

# Esami

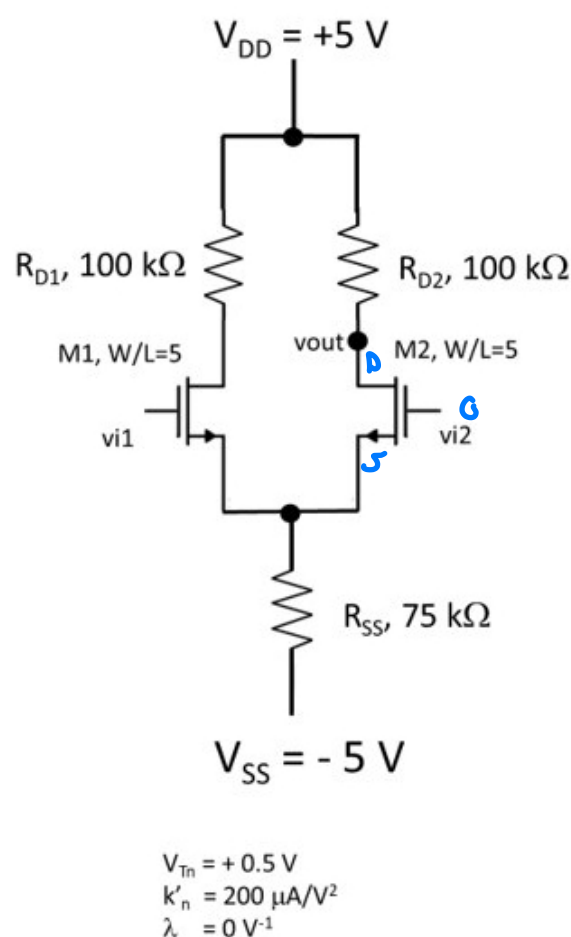
# MOS DIF

by [www.stefanoivancich.com](http://www.stefanoivancich.com)

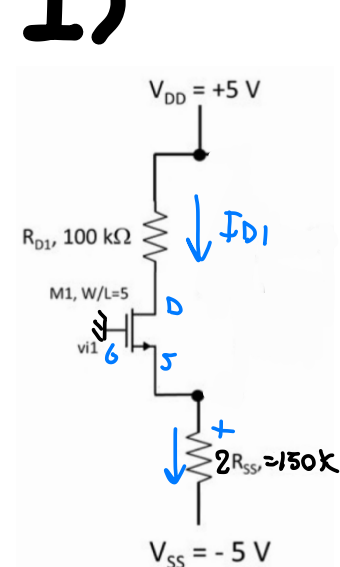
# Esame 2018-06-19

Con riferimento all'amplificatore differenziale mostrato in figura, supponendo che i transistor MOSFET a canale n M1 ed M2 siano identici e con  $W/L = 5$ , con i parametri elettrici indicati,

- 1) Identificare il punto operativo  $V_{GSQ}$ ,  $I_{DQ}$ ,  $V_{DSQ}$  dei transistor, nell'ipotesi che gli ingressi  $v_{i1}$  e  $v_{i2}$  siano a massa
- 2) dopo aver risolto l'equazione di secondo grado relativa al calcolo delle tensioni e correnti nel punto operativo, verificare che i transistor siano in saturazione e che la somma di  $V_{DS}$  e delle cadute di tensione su  $R_{D1}$  e su  $R_{SS}$  corrisponda a  $V_{DD} + V_{SS}$
- 3) calcolare la potenza dissipata dalla resistenza  $R_{SS}$
- 4) Calcolare la transconduttanza  $g_m$  dei transistor M1 ed M2 nel punto operativo
- 5) Calcolare il guadagno differenziale  $v_{out}/(v_{i1}-v_{i2})$  con  $v_{i1}=v_{id}/2$  e  $v_{i2}=-v_{id}/2$
- 6) Calcolare il guadagno di modo comune  $v_{out}/v_{icm}$  con  $v_{i1}=v_{i2}=v_{icm}$  e il CMRR



1) SI COME SONO SIMMETRICI = CONSIDERO SOLO MEZZO CIRCUITO



$$\begin{cases} I_{D1} = \frac{1}{2} k'_n (W/L) (V_{GS} - V_t)^2 \\ V_{GS} = V_G - V_S = -(2R_{SS} I_{D1} + V_{SS}) = 5 - 150k \cdot I_{D1} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{2 \cdot I_{D1}}{k'_n (W/L)} = (5 - 150k \cdot I_{D1} - V_t)^2 = 20.25 + 2.25 \cdot 10^{10} \cdot I_{D1}^2 - 1.352M I_{D1}$$

$$\Rightarrow 2.25 \cdot 10^{10} \cdot I_{D1}^2 - 1.352M I_{D1} + 20.25 = 0$$

$$I_{D1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{1.352M \pm 73511}{4.5 \cdot 10^{10}} = \begin{cases} - \frac{2.84 \cdot 10^{-5}}{3.17 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow V_{GD} = -2.16, V_{GS} = 0.74 < V_t \\ + \end{cases}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = -V_{GD} - (-V_{GS}) = 2.9V$$

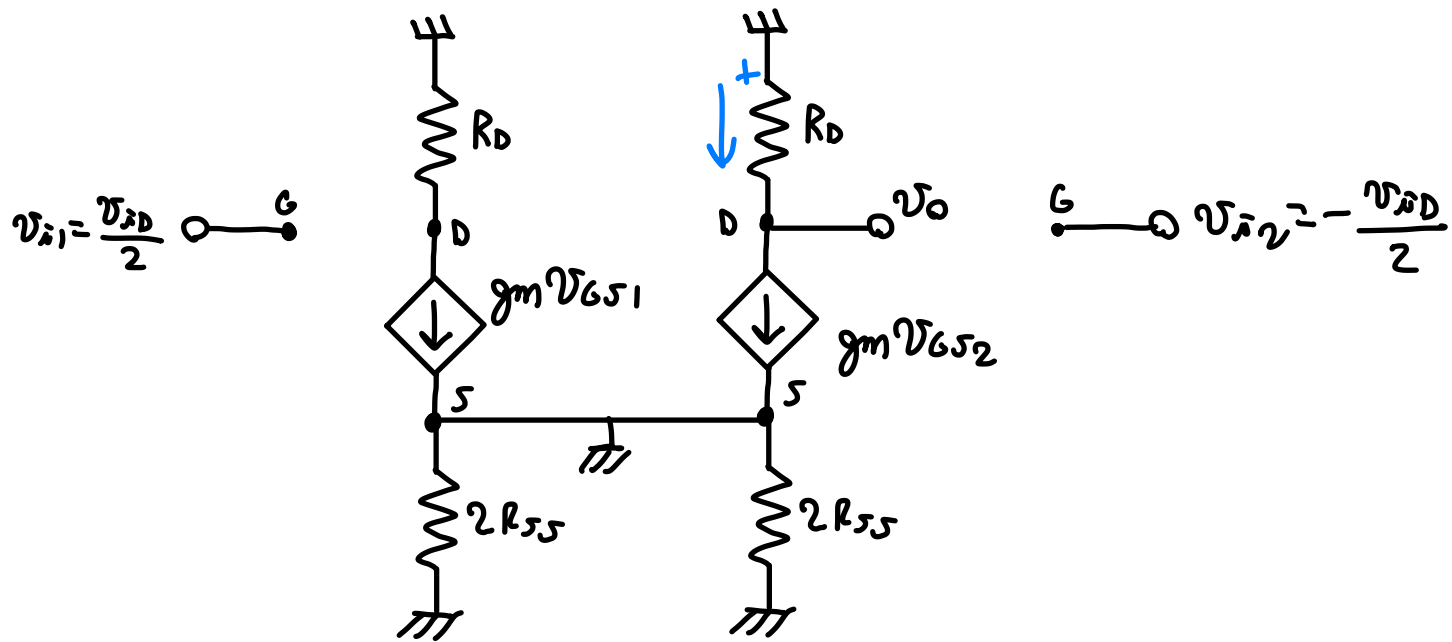
2) • VERIFICO SATURAZIONE:

$$V_{DD} + (-V_{SS}) = R_D I_D + V_{DS} + 2R_{SS} I_D = 10 \text{ OK}$$

$$3) \quad \underline{P_{SS}} = P_{SS} \cdot (2I_{D1})^2 = \dots$$

$$4) \quad \underline{g_{m1}} = g_{m2} = k_M' (W/L) \cdot (V_{GS} - V_t) = \underline{2.4 \cdot 10^{-4}} \quad 1/g_m = 4167 \, \Omega$$

