{ox}} - \frac{Q_W}{C_{ox}} + V_S \\
V_{GS} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S - \frac{Q}{C_{ox}}
\end{aligned}$$

Risolvendo questa equazione, otteniamo come valore accettabile di $V_S = 3.62$ V. Da ciò otteniamo:

$$W(0^+) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} V_S} = 0.97 \quad \mu\mathrm{m} \tag{6}$$

Per tempi molto lunghi la regione di svuotamento sotto il gate è quella dovuta a $2\psi_B$:

$$W(t \to \infty) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} 2\psi_B} = 0.33 \ \ \mu\text{m} \tag{7}$$

2) Possiamo applicare il teorema di Gauss per calcolare il campo elettrico nel silicio, all'interfaccia:

$$\mathcal{E}_{Si}(x = 0) = -\frac{Q_{Si}}{\epsilon_{Si}} = -\frac{Q_n + Q_W}{\epsilon_{Si}} \tag{8}$$

A $t = 0^+$ la carica mobile è 0, e quindi:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{Si}(t = 0^+) &= -\frac{Q_W(V_S)}{\epsilon_{Si}} \\ \mathcal{E}_{Si}(t = 0^+) &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{\epsilon_{Si}} = 7.42 \ \ \text{MV/m} \end{aligned}$$

Per $t \to \infty$ la carica fissa è quella dovuta a $2\psi_B$, mentre quella mobile (negativa) si può calcolare come $Q_n = C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 5.41 \times 10^{-3}$ C/m^2. Quindi:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{Si}(t \to \infty) &= -\frac{Q_n + Q_W(2\psi_B)}{\epsilon_{Si}} \\ \mathcal{E}_{Si}(t \to \infty) &= \frac{C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) + \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{\epsilon_{Si}} = 54.6 \ \ \text{MV/m} \end{aligned}$$

3) Il campo elettrico nell'ossido è diverso da quello del silicio. Questo è dovuto sia alle diverse costanti dielettriche, sia alla carica all'interfaccia Q. Applicando di nuovo il teorema di Gauss nell'ossido avremo: $t = 0^+$:

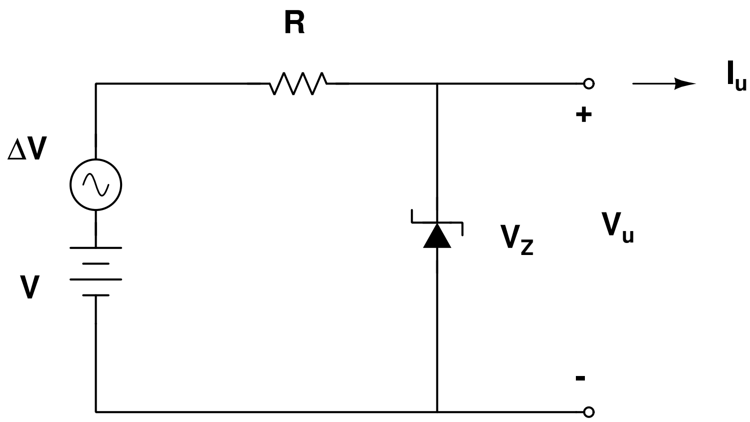
$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{ox}(t = 0^+) &= -\frac{Q + Q_W(V_S)}{\epsilon_{ox}} \\ \mathcal{E}_{ox}(t = 0^+) &= \frac{-Q + \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{\epsilon_{ox}} = 69.03 \ \ \text{MV/m} \end{aligned}$$

$t \to \infty$:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{ox}(t \to \infty) &= -\frac{Q + Q_n + Q_W(2\psi_B)}{\epsilon_{Si}} \\ \mathcal{E}_{ox}(t \to \infty) &= \frac{-Q + C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) + \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{\epsilon_{Si}} = 213 \ \ \text{MV/m} \end{aligned}$$

ESERCIZIO 3

Nel circuito in figura, una sorgente di tensione non stabilizzata viene usata per generare una tensione pari a 5 V stabilizzata. La sorgente di tensione è schematizzabile con un generatore di tensione in continua $V = 9$ V, più un generatore sinusoidale $\Delta V = V_P \cos(\omega t)$, con $V_P = 1$ V. Il diodo zener è costituito da una giunzione $p+n$, ed il campo elettrico di break-down è pari a 50 MV/m.



1) Determinare il drogaggio della parte n, in maniera tale da avere $V_Z = 5$ V (trascurare V_0). [3]

2) Determinare la resistenza R in maniera tale che il generatore possa funzionare con un carico massimo, posto ai morsetti di uscita (non indicato), pari a 10 Ω (resistenza minima). [4]

3) Il diodo zener ha una resistenza differenziale pari a 1 Ω. Determinare il valore massimo del fattore di regolazione in uscita $\frac{\Delta V_u}{\Delta V}$. [3]

SOLUZIONE 3

1) Quando il campo elettrico massimo nella giunzione raggiunge quello critico, la giunzione va in break-down. Avremo:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{max} &= \frac{qN_D}{\epsilon_s}x_n = \frac{qN_D}{\epsilon_s}W \\ \mathcal{E}_{max} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s qN_D\left(V_0+V_{BD}\right)}}{\epsilon_s} \simeq \frac{\sqrt{2\epsilon_s qN_D V_{BD}}}{\epsilon_s}\end{aligned}$$

Da questa ultima equazione possiamo ricavarci $N_D = 1.6 \times 10^{23}$ m^{-3}, dato $V_{BD} = V_Z = 5$ V e $\mathcal{E}_{max} = 50$ MV/m

2) La corrente massima che il generatore deve erogare è dunque 5/10=0.5 A (600 mA). Quando il generatore ha il massimo carico (massima corrente, minima resistenza), tutta la corrente passa dal carico. Quando il generatore non è caricato, questa corrente polarizza il diodo zener. Una stima della resistenza R si può ottenere come:

$$\begin{aligned} I_{max} &= \frac{V_{min} - V_u}{R} \\ R &= \frac{V_{min} - V_u}{I_{max}} = \frac{8-6}{0.6} = 6 \quad \Omega \end{aligned}$$

3) La massima variazione della tensione di uscita, per una variazione della tensione di ingresso, è data da:

$$\Delta V_u = \Delta V \frac{R_{out}}{R + R_{out}} \tag{9}$$

dove R_{out} è data dal parallelo tra la resistenza R_Z dello zener e la resistenza di carico all'uscita. Quindi la massima variazione in uscita si ha con il minimo carico, cioè senza resistenza in uscita: $R_{out} = R_Z$, $R_{load} \to \infty$:

$$\Delta V_u = 1 \frac{R_Z}{R + R_Z} = 0.14 \quad \text{V} \tag{10}$$