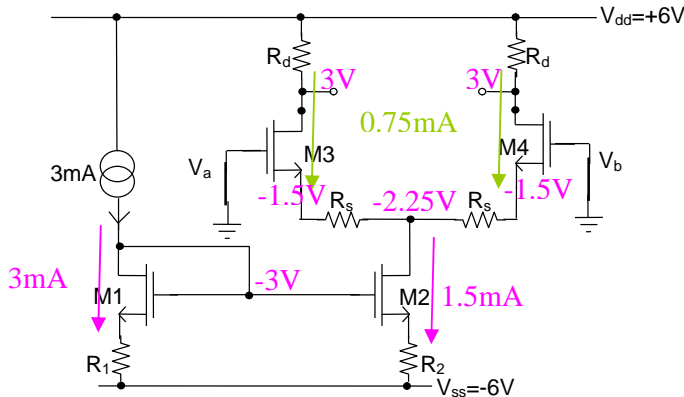


**Fondamenti di Elettronica - Ingegneria Elettronica - a.a. 2006/07**  
**Secondo appello – 12 luglio 2007– Traccia di soluzione**

**Esercizio 1**

**a) Polarizzazione**



I MOSFET operano in zona di saturazione e la transconduttanza di M3 e M4 vale  $g_m = 1.5mS$

**b) guadagno differenziale di piccolo segnale  $(v_{o,a}-v_{o,b})/(v_a-v_b)$  a bassa frequenza**

I due condensatori sono sostituibili con circuiti aperti e, poiche' i MOSFET hanno  $r_0$  infinita, il generatore di coda e' ideale. Pertanto, il guadagno differenziale risulta pari a:

$$\frac{v_{o,a} - v_{o,b}}{v_a - v_b} = - \frac{2R_d}{\frac{1}{g_{m,3}} + R_s + R_s + \frac{1}{g_{m,4}}} = - \frac{R_d}{\frac{1}{g_m} + R_s} = -2.4$$

**b) guadagno di modi comune di piccolo segnale  $(v_{o,a}+v_{o,b})/(v_a+v_b)$  a bassa frequenza**

Poiche' i MOSFET hanno  $r_0$  infinita, il generatore di coda e' ideale, pertanto il guadagno di modo comune risulta pari a 0.

**c) Diagramma di Bode del modulo del guadagno differenziale**

Su segnale differenziale il condensatore  $C_1$  non vede variare la tensione ai suoi capi, quindi non introduce singularita'.

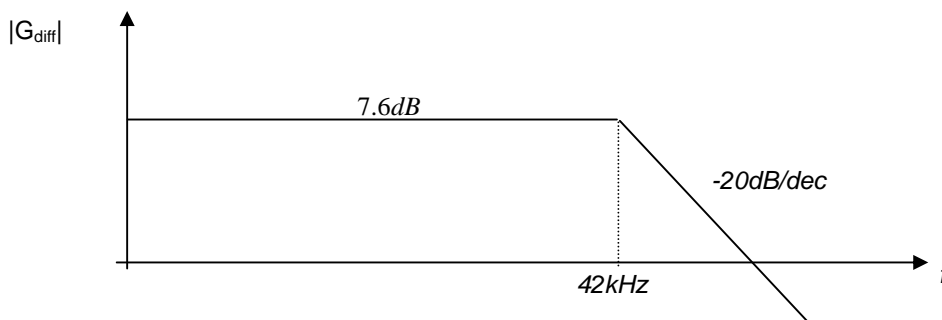
La presenza della resistenza  $r_0$  del transistore M2 non ha alcun effetto sul guadagno differenziale.

Il condensatore  $C_2$  introduce un polo con costante di tempo pari a

$$\tau_{p,2} = C_2(R_d + R_d) = 3.76\mu s \Rightarrow f_{p,2} = \frac{1}{2\pi\tau_{p,2}} = 42kHz$$

e nessuno zero al finito.

