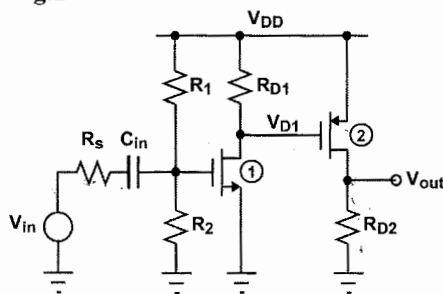


24 Novembre 2006

Indicare chiaramente la domanda a cui si sta rispondendo. Ad esempio 1a) ...

Esercizio 1. Si consideri l'amplificatore a due stadi in Fig.1.

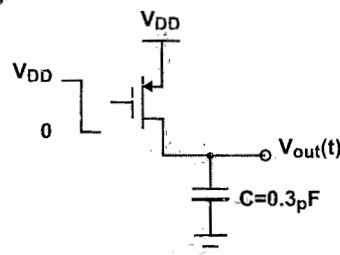
Fig.1

 $V_{DD}=5V$ $C_{in}=1nF$ $R_s=10k\Omega$ $R_1=30k\Omega$ $R_2=20k\Omega$ $R_{D1}=2k\Omega$ $R_{D2}=2k\Omega$ $V_{tn}=|V_{tp}|=1.5V$ $K_n=4mA/V^2$ $K_p=4mA/V^2$

- Polarizzare il circuito (suggerimento: polarizzare prima lo stadio 1 e poi il 2);
- Calcolare i guadagni di piccolo segnale $G_1=V_{D1}/V_{in}$ e $G_2=V_{out}/V_{in}$ a media frequenza (C_{in} in cortocircuito);
- Si immagina adesso di inserire in parallelo a R_{D2} una capacità C_1 di 5 pF. Calcolare in questo caso il guadagno a 160 MHz.
- Aumentando a media frequenza l'ampiezza di ingresso, quale transistor uscirà per primo dalla zona di saturazione? (Giustificare la risposta)

Esercizio 2. Al MOS in Fig.2 è applicato, all'istante $t=0$, un gradino al gate, da V_{DD} a 0 Volt.

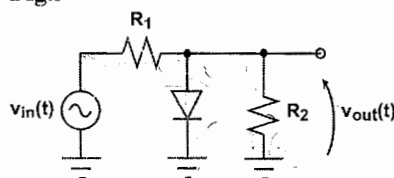
Fig.2

 $V_{DD}=3V$ $|V_{tp}|=1V$ $K_p=0.2mA/V^2$

- Sapendo che il condensatore è inizialmente scarico, per quale valore di $V_{out}(t)$ il transistor entra in zona triodo?
- Quanto tempo (t_1) occorre al MOS per entrare in zona triodo?
- Assumendo che $t_2=100$ ps, quanta energia viene dissipata dal MOS nell'intervallo di tempo $0 - t_2$?
- Quanta energia è dissipata nel MOS alla fine del transitorio? Come cambierebbe questo valore raddoppiando il (W/L) del transistor?

Esercizio 3. Si consideri il circuito di fig.3.

Fig.3

 $V_{in}(t)=3V \cdot \cos(\omega_0 t)$ $\omega_0=628krad/s$ $|V_{BD}|=6V$ $R_1=10k\Omega$ $R_2=1k\Omega$

- Disegnare in un diagramma temporale quotato $V_{out}(t)$ (al solito, considerare 0.7 la tensione di on del diodo).
- Disegnare in un diagramma temporale quotato $V_{out}(t)$ quando l'ampiezza del segnale in ingresso è di 10 Volt.
- Calcolare in questo secondo caso il picco di potenza dissipata nel diodo.
- Considerando la caratteristica reale del diodo, viene dissipata potenza nel diodo stesso, durante la semionda negativa del segnale di ingresso? (giustificare la risposta)

Esercizio 4.

Si consideri un MOS in zona di saturazione.

