

ESTM 2024
Esercitazione 4

Prima parte – Quiz Mos–

Quiz (Esame del 3/5/2023)

In uno stadio amplificatore MOS a singolo transistor di tipo *gate comune*, detta A_v l'amplificazione di tensione di piccolo segnale si ha che:

- (a) l'uscita è prelevata al terminale di *source* e $A_v > 0$ (stadio non-invertente)
- (b) l'uscita è prelevata al terminale di *source* e $A_v < 0$ (stadio invertente)
- (c) l'uscita è prelevata al terminale di *drain* e $A_v < 0$ (stadio invertente)
- ☒ (d) l'uscita è prelevata al terminale di *drain* e $A_v > 0$ (stadio non-invertente)

Quiz (Esame del 5/9/2023)

La resistenza d'uscita di piccolo segnale r_o di un transistor pMOS in regione di saturazione può essere espressa in funzione delle grandezze nel punto di lavoro Q come:

- (a) $r_o = \frac{V_{SG} - V_{TH}}{I_D}$
- (b) $r_o = \frac{1}{\sqrt{2\beta}I_D}$
- (c) $r_o = \frac{V_{SD}}{I_D}$
- ☒ (d) $r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$

Quiz (Esame del 6/2/2023)

Un transistor MOS in regione di interdizione si comporta in condizioni statiche come:

- (a) un generatore di tensione controllato in corrente
- (b) un corto circuito
- (c) un generatore di corrente controllato in tensione
- ☒ (d) un circuito aperto

Quiz (Esame del 20/2/2023)

In uno stadio amplificatore MOS *gate comune* descritto dai parametri A_v , R_{in} e R_{out} per $g_m \rightarrow \infty$ si ha che

- (a) $R_{out} \rightarrow \infty$
- (b) $R_{out} \rightarrow 0$
- (c) $R_{in} \rightarrow \infty$
- ☒ (d) $R_{in} \rightarrow 0$

Quiz (Esame del 25/2/2022)

In uno stadio amplificatore a singolo transistor MOS, il segnale d'ingresso è applicato al terminale di *source* e l'uscita è prelevata al terminale di *drain*. Si tratta di uno stadio:

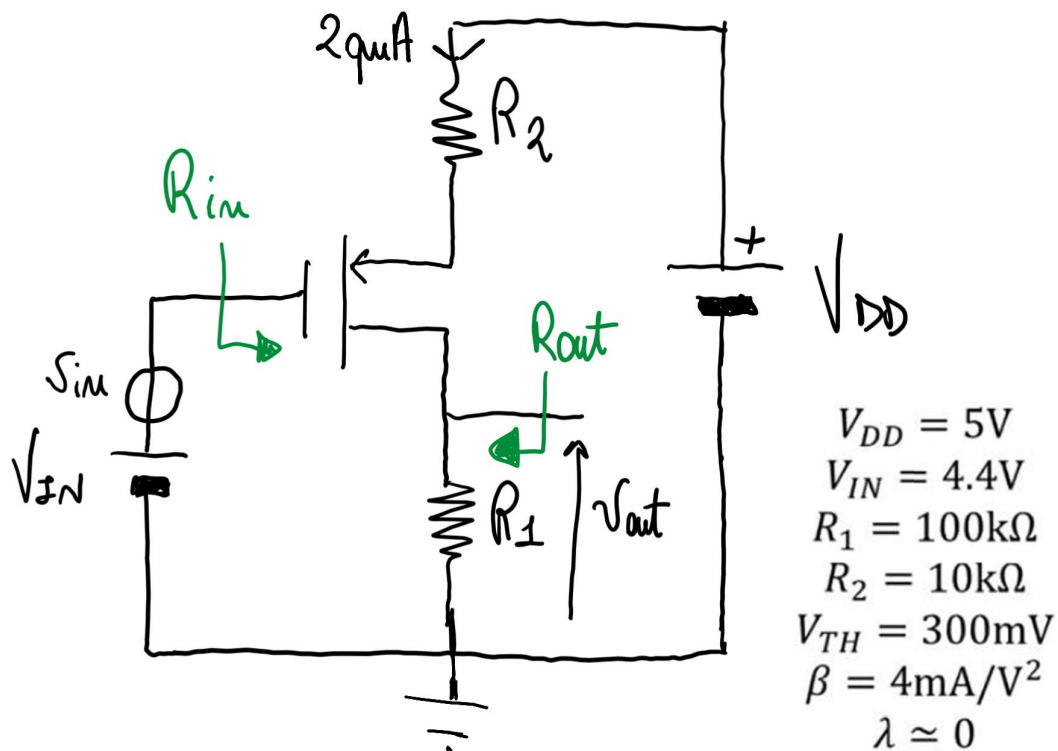
- (a) *source* comune
- (b) *drain* comune
- ☒ (c) *gate* comune
- (d) per rispondere occorre sapere se il transistor è nMOS o pMOS