Il diagramma di Bode del modulo del guadagno differenziale e', quindi, il seguente:



### c) Diagramma di Bode del modulo del guadagno di modo comune

La presenza della resistenza  $r_0$  del transistor M2 rende non ideale il generatore di coda. Si avrà, pertanto, anche a bassa frequenza un guadagno di modo comune non nullo. La resistenza equivalente del generatore di coda è pari a

$$R_{eq} = (R_2 + r_0)(1 + g_m R_2 // r_0) = 152.5 \text{ k}\Omega$$

Il guadagno di modo comune a bassa frequenza è pari a:

$$G_{cm}|_{LF} = -\frac{R_d}{\frac{1}{g_m} + R_s + 2R_{eq}} = -1.3 \times 10^{-2}$$

Il guadagno di modo comune ad alta frequenza è pari a:

$$G_{cm}|_{HF} = -\frac{R_d}{\frac{1}{g_m} + R_s} = -2.4$$

Su segnale di modo comune il condensatore  $C_2$  non vede variare la tensione ai suoi capi, quindi non introduce singolarità.

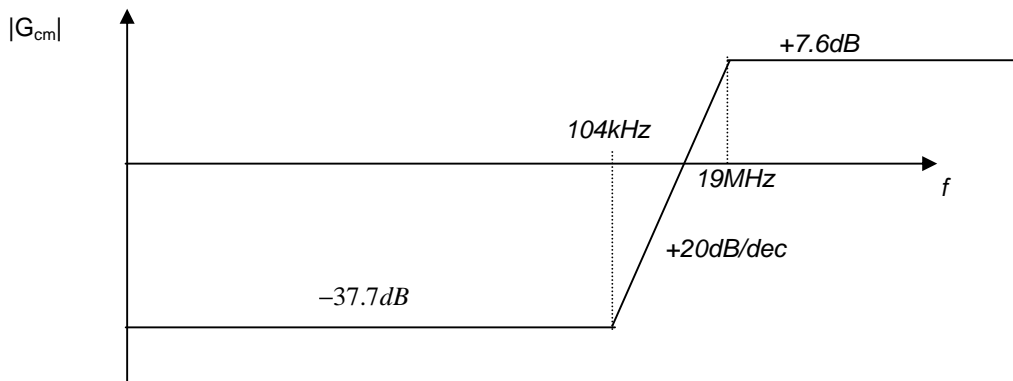
Il condensatore  $C_1$  introduce un polo con costante di tempo pari a

$$\tau_{p,1} = C_1 \left( R_{eq} // \left( \frac{R_s + \frac{1}{g_m}}{2} \right) \right) = 8.35 \text{ ns} \Rightarrow f_{p,1} = \frac{1}{2\pi\tau_{p,1}} = 19 \text{ MHz}$$

ed uno zero quando diviene infinita, nel dominio della variabile  $s$ , l'impedenza data dal parallelo tra  $C_1$  e  $R_{eq}$ :

$$\tau_{z,1} = CR_{eq} \Rightarrow f_{z,1} = \frac{1}{2\pi\tau_{z,1}} = 104 \text{ kHz}$$

Il diagramma di Bode del modulo del guadagno di modo comune è, quindi, il seguente:



### Esercizio 2

#### a) guadagno

Poiché l'amplificatore operazionale è ideale la retroazione tende a fissare a terra la tensione del morsetto invertente, che risulta, quindi, un nodo di terra virtuale. La corrente nella resistenza  $R_1$  sarà pari a  $I_{R_1} = \frac{V_{in}}{R_1}$  e scorre, quindi, tutta in  $R_2$ . La tensione di uscita risulta  $V_{out}|_{LF} = -I_{R_1} R_2$ .

Il trasferimento  $V_{out}/V_{in}$  nel caso di amplificatore operazionale ideale risulta

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}|_{LF,id} = -\frac{R_2}{R_1} = -30$$

Il FSR dell'ADC è pari a

$$FSR_{ADC} = V_{ref} - (-V_{ref}) = 6.6 \text{ V}$$

Poiche' la dinamica del segnale in ingresso e' pari a 100mV (positivi o negativi, ma 100mV!), con il guadagno assegnato i segnali di ingresso non coprono l'intera dinamica dell'ADC ma hanno una dinamica all'ingresso dell'ADC di 3V. La risoluzione richiesta in ingresso e' data da:

$$Ris_{ingresso} = \frac{1}{1000} \text{dinamica}_{ingresso} = 100\mu V$$

La risoluzione dell'ADC, espressa in LSB, e' data da:

$$1LSB = \frac{FSR_{ADC}}{2^n}$$

Pertanto si deve chiedere che

$$1LSB = Ris_{ingresso} |G|$$

da cui

$$n = \ln_2 \frac{FSR_{ADC}}{Ris_{ingresso} |G|} = 2200 \rightarrow n_{bit} = 12$$