5) MODO DIFFERENZIALE: SOURCE CONNESSI A MASSA

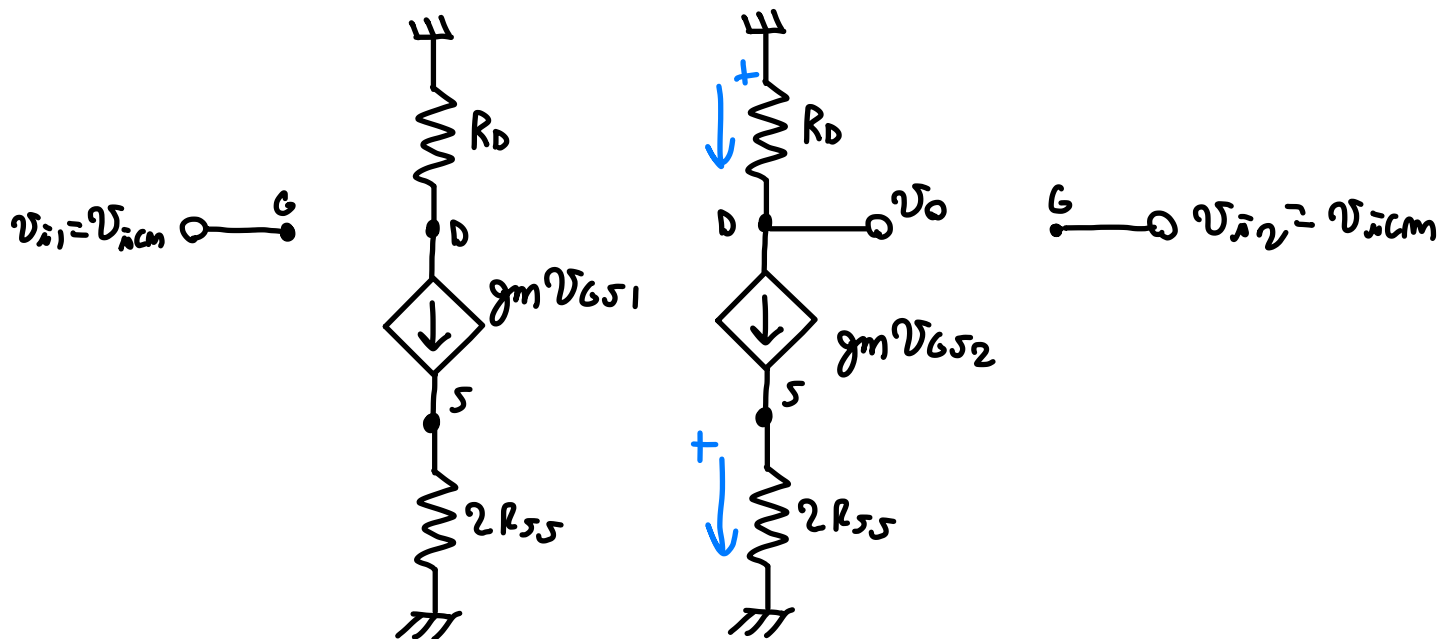


$$v_o = -R_D g_m v_{GS2} = R_D g_m v_{id}/2$$

$$v_{i1} - v_{i2} = v_{id}$$

$$\underline{A_D} = \frac{v_o}{v_{i1} - v_{i2}} = R_D g_m / 2 = 12$$

6) MODO COMUNE: SOURCE STACCATI



$$v_{GS2} = v_G - v_S = v_{icm} - 2R_{SS} g_m v_{GS2} \Rightarrow v_{GS2} = v_{icm} / (1 + 2R_{SS} g_m)$$

$$v_o = -R_D g_m v_{GS2}$$

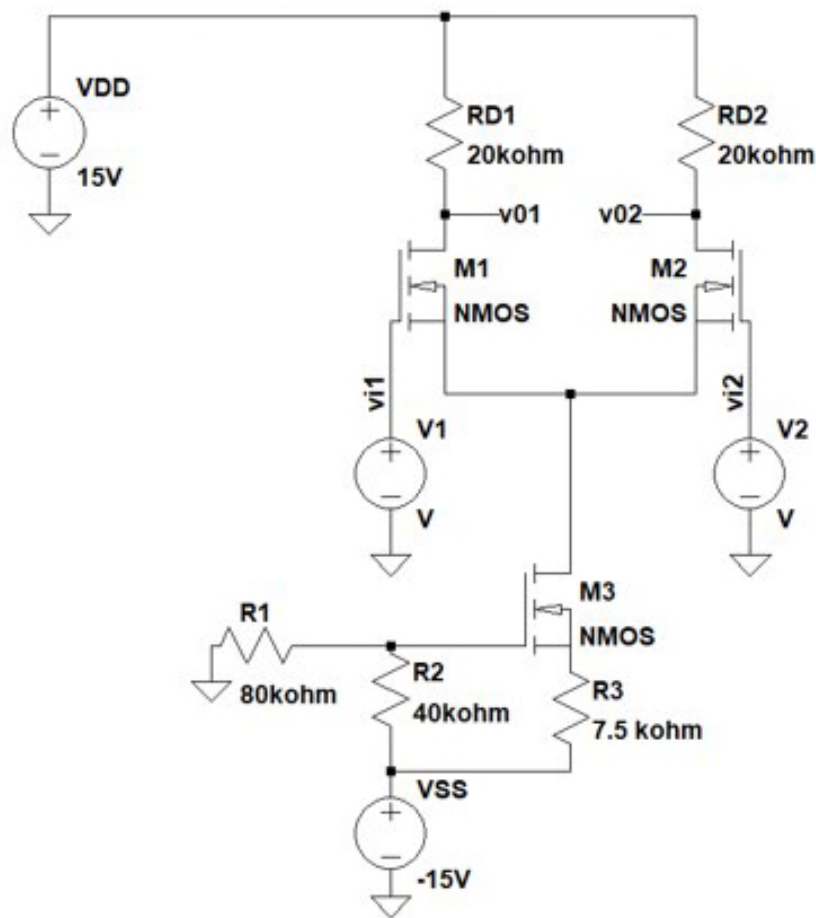
$$\underline{A_{cm}} = v_o / v_{icm} = -R_D g_m / (1 + 2R_{SS} g_m) = -0.65$$

$$\underline{CMRR} = \frac{|A_D|}{|A_{cm}|} = 18.46 = 25.3 \, \text{dB}$$

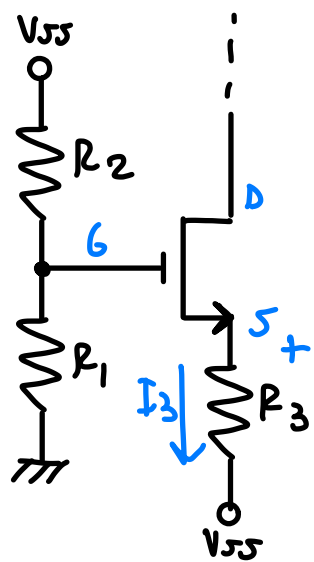
# Esame 2018-07-04 1

Nel circuito in figura, tutti i transistor hanno tensione di soglia  $V_T = 1\text{ V}$ ,  $k_n = 400\text{ }\mu\text{A/V}^2$ ,  $\lambda = 0\text{ V}^{-1}$

1. Trovare la tensione  $V_{GS3}$  del transistor M3
2. Trovare la corrente di drain di M3
3. Trovare la tensione  $V_{GS12}$  dei transistor M1, M2
4. Verificare che tutti i transistor siano in saturazione
5. Calcolare la transconduttanza di M1, M2 nel punto di lavoro



1)



$$V_{G3} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{SS} = -10\text{ V}$$

$$V_{S3} = V_{SS} + R_3 I_3 = -15 + R_3 I_3$$

$$V_{GS3} = V_{G3} - V_{S3} = 5 - R_3 I_3$$

$$I_3 = \frac{1}{2} k_n (V_{GS3} - V_T)^2 = \frac{1}{2} k_n (4 - R_3 I_3)^2$$

$$\Rightarrow \frac{2I_3}{k_n} = 16 + R_3^2 I_3^2 - 8R_3 I_3 \Rightarrow R_3^2 I_3^2 - (8R_3 + 2/k_n) I_3 + 16 = 0$$