- Cosa è la transconduttanza g_m ? Definirla e ricavarne l'espressione.
- Volendo raddoppiare la g_m , a pari corrente e lunghezza di canale L , come deve variare la W del MOS?
- In questo caso, come varierebbe la capacità di ingresso del MOS stesso?
- In generale conviene utilizzare MOS di tipo n o di tipo p? (giustificare la risposta)

1a) $V_{G1} = \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = \frac{5 \cdot 20}{50} = 2V = V_{GS1} > V_{th} \text{ (1) acceso}$

$$I_{D1} = K_n (V_{GS1} - V_{th})^2 = 4 \cdot (2 - 1.5)^2 = 1 \text{ mA}$$

$$V_{D1} = V_{DD} - I_{D1} R_{D1} = 5 - 2 = 3V = V_{DS1}$$

Essendo $V_{DS1} > V_{GS1} - V_{th}$, il MOS(1) è in saturazione

$$g_{m1} = 2K V_{GS1} = 4 \text{ mA/V}$$

$$V_{G2} = V_{DS1} = 3V$$

$$|V_{GS2}| = 2V > |V_{tp}| \Rightarrow \text{MOS(2) acceso}$$

$$I_{D2} = K (|V_{GS2}| - |V_{tp}|)^2 = 1 \text{ mA}$$

$$V_{D2} = V_{out} = 2V = |V_{DS2}|$$

Essendo $|V_{DS2}| > |V_{GS2}| - |V_{tp}|$, il MOS(2) è in saturazione

$$g_{m2} = 4 \text{ mA/V}$$

1b) $G_1 = \frac{V_{D1}}{V_{in}} = -g_{m1} R_{D1} \cdot \frac{R_1 // R_2}{R_S + R_1 // R_2} = -4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{20 \cdot 30}{50 \cdot 10 + 20 \cdot 30}$

$$= -8 \cdot \frac{600}{1100} = -4.36$$

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{V_{out}}{V_{D1}} = -4.36 \cdot (-g_{m2} R_{D2}) = -4.36 \cdot (-8) = 34.9$$

1c) $\omega_{pole} \text{ dovuto a } C_1 = \frac{1}{R_{D2} \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-12}} = \frac{10^9}{10} = 10^8$

$$f_{pole} = \frac{\omega_{pole}}{2\pi} = \frac{10^8}{6.28} = 15.92 \text{ MHz}$$

Essendo $160 \text{ MHz} \approx 10 f_{pole}$, il guadagno a 160 MHz si riduce di un fattore 10 rispetto a 16 MHz , quindi pari di 3.5

1 d) Il MOS ②: la V_{DS} è infatti la stessa (in modulo) per i due MOS, quindi, ricevendo il MOS ② un segnale amplificato di un fattore G_1 , sarà il primo a uscire dalla zona di saturazione.

2 a) Il pMOS entra in zona triodo quando $|V_{DS}| \leq |V_{GS}| - |V_{tp}|$
 Essendo $|V_{GS}| = V_{DD}$, avremo $|V_{DS}| = V_{DD} - |V_{tp}|$
 In tal caso $V_{out} = V_{DD} - |V_{DS}| = |V_{tp}| = 1V$

2 b) Prima di entrare in zona triodo il MOS lavora in saturazione e invetta in C una corrente costante pari a

$$I_D = K (|V_{GS}| - |V_{tp}|)^2 = 0.2 \cdot (2)^2 = 0.8 \text{ mA}$$

Per caricare a 1V il condensatore impiega un tempo t_1

pari a

$$t_1 = \frac{C \cdot |V_{tp}|}{I_D} = \frac{0.3 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{0.8 \cdot 10^{-3}} = 375 \text{ ps}$$

2 c) Nell'intervallo $0 - t_2$ il MOS è saturo e carica C a corrente $I_D = 0.8 \text{ mA}$ costante. La variazione di tensione ΔV in C vale

$$\Delta V = \frac{t_2 \cdot I_D}{C} = \frac{100 \cdot 10^{-12} \cdot 0.8 \cdot 10^{-3}}{0.3 \cdot 10^{-12}} = 0.267 \text{ V}$$

cui corrisponde una energia immagazzinata nel condensatore

$$E_C = \frac{1}{2} C \Delta V^2 = \frac{1}{2} \cdot 0.3 \cdot 10^{-12} \cdot 0.267^2 = 0.01 \text{ pJ}$$

Nell'intervallo $0 - t_2$ il generatore V_{DD} eroga una potenza costante

$$P_{gen} = V_{DD} \cdot I_D, \text{ cui corrisponde una energia } E_{gen} = P_{gen} \cdot t_2 = \cancel{3 \cdot 0.8 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 3 \cdot 0.8 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-12} = 0.24 \text{ pJ}$$