Con tale numero di bit la risoluzione dell'ADC e' pari a

$$1LSB = \frac{FSR_{ADC}}{2^n} = 1.6mV$$

e per un segnale di ingresso di ampiezza 5mV la risoluzione e' pari a

$$ris@5mV = \frac{1LSB}{5mV|G|} = 1.1\%$$

### b) massima durata del tempo di hold

Durante il tempo di *Hold* la capacita' di *Hold* si scarica esponenzialmente con costante di tempo pari a  $\tau = R_{off}C = 10s$ , poiche' supponiamo che la durata del tempo di hold sia notevolmente inferiore alla  $\tau$  del circuito, possiamo approssimare l'andamento esponenziale con un andamento lineare. Pertanto:

$$\frac{\Delta V_{C,max}}{\tau} T_{Hold,max} = \frac{\Delta V_{C,max}}{1000}$$

da cui

$$T_{hold,max} = \frac{\tau}{1000} = 10ms$$

### c) diagramma di Bode del modulo del guadagno reale

Per calcolare il guadagno reale, procediamo per via grafica. Calcoliamo il guadagno ideale procedendo per ispezione (se non e' chiaro procedere per via analitica facendo i conti), il guadagno d'anello ed il guadagno d'andata.

$$G_{ideale}(s) = \left( -\frac{R_2}{R_1} \right) \frac{1}{1 + sC_f R_2}$$

La costante di tempo del polo e' data dal prodotto della capacita'  $C_2$  e della resistenza vista in parallelo ai suoi morsetti, che, grazie alla terra virtuale che si crea una volta spenti i generatori, e' pari alla sola  $R_2$ . Non si hanno zeri al finito.

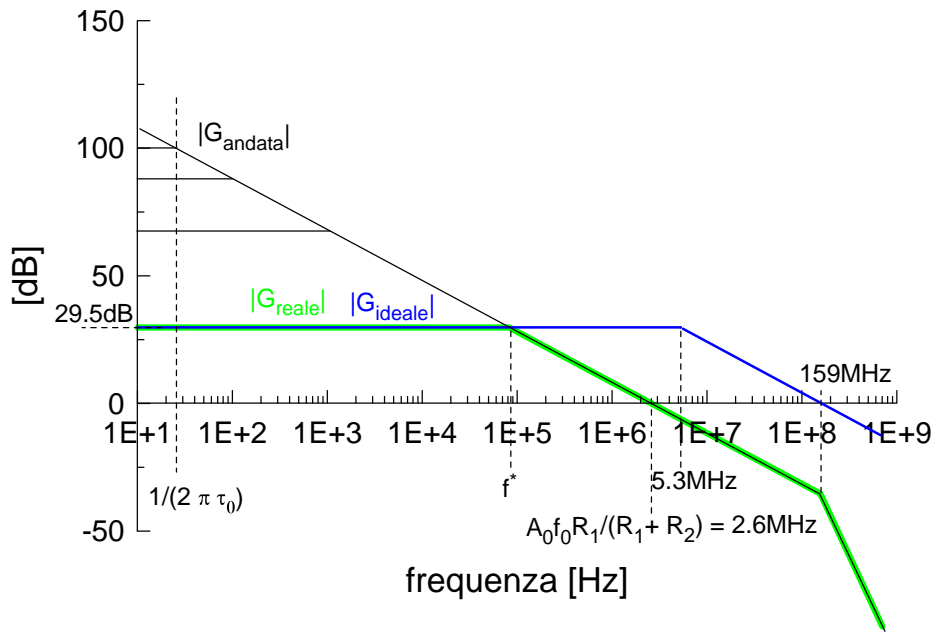
$$G_{loop}(s) = -\frac{A_0}{1 + s\tau_0} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1 + sC_f R_2}{1 + s(R_1 // R_2)C_f}$$

$$G_{andata}(s) = -G_{id}(s) \cdot G_{loop}(s) = -\frac{R_2}{R_2 + R_1} \frac{A_0}{1 + s\tau_0} \frac{1}{1 + s(R_1 // R_2)C_f}$$

Non conosciamo il valore di  $A_0$  e  $\tau_0$  separatamente, ma solo il prodotto guadagno-banda. Possiamo calcolare "graficamente" la frequenza  $f^*$  dalla relazione:

$$|G_{id}(0)| f^* = GBWP \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow f^* = GBWP \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{|G_{id}(0)|}$$



#### d) massimo intervallo di ampiezze in ingresso all'ADC con CMRR

Trattandosi di una configurazione invertente il CMRR finito dell'amplificatore operazionale non ha, in prima approssimazione, alcun effetto sulla tensione di uscita. Il massimo intervallo di ampiezze in ingresso all'ADC sarà  $\pm 3V$ , come nel caso di amplificatore operazionale con CMRR infinito.