Seconda parte – pMos e Dinamica –

Esercizio

Con riferimento al circuito in figura:

- Verificare il funzionamento del transistor MOS in regione di saturazione.
- Determinare $A_v = v_{out}/v_{in}$ in condizioni di piccolo segnale.
- Determinare R_{in} e R_{out} indicate in figura, in condizioni di piccolo segnale.



Condizioni di SATURAZIONE (pMOS)

$$\begin{cases} V_{SG} > V_{TH} \\ V_{SD} > V_{SG} - V_{TH} \end{cases}$$

$$V_G = V_{IN} = 4,4V \text{ ma non conosco } V_S \text{ e } V_D$$

conosco però $I_D = 20 \mu A \Rightarrow$ ho ben 2 modi per risolvere il circuito

① KVL

$$V_{SD} = V_{DD} - I_D R_2 - I_D R_1 = 2,8 V > 0,1 V$$

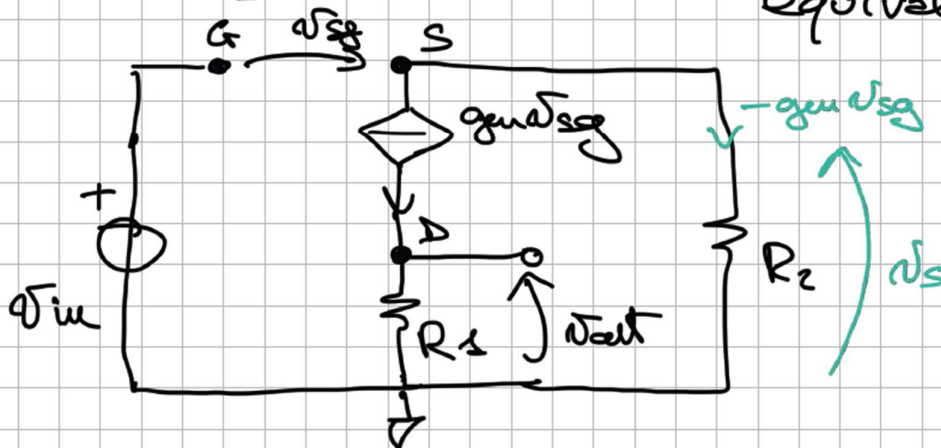
$$V_D = I_D R_1 = 2 V$$

$$V_S = V_{SD} + V_D = 4,8 V$$

$$V_{SG} = V_S - V_G = 0,4 V > 0,3 V$$

entrambe verificate

Piccolo segnale $V_{DD} = \emptyset$ + circuito equivalente



$$g_m = \beta (V_{SG} - V_{TH}) = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 0,4 \text{ mS}$$

