

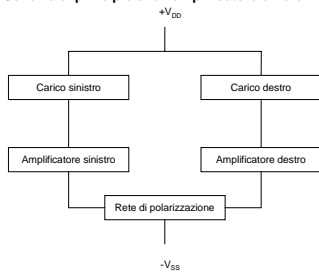
Amplificatori differenziali

- L'*amplificatore differenziale* è il blocco circuitale più usato nel progetto dei circuiti integrati analogici
- Formato da 2 circuiti simmetrici aventi la stessa rete di polarizzazione, *esalta le differenze* tra gli ingressi e ne *rigetta le parti comuni*
- Molto popolare dall'avvento dei circuiti integrati, per l'alto utilizzo di elementi attivi e per la configurazione simmetrica che equilibra le alterazioni date dalle condizioni ambientali
- Maggiore immunità al rumore rispetto singolo circuito
- Possibilità di accoppiamento diretto (no capacità di by-pass e di accoppiamento)

G.V. Persiano – Elettronica

1

Schema di principio di un amplificatore differenziale

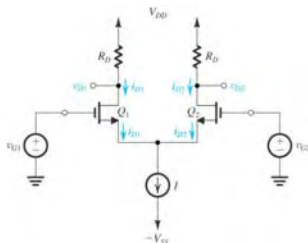


- Ramo sinistro e ramo destro sono simmetrici tra loro
- Carico può essere attivo (MOS, BJT, ecc.) o passivo (Resistenza)
- Amplificatore può essere a MOS, BJT, ecc.

G.V. Persiano – Elettronica

2

Coppia differenziale MOS



- MOSFET Q_1 e Q_2 perfettamente identici tra loro (*matched*) ed in regione di saturazione
- Carico di tipo passivo (resistenza R_D)
- Rete di polarizzazione data da generatore ideale di corrente I

G.V. Persiano – Elettronica

3

Funzionamento con un segnale di ingresso di modo comune v_{CM}

$v_{G1} = v_{G2} = v_{CM} \Rightarrow i_{D1} = i_{D2} = I/2$

$v_s = v_{CM} - V_{GS} \Rightarrow \frac{I}{2} = \frac{1}{2} k_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$

$v_{D1} = v_{D2} = V_{DD} - \frac{I}{2} R_D \Rightarrow v_{D2} - v_{D1} = 0 V$

$V_{DS} \equiv$ minima caduta su I per un corretto funzionamento

MOSFET deve essere in saturazione $\Rightarrow v_{CM} \leq V_t + V_{DD} - \frac{I}{2} R_D = v_{CM \max}$

Generatore deve erogare corrente continua $I \Rightarrow v_{CM} \geq V_{GS} + V_{(I)} - V_{SS} = v_{CM \min}$

G.V. Persiano - Elettronica 4

Funzionamento con un segnale di ingresso differenziale v_{id}

$v_{G1} = v_{id}, v_{G2} = 0 V \Rightarrow v_{id} = v_{GS1} - v_{GS2}$

Se $v_{id} > 0 V \Rightarrow v_{GS1} > v_{GS2} \Rightarrow i_{D1} > i_{D2} \Rightarrow$
 $\Rightarrow v_{D1} < v_{D2} \Rightarrow v_{D2} - v_{D1} > 0 V$

Se $v_{id} < 0 V \Rightarrow v_{GS1} < v_{GS2} \Rightarrow i_{D1} < i_{D2} \Rightarrow$
 $\Rightarrow v_{D1} < v_{D2} \Rightarrow v_{D2} - v_{D1} < 0 V$

Quanto deve valere v_{id} per avere $i_{D1} = I$ oppure $i_{D2} = I$?

Per $i_{D1} = I \Rightarrow v_{GS1} (i_{D1}=I), v_{GS2} = V_t \Rightarrow v_s = -V_t, I = \frac{1}{2} k_n \frac{W}{L} (v_{GS1} - V_t)^2 \Rightarrow v_{id \max} = \sqrt{2I / (k_n W/L)}$

Per $i_{D2} = I \Rightarrow v_{GS2} (i_{D2}=I), v_{GS1} = V_t \Rightarrow v_s = v_{id} - V_t, I = \frac{1}{2} k_n \frac{W}{L} (-v_s - V_t)^2 \Rightarrow v_{id \min} = -\sqrt{2I / (k_n W/L)}$

