

PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 18 Febbraio 2020

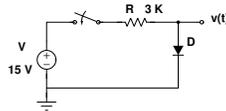
ESERCIZIO 1

Il diodo p^+n in figura ha $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, sezione $S = 1 \text{ mm}^2$.

1) Determinare l'andamento della tensione $v(t)$ ai capi del diodo, alla chiusura del tasto. SUGGERIMENTO: si assuma $v(t)$ trascurabile rispetto a V , e verificare l'approssimazione alla fine dei conti. [4]

2) Il tasto viene aperto una volta raggiunta la condizione di regime. Determinare l'andamento di $v(t)$ dopo l'apertura del tasto. [2]

3) Determinare l'andamento di $v(t)$ se il tasto viene aperto, anziché a regime, dopo un tempo $t = \tau_p$. [4]



ESERCIZIO 2

Un transistor n -MOS polysilicon gate ha $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $W/L = 10$, $L = 10 \mu\text{m}$, carica all'interfaccia ossido-silicio dovuta a stati carichi negativamente, con concentrazione pari a 5×10^{11} stati per cm^2 . Il source è polarizzato rispetto al substrato, $V_{SBulk} = 3 \text{ V}$.

1) Determinare le tensioni di soglia del condensatore MOS e del transistor MOS. [2]

2) Per $V_{GS} = 1 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0 \text{ V}$ determinare la caduta di tensione nel silicio (tra superficie e bulk) e la concentrazione di elettroni all'interfaccia ossido-silicio, per $y = L/2$. [4]

3) Per $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0.5 \text{ V}$ (zona lineare) determinare la caduta di tensione nel silicio e la carica mobile per $y = L/2$. [4]

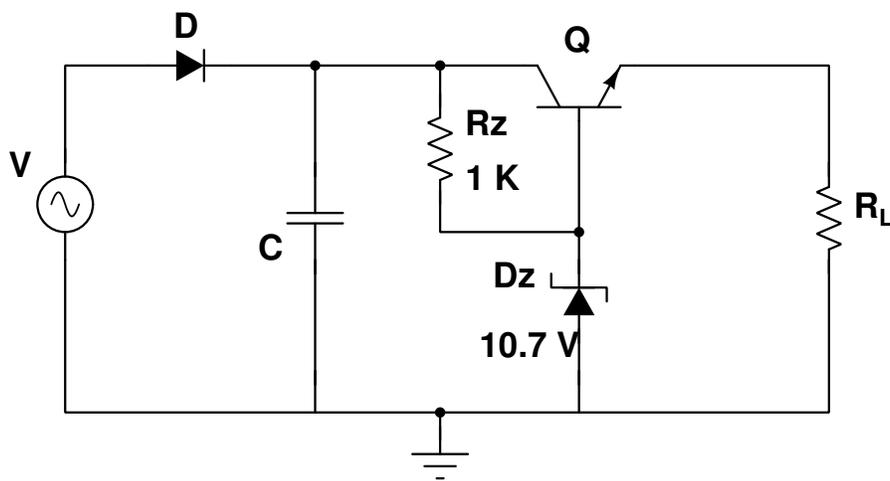
ESERCIZIO 3

Nell'alimentatore in figura il transistor Q è un n^+pn con $N_{Abase} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = 10^{-8} \text{ s}$, $W_{met} = 5 \mu\text{m}$. V_{in} è un generatore sinusoidale, di ampiezza efficace $V_{rms} = 12 \text{ V}$. L'alimentatore deve fornire in uscita almeno 200 mA .