L'energia dissipata dal MOS è la differenza tra l'energia resa dal generatore e quella immagazzinata nel condensatore C: $E_{MOS} = E_{gen} - E_C = 0.23 \text{ pJ}$

Si arriva al medesimo risultato se si osserva che la potenza istantanea

dissipata dal MOS è $p(t) = I_D \cdot |V_{DS}(t)|$ dove $|V_{DS}(t)| = V_{DD} - V_C(t)$. Essendo

poi $dE_{MOS} = p(t)_{MOS} \cdot dt$, basta sostituire e integrare tra 0 e t_2 .

2d) In un istante qualunque durante il transitorio la potenza dissipata nel MOS vale

$$P_{MOS} = i(t) \cdot (V_{DD} - V_c(t))$$

dove $i(t)$ è la corrente che passa nel MOS (e che carica anche C). L'energia dissipata in un infinitesimo dt vale dunque

$$dE = P_{MOS}(t) dt = i(t) \cdot (V_{DD} - V_c(t)) dt$$

e l'energia totale si trova integrando tra 0 e ∞ .

$$\begin{aligned} E &= \int_0^{\infty} i(t) (V_{DD} - V_c(t)) dt = \int_0^{\infty} i(t) V_{DD} dt - \int_0^{\infty} i(t) V_c(t) dt \\ &= V_{DD} \int_0^{\infty} i(t) dt - \int_0^{V_{DD}} \frac{1}{C} V_c(t) dV_c \end{aligned}$$

Il primo integrale fornisce la carica nel condensatore a fine transitorio, quando la tensione ai suoi capi vale V_{DD} .

~~Quindi~~ Il secondo integrale è $\frac{1}{2} C V_c^2$ (energia immagazzinata nel condensatore). Quindi

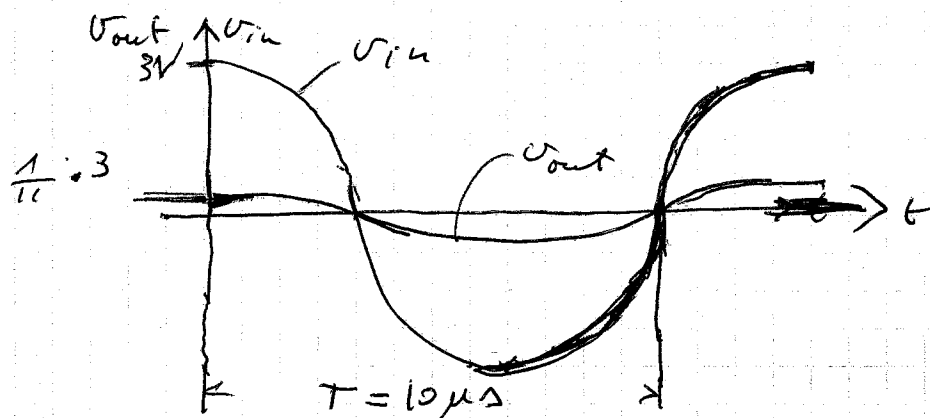
$$E = Q V_{DD} - \frac{1}{2} C V_{DD}^2 = \frac{1}{2} C V_{DD}^2 = 1,35 \text{ pJ.}$$

$\hookrightarrow Q = C V_{DD}$

L'energia dissipata è la stessa di quella accumulata nel condensatore.