G.V. Persiano - Elettronica 5

Amplificatore differenziale MOS con piccoli segnali

Guadagno differenziale

Schema circuitale

$v_{G1} = V_{CM} + \frac{v_{id}}{2} \quad v_{G2} = V_{CM} - \frac{v_{id}}{2}$

V_{CM} è tensione di polarizzazione di Q_1 e Q_2

Generalmente, $V_{CM} = (V_{DD} - V_{SS})/2$

v_{id} applicata in maniera complementare o bilanciata

Uscita single-ended = tensione tra un drain e massa (v_{O1}, v_{O2})

Uscita differenziale = tensione tra i 2 drain ($v_{O2} - v_{O1}$)

G.V. Persiano - Elettronica 6

Uscita *single-ended* \Rightarrow piccolo segnale $\pm g_m R_D \frac{V_{id}}{2}$ sommato a componente statica $V_{DD} - \frac{I}{2} R_D$

Uscita *differenziale* \Rightarrow piccolo segnale pari a $\pm g_m R_D V_{id}$, componente statica nulla

Schema per piccoli segnali (senza r_o e χ)

$v_s = 0V \Rightarrow$ source è una massa virtuale

$v_{gs1} = +\frac{V_{id}}{2} \quad v_{gs2} = -\frac{V_{id}}{2}$

Piccolo segnale $\Rightarrow v_{gs1,2} \ll 2(V_{GS1,2} - V_t)$

$g_{m1,2} = \frac{2I_{D1,2}}{V_{GS1,2} - V_t} = \frac{2(I/2)}{V_{GS1,2} - V_t} = \frac{I}{V_{GS1,2} - V_t}$

Guadagno di tensione *single-ended* $\Rightarrow \frac{v_{o1}}{v_{id}} = -\frac{1}{2} g_m R_D, \quad \frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{1}{2} g_m R_D$

Guadagno di tensione *differenziale* $\Rightarrow \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{id}} = g_m R_D$

G.V. Persiano - Elettronica 7

Analisi alternativa \Rightarrow Resistenza tra $S_{1,2}$ e $G_{1,2}$ è $1/g_m \Rightarrow$ Tra G_1 e G_2 è $2/g_m \Rightarrow i_d = \frac{V_{id}}{2/g_m}$

Analisi alternativa

Schema con r_o e R_{SS}

Schema con r_o semplificato

"mezzo circuito differenziale"

$R_{SS} \equiv$ resistenza del generatore I (non ideale) \Rightarrow per simmetria, vale ancora $v_s = 0V$

Guadagno di tensione *single-ended* (con r_o) $\Rightarrow \frac{v_{o1}}{v_{id}} = -\frac{1}{2} g_m (R_D // r_o), \quad \frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{1}{2} g_m (R_D // r_o)$

Guadagno di tensione *differenziale* (con r_o) $\Rightarrow \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{id}} = g_m (R_D // r_o)$

G.V. Persiano - Elettronica 8

Guadagno di modo comune e rapporto di reiezione del modo comune (CMRR)

Schema circuitale

Schema per piccoli segnali (senza r_o e χ)

"mezzo circuito di modo comune"

V_{CM} (non mostrata) è tensione di polarizzazione di Q_1 e Q_2

$v_{G1} = v_{G2} = V_{CM} + v_{icm}$

Simmetria circuitale \Rightarrow separazione in 2 mezzi circuiti identici

G.V. Persiano - Elettronica 9

Guadagno di tensione di ciascun "mezzo circuito" $\Rightarrow \frac{v_{o1}}{v_{icm}} = \frac{v_{o2}}{v_{icm}} = -\frac{R_D}{\frac{1}{g_m} + 2R_{SS}}$

Di solito, $R_{SS} \gg 1/g_m$ per cui si ha $\frac{v_{o1}}{v_{icm}} = \frac{v_{o2}}{v_{icm}} \cong -\frac{R_D}{2R_{SS}}$. Abbiamo 2 casi da considerare:

1) Uscita in modalità *single-ended* $\Rightarrow |A_{cm}| = \frac{R_D}{2R_{SS}}, |A_d| = \frac{1}{2} g_m R_D, CMRR = \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right| = g_m R_{SS}$

2) Uscita in modalità *differenziale* $\Rightarrow |A_{cm}| = \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{icm}} = 0, |A_d| = \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{id}} = g_m R_D, CMRR = \infty$

A_{cm} = amplificazione di modo comune A_d = amplificazione differenziale

$CMRR$ = rapporto di reiezione del modo comune

G.V. Persiano - Elettronica 10

Effetti di uno sbilanciamento di R_D o di g_m sul CMRR

Se resistenze di drain diverse tra loro \Rightarrow per $Q_1 \rightarrow R_D$, per $Q_2 \rightarrow R_D + \Delta R_D \Rightarrow CMRR \neq \infty$