$$v_{out} = g_m v_{sg} R_1$$

$$v_{sg} = v_s - v_g = -g_m v_{sg} R_2 - v_{in}$$

$$\Rightarrow v_{sg} = - \frac{v_{in}}{1 + g_m R_2}$$

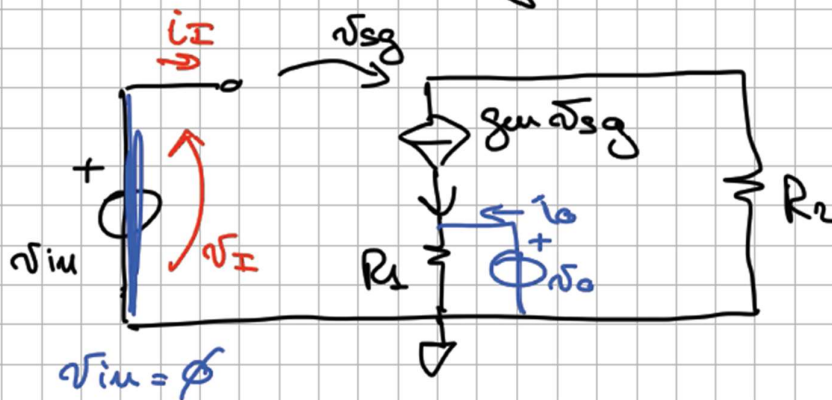
$$\Rightarrow v_{out} = \frac{-g_m R_2 v_{in}}{1 + g_m R_2}$$

$$A_v = \frac{-g_m R_2}{1 + g_m R_2}$$

→ Source Com. con
degeneraz.

$R_2 \leftrightarrow R_D$
 $R_2 \leftrightarrow R_S$

Resistenza di ingresso e uscita



$$i_I = \phi \Rightarrow R_{in} = \infty$$

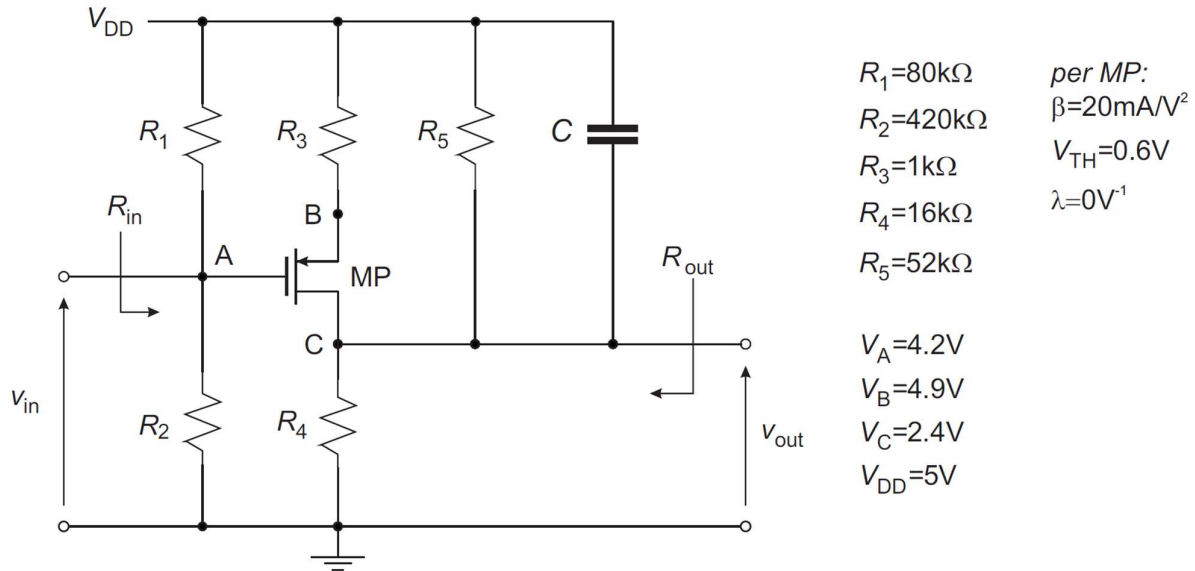
$$R_{out} = \frac{v_o}{i_o} \Big|_{v_{in} = \phi} = ?$$

$$i_o = \frac{v_o}{R_1} - g_m v_{sg}$$

$$v_{sg} = -g_m v_{sg} R_2 - v_{in} \Rightarrow v_{sg} = \phi \quad \text{unica soluz.}$$

$$i_o = \frac{v_o}{R_2} \Rightarrow R_{out} = R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

Esercizio 1.