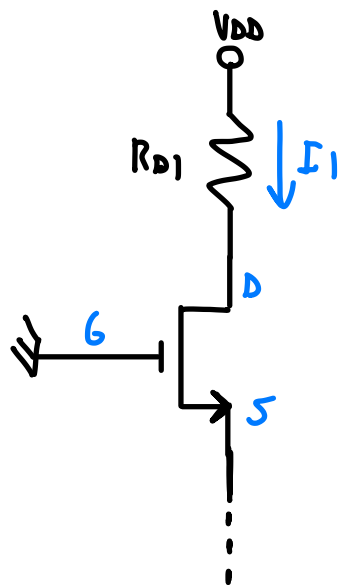
$$\Rightarrow 56.25\text{ M} I_3^2 - 65\text{ k} I_3 + 16 = 0$$

$$\underline{I_{3,1,2}} = \frac{65\text{ k} \pm 25\text{ k}}{112.5\text{ M}} = \begin{cases} - & 3.56 \cdot 10^{-4} \Rightarrow V_{GS3} = 2.33 > V_T \Rightarrow \text{OK} \\ + & 8 \cdot 10^{-4} \Rightarrow V_{GS3} = -1 < V_T \Rightarrow \text{NO} \end{cases}$$

2)  $I_3 = 3.56 \cdot 10^{-4}$

3) CIRCUITO SIMMETRICO: POSSO CONSIDERARE SOLO METÀ

$$\text{CON } I_1 = I_2 = I_3/2 = 1.78 \cdot 10^{-4} \text{ A}$$



$$I_1 = \frac{1}{2} k_n (V_{GS1} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS2} = V_{GS1} = \sqrt{\frac{2I_1}{k_n}} + V_t = 1.94 \text{ V} > V_t \Rightarrow \text{OK}$$

4)  $V_{D3} = V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} = 0 - 1.94 = -1.94$

$$V_{GD3} = V_{G3} - V_{D3} = -10 - (-1.94) = -8.06 < V_t \Rightarrow \text{OK}$$

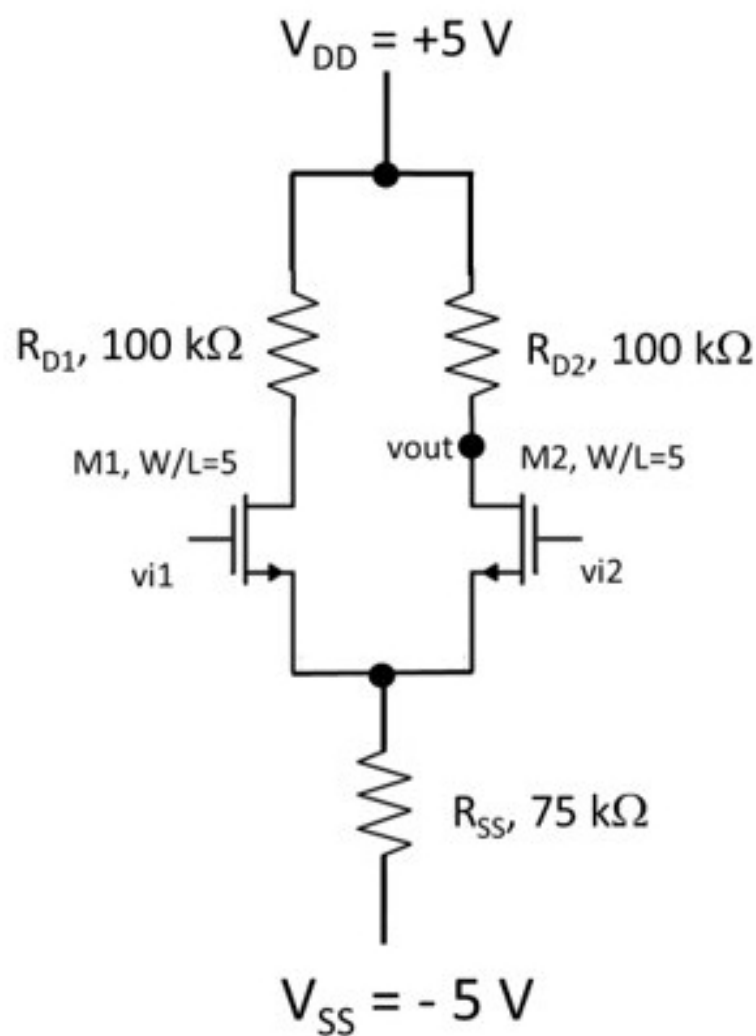
$$V_{GD1} = V_{GD2} = V_{G1} - V_{D1} = 0 - (V_{DD} - R_{D1} I_1) = -11.44 < V_t \Rightarrow \text{OK}$$

5)  $g_{m1} = g_{m2} = k_n (V_{GS1} - V_t) = 3.76 \cdot 10^{-4}$

# Esame 2018-07-04 2

Con riferimento all'amplificatore differenziale mostrato in figura, supponendo che i transistor MOSFET a canale n M1 ed M2 siano identici e con  $W/L = 5$ , con i parametri elettrici indicati,

- 1) Identificare il punto operativo  $V_{GSQ}$ ,  $I_{DQ}$ ,  $V_{DSQ}$  dei transistor, nell'ipotesi che gli ingressi  $v_{i1}$  e  $v_{i2}$  siano a massa
- 2) dopo aver risolto l'equazione di secondo grado relativa al calcolo delle tensioni e correnti nel punto operativo, verificare che i transistor siano in saturazione e che la somma di  $V_{DS}$  e delle cadute di tensione su  $R_{D1}$  e su  $R_{SS}$  corrisponda a  $V_{DD} + V_{SS}$
- 3) calcolare la potenza dissipata dalla resistenza  $R_{SS}$
- 4) Calcolare la transconduttanza  $g_m$  dei transistor M1 ed M2 nel punto operativo
- 5) Calcolare il guadagno differenziale  $v_{out}/(v_{i1}-v_{i2})$  con  $v_{i1}=v_{id}/2$  e  $v_{i2}=-v_{id}/2$
- 6) Calcolare il guadagno di modo comune  $v_{out}/v_{icm}$  con  $v_{i1}=v_{i2}=v_{icm}$  e il CMRR in dB



$$\begin{aligned} V_{Th} &= +0.5 \text{ V} \\ k'_n &= 200 \mu\text{A/V}^2 \\ \lambda &= 0 \text{ V}^{-1} \end{aligned}$$

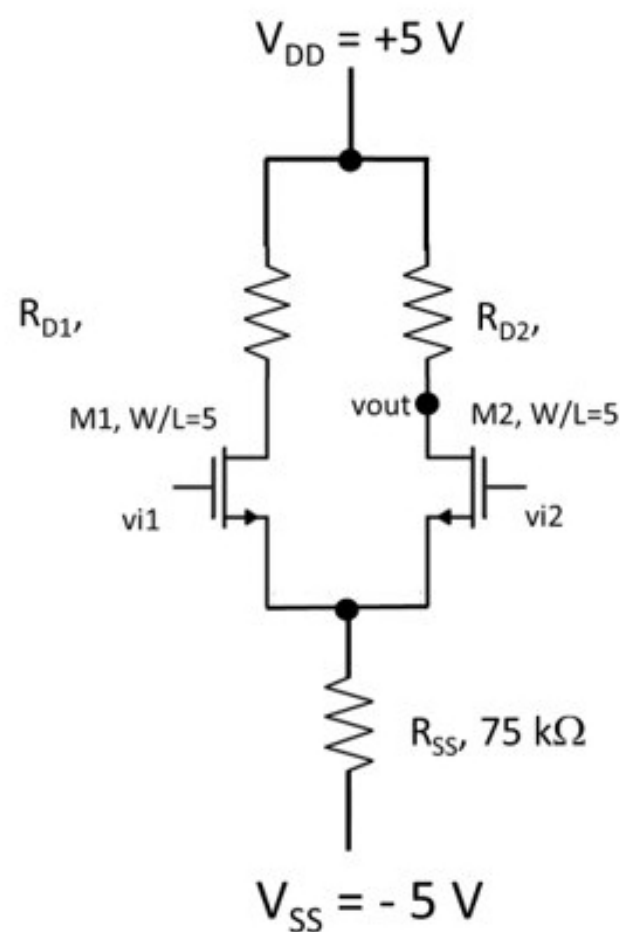
**ESAME IDENTICO A 2018-06-19**



# Esame 2018-07-18

Con riferimento all'amplificatore differenziale mostrato in figura, supponendo che i transistor MOSFET a canale n M1 ed M2 siano identici e con  $W/L = 5$ , con i parametri elettrici indicati e  $R_{D1} = R_{D2} = 50 \text{ k}\Omega$ ,