#### e) massimo intervallo di ampiezze in ingresso all'ADC con SR

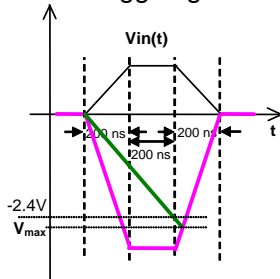
Lo SR definisce la massima pendenza che può avere la tensione di uscita.

Nel caso ideale (andamento in fucsia) la massima pendenza della tensione di uscita sarebbe

$$\left. \frac{dv_{out}}{dt} \right|_{\max, ideale} = \frac{3V}{200ns} = 15V / \mu s > SR$$

quindi la pendenza del segnale in uscita sarà limitata dallo slew rate.

Calcoliamo il valore massimo che la tensione di uscita riesce a raggiungere con pendenza limitata da SR (andamento in verde). Dopo i primi 400 ns la tensione di uscita avrà raggiunto 2.4V, in realtà la tensione di uscita può ancora salire un poco fino a che la tensione di uscita limitata da SR non raggiunge il valore che l'uscita avrebbe in assenza di limitazione da SR.



$$\begin{cases} -2.4V - SR\Delta t = -V_{\max} \\ 3V - V_{\max} = \left. \frac{dv_{out}}{dt} \right|_{\max} \Delta t \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta t = 28.5ns, V_{\max} = -2.57V$$

In presenza di SR il massimo intervallo di ampiezze in ingresso all'ADC sarà  $\pm 2.57V$ .

### Esercizio 3

#### a) andamento nel tempo della tensione di uscita in assenza del condensatore C

Perché si accenda il diodo  $D$  occorre che la tensione ai suoi capi sia di almeno 0.7V, secondo la polarità corretta, pertanto  $D$  è on se la tensione di uscita è minore, o, al più, uguale a 2.3V.

Quando  $D$  è off, la tensione di uscita è pari a:

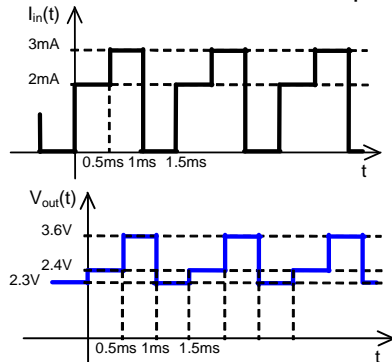
$$V_{out} = I_{in}(R_1 // R_2)$$

$$I_{in} = 3mA \Rightarrow V_{out} = 3.6V$$

$$I_{in} = 2mA \Rightarrow V_{out} = 2.4V$$

Quando, invece, la corrente di ingresso e' nulla il diodo e' acceso e fissa la tensione di uscita a 2.3V.

La tensione di uscita avra', quindi, l'andamento riportato in blu nella figura seguente:



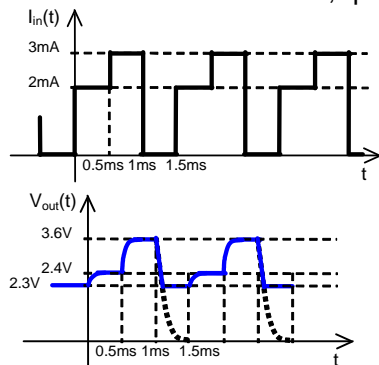
### a) andamento nel tempo della tensione di uscita in presenza del condensatore C

Quando D e' off, il condensatore inserisce una costante di tempo pari a

$$\tau = C(R_1 // R_2) = 60 \mu s \ll 500 \mu s$$

pertanto il circuito riesce ad andare a regime in ogni intervallo. Quando la tensione in uscita raggiunge i 2.3V (provenendo da tensioni maggiori), il diodo si accende e fissa immediatamente la tensione di uscita a 2.3V, originando un punto angoloso.

La tensione di uscita avra', quindi, l'andamento riportato in blu nella figura seguente:



This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.