1) Determinare la mobilità degli elettroni nella base per avere un β_{fmin} pari ad almeno 100. Determinare inoltre la sezione del transistore per avere una densità di corrente minore di 50 kA/m^2 . [3]

2) Determinare R_L minima, e verificare che il transistore sia correttamente polarizzato. Determinare il valore di C per avere una variazione massima di V_C (tensione di ripple) pari a 0.2 V (assumere il diodo zener ideale). NOTA: il transistore funziona da carico per il raddrizzatore. [4]

3) Determinare il valore massimo di R_Z che garantisca la corretta polarizzazione del diodo zener. [3]

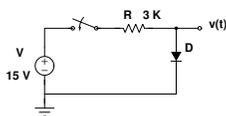


ESERCIZIO 1 Il diodo p^+n in figura ha $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_p = 0.04 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$, sezione $S = 1 \text{ mm}^2$.

1) Determinare l'andamento della tensione $v(t)$ ai capi del diodo, alla chiusura del tasto. SUGGERIMENTO: si assuma $v(t)$ trascurabile rispetto a V , e verificare l'approssimazione alla fine dei conti. [4]

2) Il tasto viene aperto una volta raggiunta la condizione di regime. Determinare l'andamento di $v(t)$ dopo l'apertura del tasto.[2]

3) Determinare l'andamento di $v(t)$ se il tasto viene aperto, anziché a regime, dopo un tempo $t = \tau_p$. [4]



SOLUZIONE 1

1) Il transitorio di un diodo al quale viene applicato un generatore di tensione non è semplice. Tuttavia, considerando l'approssimazione suggerita dal testo, abbiamo che la corrente che scorre nel diodo è praticamente costante, se $v(t) \ll V$, e pari a $V/I = 3 \text{ mA}$. Quindi essenzialmente si può pensare come il transitorio dovuto all'applicazione di un generatore di corrente, visto a lezione e riportato sulle dispense. Quindi:

$$\begin{aligned} I(t < 0) &= 0 \\ I(t > 0) &\simeq \frac{V}{R} = 5 \text{ mA} \\ I &= \frac{dQ}{dt} + \frac{Q(t)}{\tau_p} \quad \text{per } t > 0 \end{aligned}$$

Questa equazione differenziale ha come soluzione:

$$Q(t) = I\tau_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) \quad (1)$$

Dall'approssimazione di quasi-equilibrio otteniamo:

$$Q(t) = I_s\tau_p \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right) = I\tau_p \quad (2)$$

Facendo i passaggi (vedi dispensa) otteniamo:

$$v(t) = V_T \ln \left[\frac{I}{I_s} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) + 1 \right] \quad (3)$$

dove:

$$\begin{aligned}
 I_S &= qS \frac{L_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D} \\
 D_p &= \frac{kT}{q} \tau_p = 1.034 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{Vs} \\
 L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 32.15 \text{ } \mu\text{m} \\
 I_S &= 1.16 \text{ pA}
 \end{aligned}$$

Bisogna a questo punto verificare che $v(t) \ll V \forall t$; la tensione è massima a regime, per cui si ha:

$$v(t)_{\max} = v(t \rightarrow \infty) = V_T \ln \left(\frac{I}{I_S} - 1 \right) = 0.7 \text{ V} \quad (4)$$

Quindi l'approssimazione di trascurare $v(t)$ rispetto a V per il calcolo della corrente è più che giustificata.

2) Il transitorio di spengimento è semplicemente:

$$\begin{aligned}
 Q(t) &= I \tau_p e^{-\frac{t}{\tau_p}} = I_S \tau_p \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right) \\
 v(t) &= V_T \ln \left(\frac{I}{I_S} e^{-\frac{t}{\tau_p}} + 1 \right)
 \end{aligned}$$