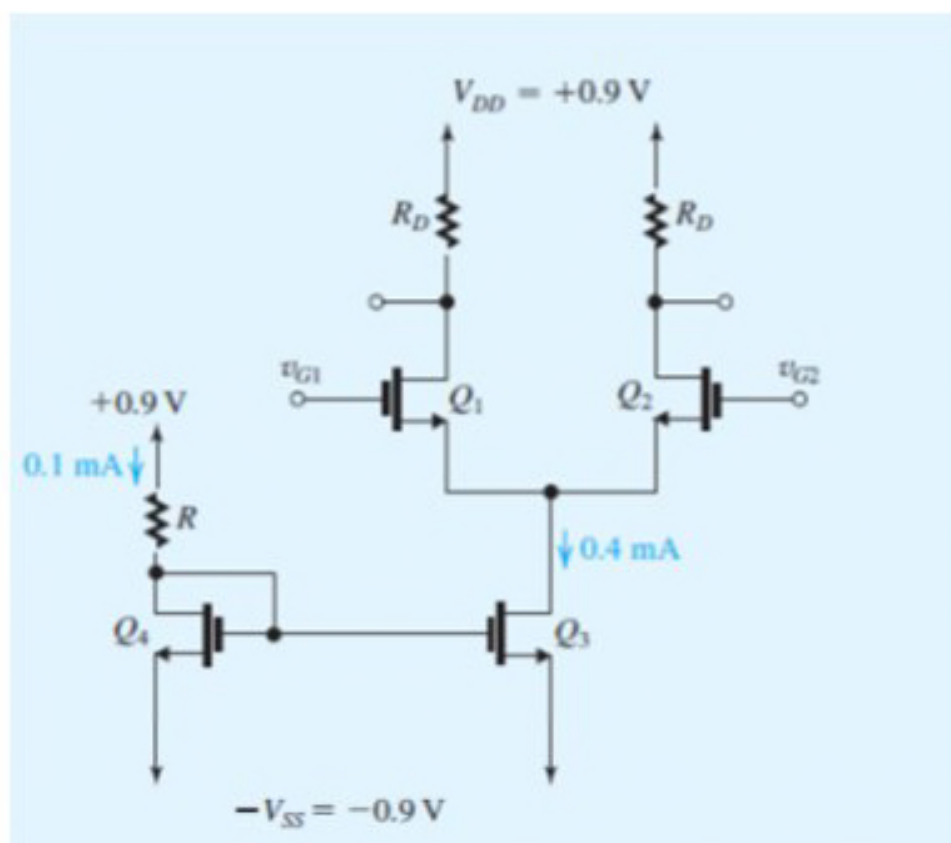
- 1) Identificare il punto operativo  $V_{GSQ}$ ,  $I_{DQ}$ ,  $V_{DSQ}$  dei transistor, nell'ipotesi che gli ingressi  $v_{i1}$  e  $v_{i2}$  siano a massa
- 2) dopo aver risolto l'equazione di secondo grado relativa al calcolo delle tensioni e correnti nel punto operativo, verificare che i transistor siano in saturazione e che la somma di  $V_{DS}$  e delle cadute di tensione su  $R_{D1}$  e su  $R_{SS}$  corrisponda a  $V_{DD} + |V_{SS}|$
- 3) calcolare la potenza dissipata dalle resistenze  $R_{D1}$  e  $R_{D2}$  e dai transistor
- 4) Calcolare la transconduttanza  $g_m$  dei transistor M1 ed M2 nel punto operativo
- 5) Calcolare il guadagno differenziale  $v_{out}/(v_{i1}-v_{i2})$  con  $v_{i1}=v_{id}/2$  e  $v_{i2} = -v_{id}/2$
- 6) Calcolare il guadagno di modo comune  $v_{out}/v_{icm}$  con  $v_{i1}=v_{i2}=v_{icm}$  e il CMRR



$$\begin{aligned} V_{Th} &= +0.5 \text{ V} \\ k'_n &= 200 \mu\text{A/V}^2 \\ \lambda &= 0 \text{ V}^{-1} \end{aligned}$$

ESAME IDENTICO A 2018-06-19  
MA CON  $R_{D1} = R_{D2} = 50 \text{ k}\Omega$

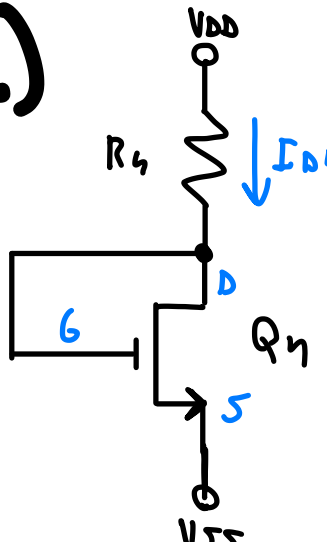
# Esame 2018-07-18



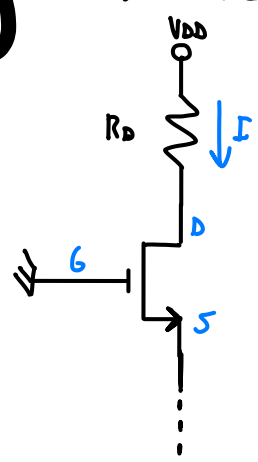
Dato il circuito in figura, nel quale la tensione di soglia dei transistor è  $V_{tn} = 0.4 \text{ V}$  e  $k_n' = 0.4 \text{ mA/V}^2$ ,  $(W/L)_1 = (W/L)_2 = 44.4$ ,  $(W/L)_3 = 88.8$ ,  $(W/L)_4 = 22.2$ .

Determinare il punto di lavoro di Q4, la corrente di drain di Q3, Q1, Q2. Verificare che i transistor si trovino in saturazione. Calcolare la transconduttanza  $g_m$  di Q1 e Q2, il guadagno differenziale dell'amplificatore, il guadagno di modo comune e il CMRR, tutti con uscita *single-ended* e nell'ipotesi che  $\lambda = 0$ . Cosa cambia se  $\lambda$  è diverso da 0?

- 1)  $I_{DQ4} = \dots\dots\dots$
- 2) caduta di tensione su R =  $\dots\dots\dots$ , caduta  $V_{DSQ4} = \dots\dots\dots$
- 3)  $I_{D3} = \dots\dots\dots$ ;  $I_{D1} = \dots\dots\dots$ ;  $I_{D2} = \dots\dots\dots$
- 4) Verifica saturazione
- 5) Transconduttanza  $g_m = \dots\dots\dots$
- 6) Guadagno differenziale =  $\dots\dots\dots$
- 7) Guadagno di modo comune e CMRR =  $\dots\dots\dots$

1)   $I_{D4} = 0.1 \text{ mA}$   
 $I_{D4} = \frac{1}{2} k_n' (W/L)_4 (V_{GS4} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS4} = \sqrt{\frac{2 I_{D4}}{k_n' (W/L)_4}} + V_t = 0.51 \text{ V} > V_t \Rightarrow \text{OK}$   
 $V_{GD4} = 0 < V_t \Rightarrow \text{OK}$   
 $V_{GS4} = V_{DS4} = V_{DD} - R I_{D4} - V_{SS} \Rightarrow R I_{D4} = V_{DD} - V_{SS} - V_{GS4} = 0.99 \text{ V}$