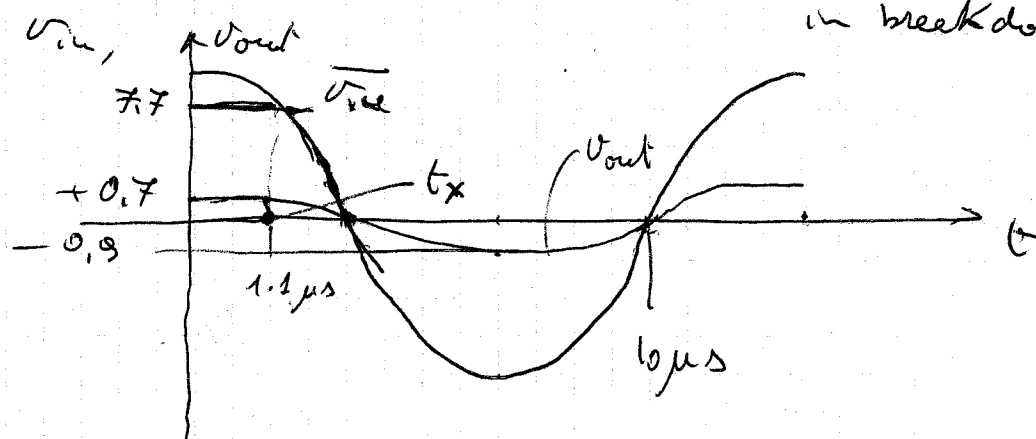
Cambiando $\frac{V_c}{C}$ non cambia nulla.

3a) V_{out} non raggiunge mai la tensione necessaria a far accendere il diodo. Infatti $V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{11} V_{in}$, che è sempre minore di $0,7 \text{ V}$.



$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{6.28 \text{ rad}}{628 \text{ rad/s}} = 10^{-5} \text{ s} = 10 \mu\text{s}$$

- 3b) ~~del~~ In questo caso v_{in} riesce ad accendere il diodo ~~folato~~ nel semiperiodo positivo (e v_{out} riesce a arrivare a 0.7 V e non si pone il diodo). Nel semiperiodo negativo invece non riesce a accendere in breakdown il diodo.



Calcoliamo il tempo t_x

$$7.7 = 10 \cos(\omega_0 t_x)$$

$$\pm \omega_0 t_x = \arccos 0.77$$

$$\pm t_x = \frac{\arccos 0.77}{628 \cdot 10^3} = \frac{(39.65^\circ)}{628 \cdot 10^3} = \frac{1.1 \cdot 10^{-6}}{628 \cdot 10^3} \quad \left(\begin{array}{l} 39.65^\circ : 180 = x : 3.14 \\ x = \frac{39.65 \cdot 3.14}{180} \end{array} \right)$$

- 3c) Vale il bilancio di correnti

$$I_{R1} = I_D + I_{R2} \quad \text{da cui} \quad I_{D \max} = (I_{R1} - I_{R2})_{\max}$$

$$\text{dove} \quad I_{R1 \max} = \frac{10 - 0.7}{10 \text{ k}} \quad I_{R2 \max} = \frac{V_D}{R_2} = \frac{0.7}{1 \text{ k}}$$

$$\text{Quindi} \quad I_{D \max} = 0.93 - 0.7 = 0.23 \text{ mA}$$

da qui ~~la potenza massima~~ il picco di potenza nel diodo

$$P_{\max} = 0.23 \cdot 0.7 = 0.161 \text{ mW}$$

3d) Durante la reiniezione negativa il diodo dissipa potenza.

Infatti, dalla caratteristica del diodo reale

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V_D}{V_{th}}} - 1 \right)$$

vediamo che per $V_D < 0$ $I_D = -I_0 \neq 0$

Quindi vi ha una reppar piccola potenza dissipata dovuta alla corrente inversa I_0 che circola nel diodo.

4a) Definizione di transconduttanza

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \quad (e V_{DS} = \text{cost})$$

essendo $I_D = \mu \left(V_{GS} - V_T \right)^2 \sqrt{1 + \lambda V_{DS}}$ per il MOS in saturazione, si ha

$$g_m = 2\mu (V_{GS} - V_T) = 2\mu V_{OD} = \frac{2 I_D}{V_{OD}} = 2\sqrt{\mu} \sqrt{I_D}$$

4b) Dalle $g_m = 2\sqrt{\mu} \sqrt{I_D}$, ricordando che $\mu = \frac{q}{C} \frac{W}{L}$,

vediamo che per raddoppiare g_m (a porta di corrente e di L) dobbiamo quadruplicare μ , quindi dobbiamo quadruplicare W .

4c) Siccome la capacità del MOS vale

$$C = C'_{ox} \cdot W \cdot L$$

dove C'_{ox} è la capacità per unità di area, quadruplicando W si quadruplica C .

4d) Conviene utilizzare MOS di tipo n, dato che a porta di corrente necessitano di un W minore e prone alle maggiori mobilità degli elettroni rispetto alle lacune.