Amplificazione di modo comune (uscita in modalità differenziale)

$\frac{v_{o1}}{v_{icm}} \cong -\frac{R_D}{2R_{SS}}, \frac{v_{o2}}{v_{icm}} \cong -\frac{R_D + \Delta R_D}{2R_{SS}} \Rightarrow \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{icm}} = -\frac{\Delta R_D}{2R_{SS}} \Rightarrow A_{cm} = -\frac{\Delta R_D}{2R_{SS}} \left(\frac{R_D}{R_D} \right)$

Amplificazione differenziale (uscita in modalità differenziale)

$\frac{v_{o1}}{v_{id}} \cong -\frac{1}{2} g_m R_D, \frac{v_{o2}}{v_{id}} \cong \frac{1}{2} g_m (R_D + \Delta R_D) \Rightarrow \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{id}} = g_m \left(R_D + \frac{\Delta R_D}{2} \right) \cong g_m R_D \Rightarrow A_d \cong g_m R_D$

Reiezione di modo comune CMRR

$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right| = \frac{g_m R_D}{\frac{\Delta R_D}{2R_{SS}} \left(\frac{R_D}{R_D} \right)} \Rightarrow CMRR = \frac{2g_m R_{SS} R_D}{\Delta R_D}$

Analogamente, se $g_{m1} \neq g_{m2} \Rightarrow |A_{cm}| = \frac{R_D}{2R_{SS}} \left(\frac{\Delta g_m}{g_m} \right), |A_d| \cong g_m R_D, CMRR = \frac{2g_m^2 R_{SS}}{\Delta g_m}$

G.V. Persiano - Elettronica 11

Risposta in frequenza del amplif. differenziale MOS

Schema circuitale

Impedenza Z_{SS} vista da S? $\Rightarrow Z_{SS} = R_{SS} // C_{SS}$

C_{SS} contiene C_{db} e C_{gd} di Q_S , oltre C_{ab1} e C_{sb2}

Circuito per l'analisi di A_d

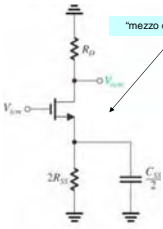
Mezzo circuito differenziale \equiv amplificatore a source comune \Rightarrow stessa risposta in frequenza

G.V. Persiano - Elettronica 12

Polo associato ad $A_d \Rightarrow f_H = \frac{1}{2\pi C_m R_{id}}$ dove $C_m = C_{gs} + C_{gd}(1 + g_m R_D)$
 $R_{id} = \text{resistenza generatore } v_{id}$

Circuito per l'analisi di A_{cm}

Analisi A_{cm} nell'ipotesi di diverse resistenze di drain



"mezzo circuito di modo comune"

$$A_{cm}(s) = -\frac{R_D}{2Z_{SS}} \left(\frac{\Delta R_D}{R_D} \right) = -\frac{R_D}{2} \left(\frac{\Delta R_D}{R_D} \right) Y_{SS} =$$

$$= -\frac{R_D}{2} \left(\frac{\Delta R_D}{R_D} \right) \left(\frac{1}{R_{SS}} + sC_{SS} \right) = -\frac{R_D}{2R_{SS}} \left(\frac{\Delta R_D}{R_D} \right) (1 + sR_{SS}C_{SS})$$

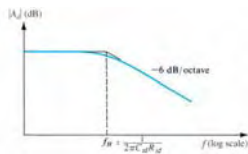
Definito $A_{cm}^u = -\frac{R_D}{2R_{SS}} \left(\frac{\Delta R_D}{R_D} \right) \Rightarrow A_{cm}(s) = A_{cm}^u (1 + sR_{SS}C_{SS})$

Zero associato ad $A_{cm} \Rightarrow f_z = \frac{1}{2\pi C_{SS} R_{SS}}$

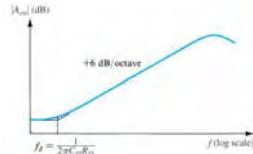
G.V. Persiano - Elettronica

13

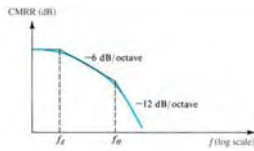
Andamento in frequenza di A_d



Andamento in frequenza di A_{cm}



Andamento in frequenza di CMRR



G.V. Persiano - Elettronica

14