3) CIRCUITO SIMMETRICO: POSSO CONSIDERARE SOLO METÀ

  $I_1 = I_2 = I_3/2 = 0.2 \text{ mA}$



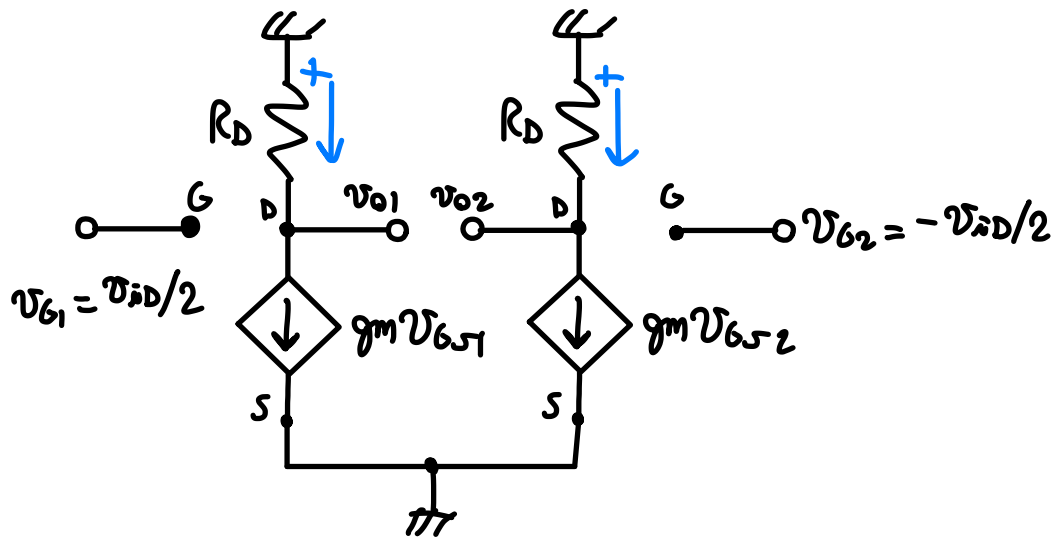
$$4) I_1 = \frac{1}{2} k_n' (W/L)_1 (V_{GS1} - V_t)^2 \Rightarrow \underline{V_{GS1}} = \sqrt{\frac{2 I_{D1}}{k_n' (W/L)_1}} + V_t = 0.55 \text{ V} > V_t \Rightarrow \text{OK}$$

$$= \underline{V_{GS2}} = -V_{S1} = -V_{S2}$$

$$V_{GD2} = V_{GD1} = V_{G1} - V_{A1} = 0 - (V_{DD} - R_D I_1) \leq V_t \Rightarrow \text{SALDO SE } R_D \leq (V_t + V_{DD})/I_1 \leq 6.5 \text{ K}\Omega$$

$$5) g_{m1} = g_{m2} = k_n' (W/L)_1 (V_{GS1} - V_t) = 2.664 \cdot 10^{-3}$$

6) **MODO DIFFERENZIALE: SOURCES CONNESSE A MASSA**



$$\underline{V_{id} = V_{G1} - V_{G2}}$$

$$\underline{V_{O1} = -R_D g_m V_{GS1} = -R_D g_m V_{id}/2}$$

$$\underline{V_{O2} = -R_D g_m V_{GS2} = +R_D g_m V_{id}/2}$$

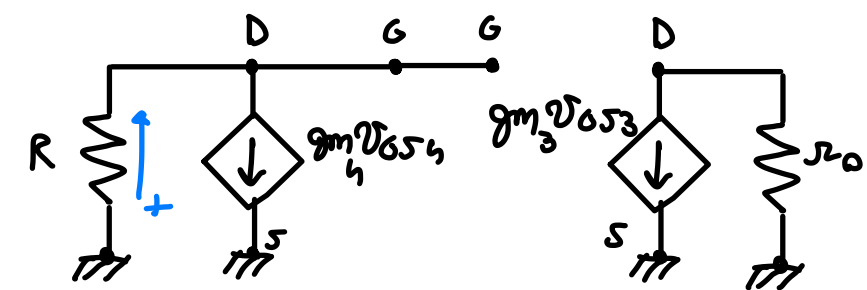
$$\underline{V_{OD} = V_{O2} - V_{O1} = R_D g_m V_{id}}$$

$$\underline{A_D(\text{SINGLE})_1 = \frac{V_{O1}}{V_{id}} = -\frac{R_D g_m}{2} = -8.658}$$

$$\underline{A_D(\text{SINGLE})_2 = \frac{V_{O2}}{V_{id}} = +\frac{R_D g_m}{2} = +8.658}$$

$$\underline{A_D(\text{DIFF}) = \frac{V_{OD}}{V_{id}} = R_D g_m = 17.316}$$

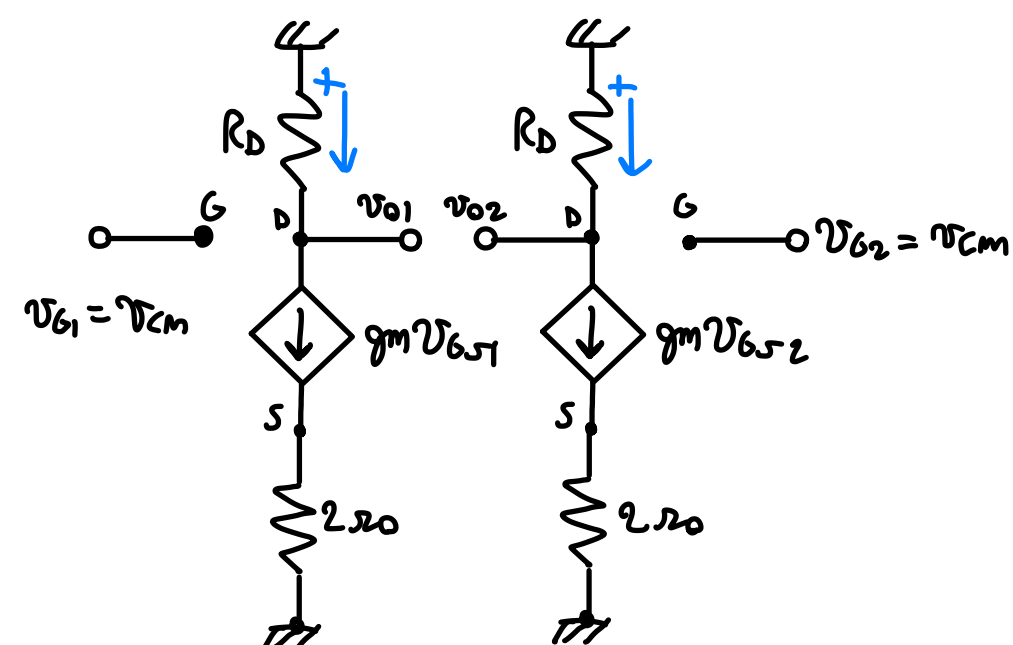
7) **MODO COMUNE: SOURCES STACCATI**



$$V_{GS1} = -R_D g_m V_{GS1} \Rightarrow V_{GS1} = 0 \Rightarrow V_G = 0$$

$$V_{GS3} = 0 \Rightarrow g_{m3} V_{GS3} = 0 \text{ A} \Rightarrow \text{CIRCUITO APERTO}$$

$$\underline{r_o = 1/\lambda I_3 = +\infty}$$



$$\underline{V_{GS2} = V_{GS1} = V_G - V_{S1} = V_{icm} - 2r_o g_m V_{GS1}}$$

$$\Rightarrow \underline{V_{GS1} = V_{icm}/(1 - 2r_o g_m)}$$

$$\underline{V_{icm} = V_{G1} = V_{G2}}$$

$$\underline{V_{O1} = -R_D g_m V_{icm}/(1 - 2r_o g_m)}$$

$$\underline{V_{O2} = -R_D g_m V_{icm}/(1 - 2r_o g_m)}$$

$$\underline{V_{OD} = V_{O2} - V_{O1} = 0}$$

$$\underline{A_{cm}(\text{SING}) = \frac{V_{O1}}{V_{icm}} = \frac{V_{O2}}{V_{icm}} = -R_D g_m/(1 - 2r_o g_m)}$$

$$\underline{A_{cm}(\text{DIFF}) = \frac{V_{OD}}{V_{icm}} = 0}$$

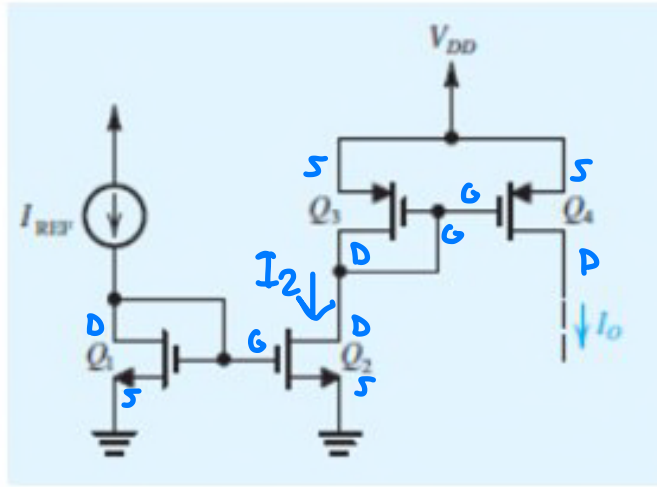
$$\bullet \text{ SICCOME } r_o = +\infty \text{ } A_{cm} = 0$$

$$8) \underline{CMRR(\text{SINGLE}) = 20 \log_{10} \frac{|A_D|_S}{|A_{cm}|_S} = \frac{R_D g_m/2}{R_D g_m/(1 - 2r_o g_m)} =}$$

$$\underline{CMRR(\text{DIFF}) = 20 \log_{10} \frac{|A_D|_{\text{DIFF}}}{|A_{cm}|_{\text{DIFF}}} = \frac{R_D g_m}{0} = +\infty \Rightarrow \text{MEGLIO PRENDERE L'OUTPUT DIFFERENZIALE + CMRR \tilde{=} ALTO MEGLIO \tilde{=}}$$