3) A regime la carica risulta $Q = I \tau_p$, da cui il transitorio di spengimento $Q(t) = I \tau_p e^{-\frac{t}{\tau_p}}$. Per $t = \tau_p$ il regime non è ancora raggiunto, per cui avremo che all'apertura del tasto la carica è minore. Avremo:

$$\begin{aligned}
 Q(t = \tau_p) &= I \tau_p (1 - e^{-1}) = 3.2 \times 10^{-9} \text{ C} \\
 Q(t > \tau_p) &= Q(t = \tau_p) e^{-\frac{t}{\tau_p}}
 \end{aligned}$$

dove l'ultima equazione è stata scritta ponendo $t = 0$ all'apertura del tasto. Avremo dunque:

$$\begin{aligned}
 Q(t) &= I_S \tau_p \left(e^{\frac{v(t)}{V_T}} - 1 \right) = Q(t = \tau_p) e^{-\frac{t}{\tau_p}} \\
 v(t) &= V_T \ln \left(\frac{Q(t = \tau_p)}{I_S \tau_p} e^{-\frac{t}{\tau_p}} + 1 \right)
 \end{aligned}$$

ESERCIZIO 2

Un transistoro n -MOS polysilicon gate ha $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 30 \text{ nm}$, $W/L = 10$, $L = 10 \text{ }\mu\text{m}$, carica all'interfaccia ossido-silicio dovuta a stati carichi negativamente, con concentrazione pari a 5×10^{11} stati per cm^2 . Il source è polarizzato rispetto al substrato, $V_{Sbulk} = 3 \text{ V}$.

1) Determinare le tensioni di soglia del condensatore MOS e del transistoro MOS. [2]

2) Per $V_{GS} = 1 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0 \text{ V}$ determinare la caduta di tensione nel silicio (tra superficie e bulk) e la concentrazione di elettroni all'interfaccia ossido-silicio, per $y = L/2$. [4]

3) Per $V_{GS} = 5 \text{ V}$ e $V_{DS} = 0.5 \text{ V}$ (zona lineare) determinare la caduta di tensione nel silicio e la carica mobile per $y = L/2$. [4]

SOLUZIONE 2

1) Innanzitutto calcoliamo la tensione di soglia del condensatore MOS:

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$Q_{ox} = -q10^{16} = -8.01 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$$

(6)

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$$

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V}$$

$$\Phi_{MS} = -\left(\frac{E_g}{2q} + \psi_B\right) = -0.907 \text{ V}$$

$$V_{THcond} = 0.904 \text{ V}$$

La tensione di soglia del transistoro MOS è riferita al Source, ed è modificata dalla polarizzazione V_{Sbulk} :

$$V_{TH} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B + V_{Sbulk}}{C_{ox}}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

$$V_{THtransistore} = 1.45 \text{ V}$$

2) Per $V_{GS} = 1$ V il transistoro MOS è interdettato, poiché $V_{GS} < V_{TH}$. Avremo che la caduta di tensione nel silicio è data dall'equazione ($V_{GB} = V_{GS} + V_{Sbulk} = 4$ V):

$$V_{GBulk} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (7)$$

che ha come soluzione accettabile $V_S = 3.3$ V. La concentrazione di elettroni all'interfaccia ossido-silicio è trascurabile, ma può essere calcolata con l'equazione:

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{n_i^2}{N_A} e^{-\frac{V_{Sbulk} - V_S}{V_T}} \\ n_s &= 2.5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3} \end{aligned}$$

3) Se $V_{GS} = 5$ V $> V_{TH}$ siamo all'inversione. Avremo dunque che la caduta di tensione nel silicio è maggiore della caduta di tensione necessaria all'inversione, che è pari a $2\psi_B + V_{Sbulk}$ (ricordare che il Source è polarizzato rispetto al substrato). Poiché $V_{DS} > 0$, e siamo in regime lineare, avremo che:

$$\begin{aligned} V_S &= 2\psi_B + V_{Sbulk} + V(y) \\ V(y = \frac{L}{2}) &= \frac{V_{DS}}{2} = 0.25 \text{ V} \\ V_S(y = \frac{L}{2}) &= 3.94 \text{ V} \end{aligned}$$

La carica mobile per unità di superficie è negativa e pari a:

$$Q_n = C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) = 4.1 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2 \quad (8)$$