Con riferimento allo stadio in figura

1. determinare il punto di funzionamento a riposo del transistor MP, verificare il funzionamento del dispositivo in regione di saturazione e ricavarne i parametri del modello per il piccolo segnale;
2. Disegnare il circuito equivalente per il piccolo segnale dello stadio e calcolare, in condizioni di piccolo segnale, l'amplificazione di tensione $A_v = v_{out}/v_{in}$, la resistenza di ingresso R_{in} e la resistenza di uscita R_{out} in banda, assumendo che in banda il condensatore C si comporti come un circuito aperto (sono richiesti i passaggi fondamentali, le espressioni analitiche ed i valori numerici);
3. Determinare l'espressione analitica di $A_v(s) = V_{out}(s)/V_{in}(s)$ per $C_1 = 10\text{ pF}$, e calcolare i valori numerici di poli e zeri.
4. Disegnarne i diagrammi di Bode del modulo e della fase dell'amplificazione $A_v(s) = V_{out}(s)/V_{in}(s)$ ricavata al punto precedente.

Soluzione

Punto di funzionamento a riposo di MP:

$$V_{SG} = V_B - V_A = 0.7V;$$

$$V_{SD} = V_B - V_C = 2.5V;$$

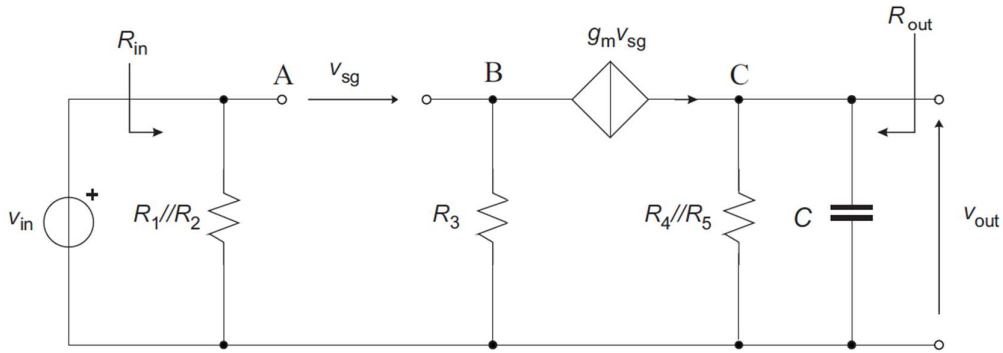
$$I_D = \frac{1}{2}\beta(V_{SG} - V_{TH})^2 = 100\mu A.$$

Poiché $V_{SG} > V_{TH} = 0.6V$ e $V_{SD} > V_{SG} - V_{TH}$, MP lavora in regione di saturazione. La transconduttanza è

$$g_m = \beta(V_{GS} - V_{TH}) = 2\text{ mS}$$

mentre la conduttanza di uscita g_o è nulla ($\lambda = 0$).

Circuito di piccolo segnale Si tratta di uno stadio amplificatore *source comune*. Il circuito di piccolo segnale è riportato in figura.



In banda, considerando il condensatore C come un circuito aperto, si ha:

$$v_{sg} = -v_{in} - g_m v_{sg} R_3; \quad v_{sg} = -\frac{v_{in}}{1 + g_m R_3}$$

$$v_{out} = g_m v_{sg} R_4 \parallel R_5 = -\frac{g_m R_4 \parallel R_5}{1 + g_m R_3} v_{in}$$

Da cui:

$$A_v = -\frac{g_m R_4 \parallel R_5}{1 + g_m R_3} = -8.157 \quad (18.2\text{ dB})$$

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 = 67.2\text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = R_4 \parallel R_5 = 12.2\text{ k}\Omega$$