# Esame 2018-07-18

Per il circuito in figura, scrivere l'espressione di  $I_o$  in funzione di  $I_{REF}$  e del rapporto  $(W/L)_i$   $i = 1, 2, 3, 4$  dei transistor.  
Assumere  $\lambda = 0$ .



$$I_{REF} = \frac{1}{2} k_n' (W/L)_1 (V_{GS1} - V_{thn})^2 \Rightarrow V_{GS1} = \sqrt{\frac{2 I_{REF}}{k_n' (W/L)_1}} + V_{thn}$$

$$V_{GS2} = V_{GS1}$$

$$I_2 = \frac{1}{2} k_n' (W/L)_2 (\widehat{V_{GS2}} - V_{thn})^2 = \frac{1}{2} k_n' (W/L)_2 \left( \sqrt{\frac{2 I_{REF}}{k_n' (W/L)_1}} + \cancel{V_{thn}} - \cancel{V_{thn}} \right)^2$$

$$= \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{REF}$$

$$I_3 = I_2 = \frac{1}{2} k_p' (W/L)_3 (\widehat{V_{SG3}} - |V_{thp}|)^2 \Rightarrow V_{SG3} = \sqrt{\frac{2 I_2}{k_p' (W/L)_3}} + |V_{thp}|$$

$$V_{SG4} = V_{SG3}$$

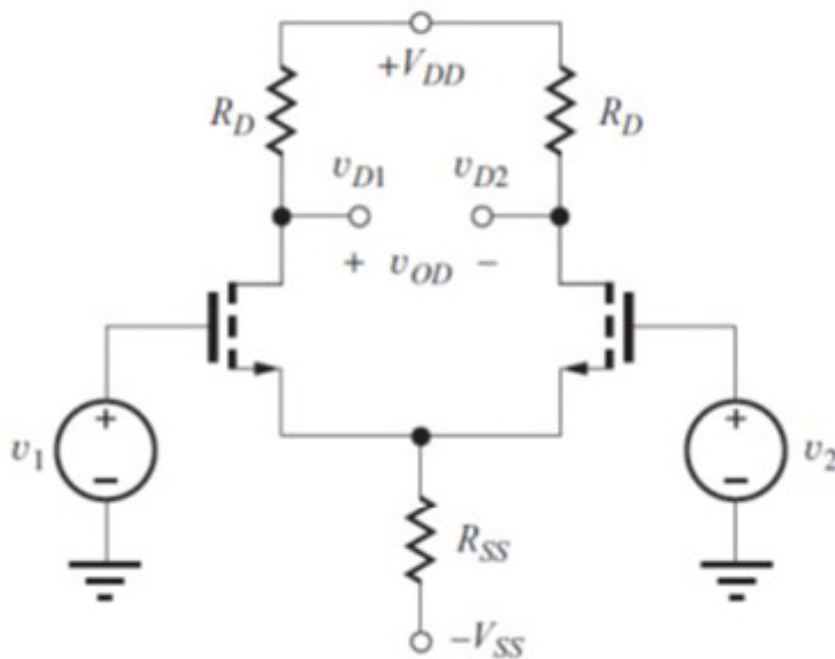
$$I_o = \frac{1}{2} k_p' (W/L)_4 (\widehat{V_{SG4}} - |V_{thp}|)^2 = \frac{1}{2} k_p' (W/L)_4 \left( \sqrt{\frac{2 I_2}{k_p' (W/L)_3}} + |V_{thp}| - |V_{thp}| \right)^2$$

$$= \frac{(W/L)_4}{(W/L)_3} I_2 = \frac{(W/L)_4}{(W/L)_3} \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{REF}$$

# Esame 2018-09-17

Dato l'amplificatore operazionale in figura, con  $V_{DD} = V_{SS} = 15\text{ V}$ ,  $R_{SS} = 62\text{ k}\Omega$ ,  $R_D = 62\text{ k}\Omega$ ,  $k_n = 400\text{ }\mu\text{A/V}^2$  e  $V_{TN} = 1\text{ V}$ ,

- calcolare il punto operativo dei due transistor
- calcolare il guadagno differenziale
- calcolare il guadagno di modo comune
- calcolare il fattore di reiezione di modo comune
- calcolare la resistenza differenziale di ingresso



**A) CIRCUITO SIMMETRICO: POSSO CONSIDERARE SOLO METÀ**

$$V_{GS} = V_G - V_S = -(2R_{SS} \cdot I_1 + V_{SS}) = 15 - 2R_{SS} I_1$$

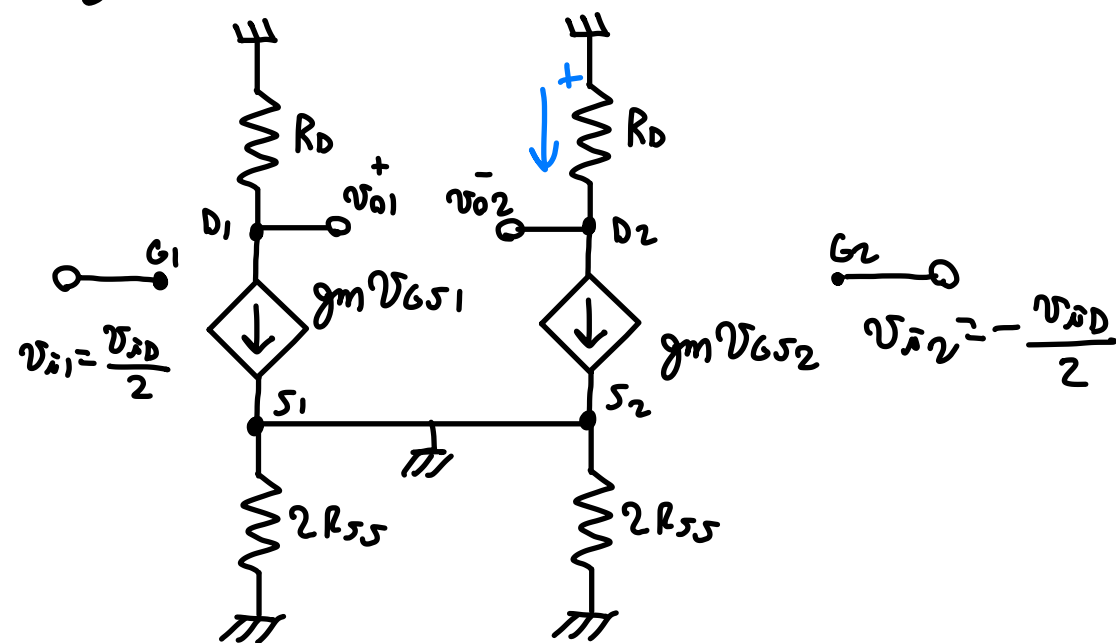
$$I_1 = \frac{1}{2} k_n (V_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} k_n (14 - 2R_{SS} I_1)^2 = 200 \mu (196 + 1.5376 \cdot 10^{10} I_1^2 - 3.472 \cdot 10^6 I_1)$$

$$\Rightarrow 1.5376 \cdot 10^{10} I_1^2 - 3.481 \cdot 10^6 I_1 + 196 = 0$$

$$\Rightarrow I_{1,2} = \frac{3.481 \cdot 10^6 \pm 250153}{2 \cdot 1.5376 \cdot 10^{10}} = \begin{cases} \frac{1.07 \cdot 10^{-4}}{1.19 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow V_{GS} = 1.73 > V_t \Rightarrow OK \\ \frac{1.07 \cdot 10^{-4}}{1.19 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow V_{GS} = 0.22 < V_t \Rightarrow NO \end{cases}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_{DD} - R_D \cdot I_1 - (2 \cdot R_{SS} \cdot I_1 + V_{SS}) = V_{DD} - V_{SS} - (R_D + 2R_{SS}) \cdot I_1 = 8.36\text{ V}$$