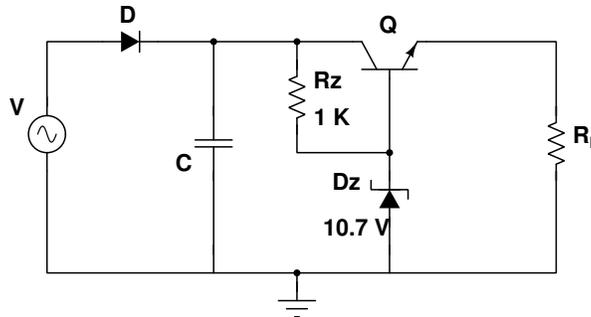
ESERCIZIO 3

Nell'alimentatore in figura il transistoro Q è un n^+pn con $N_{Abase} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = 10^{-8}$ s, $W_{met} = 5 \mu\text{m}$. V_{in} è un generatore sinusoidale, di ampiezza efficace $V_{rms} = 12$ V. L'alimentatore deve fornire in uscita almeno 200 mA.

1) Determinare la mobilità degli elettroni nella base per avere un β_{fmin} pari ad almeno 100. Determinare inoltre la sezione del transistoro per avere una densità di corrente minore di 50 kA/m². [3]

2) Determinare R_L minima, e verificare che il transistoro sia correttamente polarizzato. Determinare il valore di C per avere una variazione massima di V_C (tensione di ripple) pari a 0.2 V (assumere il diodo zener ideale).[4]

3) Determinare il valore massimo di R_Z che garantisca la corretta polarizzazione del diodo zener. [3]



SOLUZIONE 3

1) Abbiamo:

$$\begin{aligned} \beta_f &= 100 \\ \alpha_f &= \frac{\beta_f}{\beta_f + 1} = 0.990099 \\ \alpha_f &= \alpha_t = \frac{1}{1 + \frac{W^2}{2L_n}} \\ L_n^2 &= n\tau_n = \frac{W^2}{2\frac{1-\alpha_t}{\alpha_t}} = 1.24 \times 10^{-9} \\ n &= 0.125 \text{ m}^2/\text{s}\mu_n \\ 4.83 \text{ m}^2/\text{Vs} &= \end{aligned}$$

Per quanto riguarda la densità di corrente abbiamo semplicemente $I_{max}/J_{max} = 0.2/50k = 4 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 4 \text{ mm}^2$.

2) La corrente massima del transistoro è pari a 0.2 A. La tensione di emettitore è pari a $V_Z - V_\gamma = 10 \text{ V}$, quindi $R_{Lminima} = 50 \Omega$. A monte del collettore c'è un diodo che funziona da raddrizzatore, e un condensatore.

Quindi, se il raddrizzatore funziona e il ripple è piccolo (bisogna progettare C per avere $V_{ripple} = 0.2$), la V_C è praticamente la tensione di picco (meno V_γ se il diodo non è ideale). Quindi $V_C = V_{rms}\sqrt{2} \simeq 17$ V. La V_{CE} è pari dunque a circa 7 V, quindi il transistor è correttamente polarizzato. Per avere un ripple minore di 0.2 V possiamo scrivere:

$$\begin{aligned} V_{ripple} &= \frac{V_P}{fRC} \\ R &= \frac{V_C}{I_{Cmax}} = \frac{17}{0.2} = 85 \ \Omega \\ C &= 20 \text{ mF} \end{aligned}$$

3) Il valore massimo di $I_{EC} = 0.2$ A, che vuol dire che il valore massimo di $I_{Bmax} = I_{Emax}/\beta_{f \ min} = 2$ mA. La R_Z quindi deve essere in grado di fornire 2 mA alla base, piú 1 mA per polarizzare lo zener. Quindi avremo:

$$\begin{aligned} I_{R_Z} &= 3 \text{ mA} \\ V_{R_Z} &= V_C - V_Z = 6.3 \text{ V} \\ R_Z &= 2.1 \text{ K}\Omega \end{aligned}$$