Analisi in frequenza

La funzione di trasferimento richiesta si ricava analizzando il circuito di piccolo segnale nel dominio della frequenza, considerando il contributo dell'impedenza $Z_C = \frac{1}{sC}$ del condensatore C . In tal modo si ricava:

$$A_v(s) = -\frac{g_m R_4 \parallel R_5 \parallel Z_C}{1 + g_{m1} (R_4 \parallel R_5 \parallel Z_C)} = -\frac{g_m R_4 \parallel R_5}{1 + g_m R_3} \frac{1}{1 + s R_4 \parallel R_5 C}$$

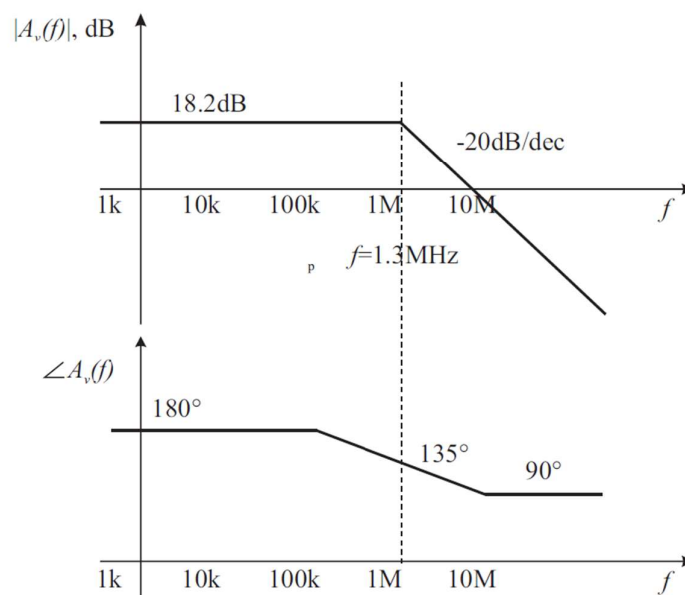
La funzione di trasferimento richiesta presenta un singolo polo reale negativo:

$$s_p = -\frac{1}{R_4 \parallel R_5 C} = -8.17 \text{ rad}/\mu\text{s}$$

con frequenza di taglio:

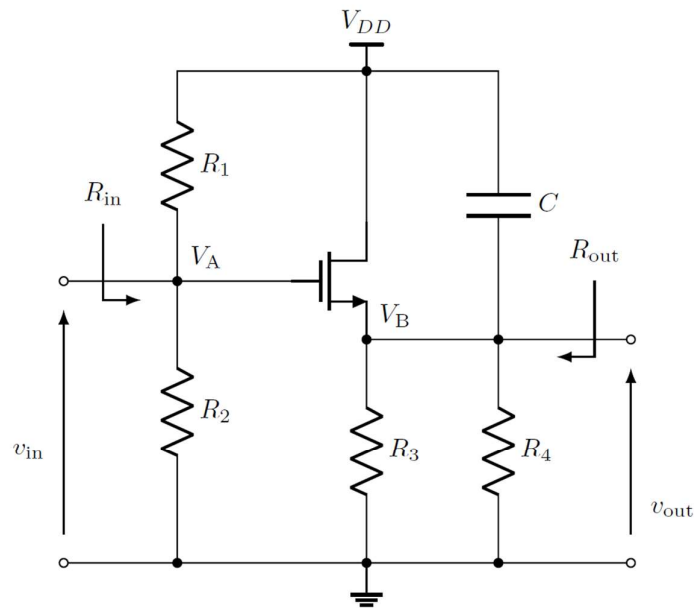
$$f_p = \frac{|s_p|}{2\pi} = 1.3 \text{ MHz};$$

I diagrammi di Bode di modulo e fase sono riportati in figura.