**B) MODO DIFFERENZIALE: SOURCES CONNESSI A MASSA**



$$g_{m1} = g_{m2} = k_n (V_{GS} - V_t) = 2.92 \cdot 10^{-4}$$

$$v_{ID} = v_1 - v_2$$

$$v_{O1} = -R_D g_m v_{GS1} = -R_D g_m v_{ID}/2$$

$$v_{O2} = -R_D g_m v_{GS2} = +R_D g_m v_{ID}/2$$

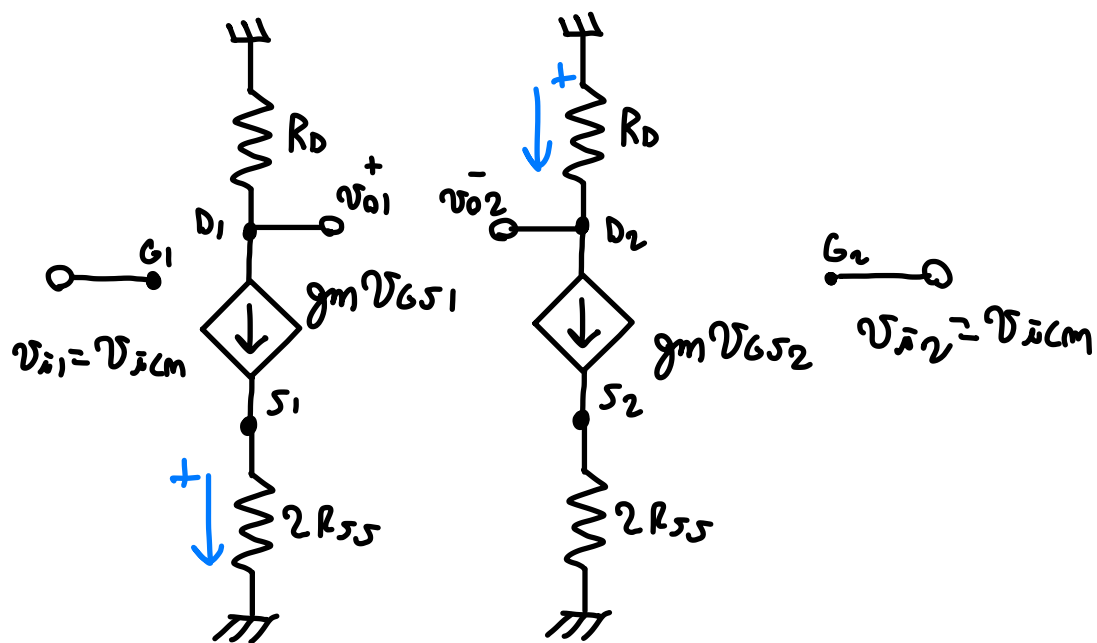
$$v_{OD} = v_{O2} - v_{O1} = R_D g_m v_{ID}$$

$$A_D(\text{SINGLE})_1 = \frac{v_{O1}}{v_{ID}} = -R_D g_m / 2 = -9.052$$

$$A_D(\text{SINGLE})_2 = \frac{v_{O2}}{v_{ID}} = +R_D g_m / 2 = +9.052$$

$$A_D(\text{DIFF}) = \frac{v_{OD}}{v_{ID}} = R_D g_m = 18.104$$

### C) MODO COMUNE: SOURCES STACCATI



$$v_{GS2} = v_{GS1} = v_G - v_{S1} = v_{icm} - 2R_{SS} g_m v_{GS1}$$

$$\Rightarrow v_{GS1} = v_{icm} / (1 - 2R_{SS} g_m)$$

$$v_{icm} = v_1 = v_2$$

$$v_{o1} = -R_D g_m v_{GS} = -R_D g_m v_{icm} / (1 - 2R_{SS} g_m)$$

$$v_{o2} = -R_D g_m v_{GS} = -R_D g_m v_{icm} / (1 - 2R_{SS} g_m)$$

$$v_{OD} = v_{o2} - v_{o1} = 0$$

$$A_{cm}(SINGLE) = \frac{v_{o1}}{v_{icm}} = \frac{v_{o2}}{v_{icm}} = -R_D g_m / (1 - 2R_{SS} g_m)$$

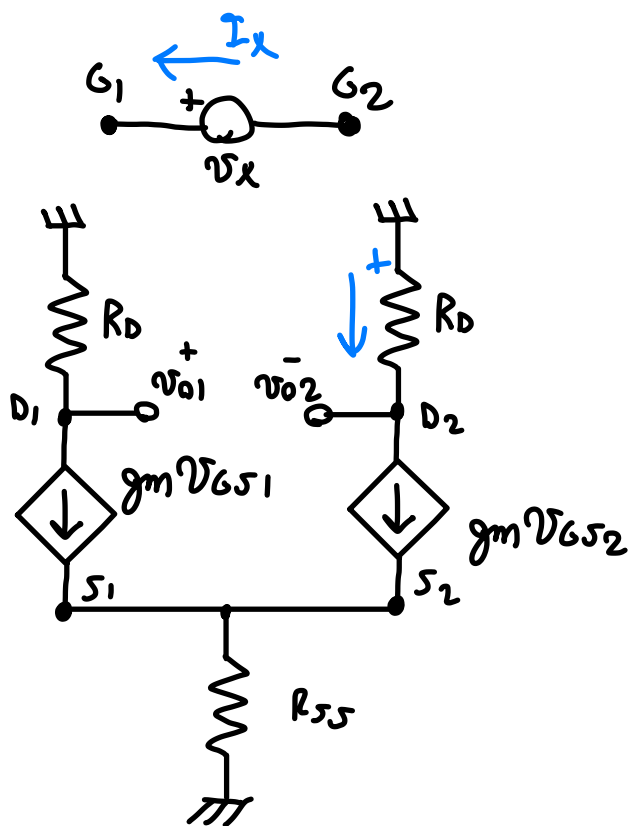
$$A_{cm}(DIFF) = \frac{v_{OD}}{v_{icm}} = 0 \quad \Rightarrow -0.51$$

### D)

$$CMRR(SINGLE) = 20 \log \frac{|A_D|_S}{|A_{cm}|_S} = 20 \log \frac{9.052}{0.51} = 24.98 \text{ dB}$$

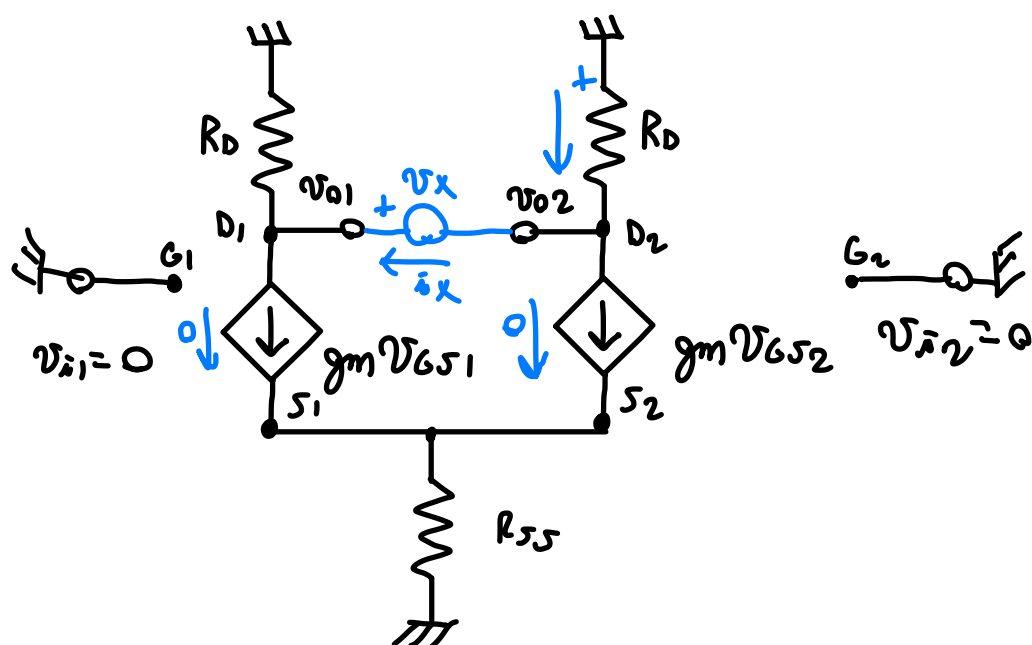
$$CMRR(DIFF) = 20 \log \frac{|A_D|_{DIFF}}{|A_{cm}|_{DIFF}} = 20 \log \frac{18.107}{0} = +\infty$$