Da esame del 20/2/2023

Esercizio n. 1



$$V_{DD} = 4.5 \text{ V}$$

$$V_A = 1.5 \text{ V}$$

$$V_B = 0.8 \text{ V}$$

$$R_1 = 150 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 75 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 40 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 40 \text{ k}\Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi} \text{ nF}$$

$$\lambda = 0 \text{ V}^{-1}$$

$$V_{TH} = 0.5 \text{ V}$$

$$\beta = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

Con riferimento al circuito in figura:

1. Verificare il funzionamento del transistor in regione di saturazione e determinare i parametri del modello di piccolo segnale
2. Disegnare il circuito equivalente di piccolo segnale dello stadio
3. In condizioni di piccolo segnale e assumendo che il condensatore C si comporti come un circuito aperto (condizione di bassa frequenza) calcolare l'amplificazione di tensione $A_V = v_{out}/v_{in}$, la resistenza di ingresso R_{in} e la resistenza di uscita R_{out}
4. In condizioni di piccolo segnale e considerando il valore assegnato di C , determinare l'espressione del guadagno di tensione in frequenza $A_V(s)$ e disegnarne il diagramma di Bode in modulo e fase

Regione di funzionamento e Parametri di piccolo segnale Transistore MN

$$V_{GS} = V_A - V_B = 0.7 \text{ V}; V_{GS} - V_{TH} = 0.2 \text{ V} > 0;$$

$$V_{DS} = V_{DD} - V_B = 3.7 \text{ V} > V_{GS} - V_{TH};$$

Non richiesto: $I_D = 40 \mu\text{A}$.

$$g_m = \beta_n (V_{GS} - V_{TH}) = 400 \mu\text{S}; r_0 = \infty$$

Analisi Stadio a centro banda

Sostituendo C_{in} con un corto circuito e C_{out} con un circuito aperto, ottiene uno stadio a drain comune.

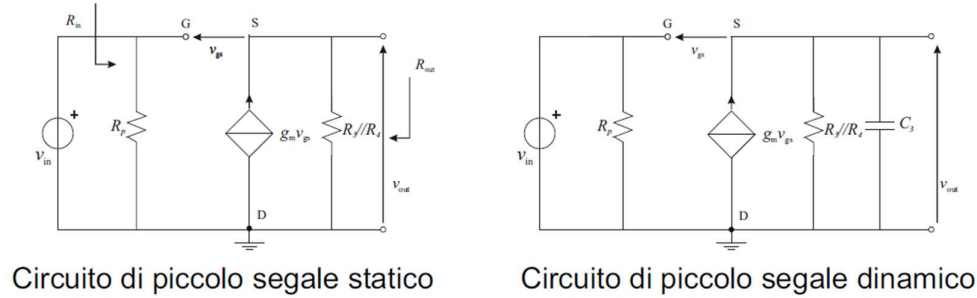


Figura 1: Circuito di piccolo segnale dello stadio

$$v_{gs} = v_{in} - v_{out}$$

Definendo $R_{34} = R_3 // R_4 = 20 \text{ k}\Omega$:

$$v_{out} = R_{34} g_m v_{gs}$$

$$v_{out} = \frac{g_m R_{34}}{1 + g_m R_{34}} v_{in}$$

$$A_{v0} = \frac{g_m R_{34}}{1 + g_m R_{34}} = \frac{8}{9} (\approx -1 \text{ dB})$$

$$R_{in} = R_p = R_1 // R_2 = 50 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = \frac{R_{34}}{1 + g_m R_{34}} = 2.22 \text{ k}\Omega$$

Analisi in frequenza dello Stadio

Si definisce:

$$Z_{34} = R_{34} // C = \frac{R_{34}}{1 + sCR_{34}}$$

$$A_v = \frac{g_m Z_{34}}{1 + g_m Z_{34}} = g_m \frac{R_{34}}{1 + sCR_{34}} \frac{1}{1 + g_m \frac{R_{34}}{1 + sCR_{34}}}$$

ovvero

$$A_v = \frac{g_m R_{34}}{1 + g_m R_{34}} \frac{1}{1 + sC \frac{R_{34}}{1 + g_m R_{34}}}$$

Presenta un polo semplice alla frequenza

$$f_p = \frac{1 + g_m R_{34}}{2\pi C R_{34}} = 450 \text{ kHz}$$

Diagrammi di Bode