### E) RESISTENZA DIFFERENZIALE IN INGRESSO: APPLICHO $v_x$ TRA I 2 INGRESSI



$$R_{IN}(DIFF) = \frac{v_x}{i_x} = \frac{v_x \text{ CONNESSO AL VUOTO}}{i_x = 0} = +\infty$$

### F) RESISTENZA DIFFERENZIALE IN USCITA: APPLICHO $v_x$ TRA LE USCITE



$$v_{GS1} = v_{GS2} = 0$$

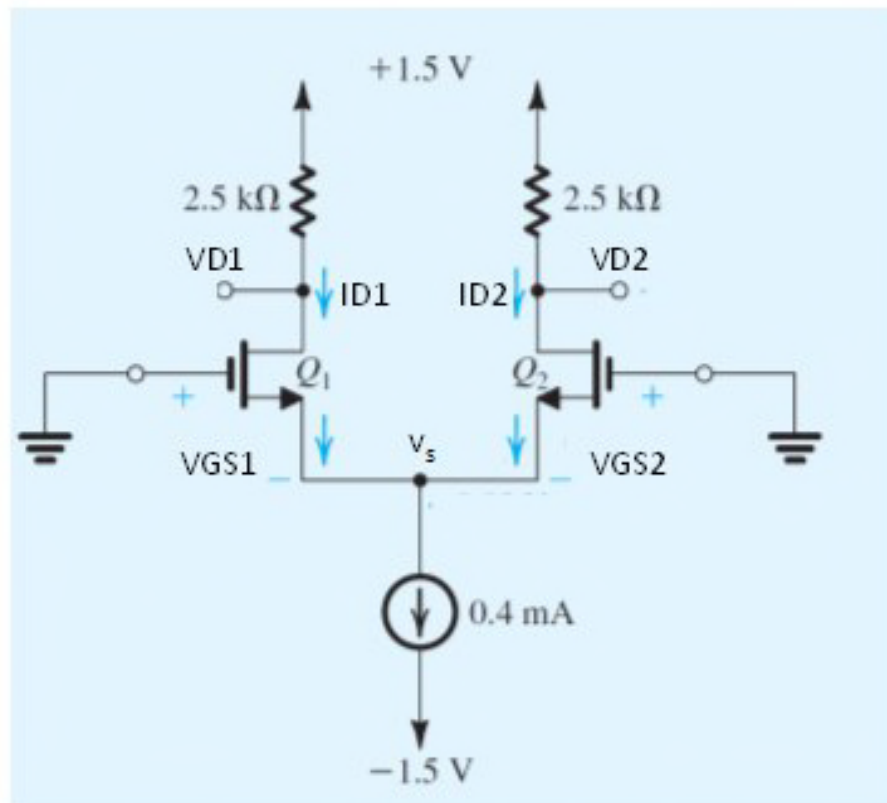
$$g_m v_{GS1} = g_m v_{GS2} = 0 \text{ A}$$

$$i_x = v_x / 2R_D$$

$$R_{OUT} = \frac{v_x}{i_x} = 2R_D$$



# Esame 2019-01-30



Dato il circuito in figura, nel quale i transistor MOS a canale n ad arricchimento sono caratterizzati da  $k_n = 4 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_{Tn} = 0.5 \text{ V}$ , si trascuri la modulazione della lunghezza di canale e si calcolino a) le tensioni  $V_{GS}$  dei due transistor; (b) le tensioni di drain  $V_D$  dei due transistor; (c) le correnti di drain dei due transistor; (d) la tensione  $v_s$ . (e) qual è il valore più alto di  $v_{CM}$  per il quale i due transistor si mantengono in saturazione? (f) sostituire il generatore di corrente con una resistenza connessa tra  $v_s$  e  $-1.5 \text{ V}$ , tale da mantenere una corrente circa pari a  $0.4 \text{ mA}$ . Supponendo di utilizzare questo circuito come amplificatore differenziale, quanto varrebbe in questo caso il guadagno differenziale, il guadagno di modo comune e il CMRR?

**A)** CIRCUITO SIMMETRICO: POSSO CONSIDERARE SOLO METÀ

$$I_1 = I_2 = I/2 = 0.2 \text{ mA}$$

$$I_1 = \frac{1}{2} k_n (V_{GS1} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GS2} = V_{GS1} = \sqrt{\frac{2I_1}{k_n}} + V_t = 0.82 > V_t \Rightarrow \text{OK}$$

**B)**  $V_{D1} = V_{D2} = V_{DD} - R_D I_1 = 1 \text{ V}$

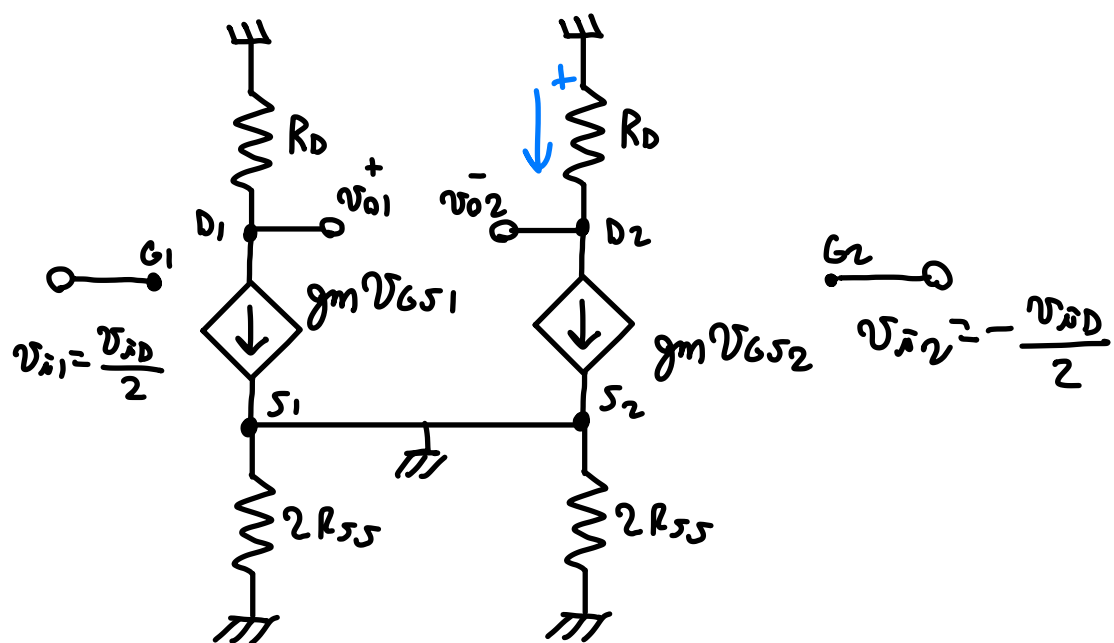
**C)**  $I_{D1} = I_{D2} = I_1 = 0.2 \text{ mA}$

**D)**  $V_{GS} = V_G - V_S = 0 - V_S \Rightarrow V_S = -V_{GS} = -0.82 \text{ V}$

**E)** CONDIZIONI DI SATURAZIONE:  $\begin{cases} V_{GS} \geq V_t \\ V_{GD} \leq V_t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_G \geq V_t + V_S \\ V_G \leq V_t + V_D \end{cases} \Rightarrow -0.32 \leq V_G \leq 1.5$

**F)**  $R_{SS} = (V_S - V_{SS})/I = 1.700 \Omega$

## MODO DIFFERENZIALE: SOURCES CONNESSI A MASSA



$$g_{m1} = g_{m2} = k_m (V_{GS} - V_t) = 1.28 \cdot 10^{-3}$$

$$v_{idD} = v_1 - v_2$$

$$v_{o1} = -R_D g_m v_{GS1} = -R_D g_m v_{idD}/2$$

$$v_{o2} = -R_D g_m v_{GS2} = +R_D g_m v_{idD}/2$$

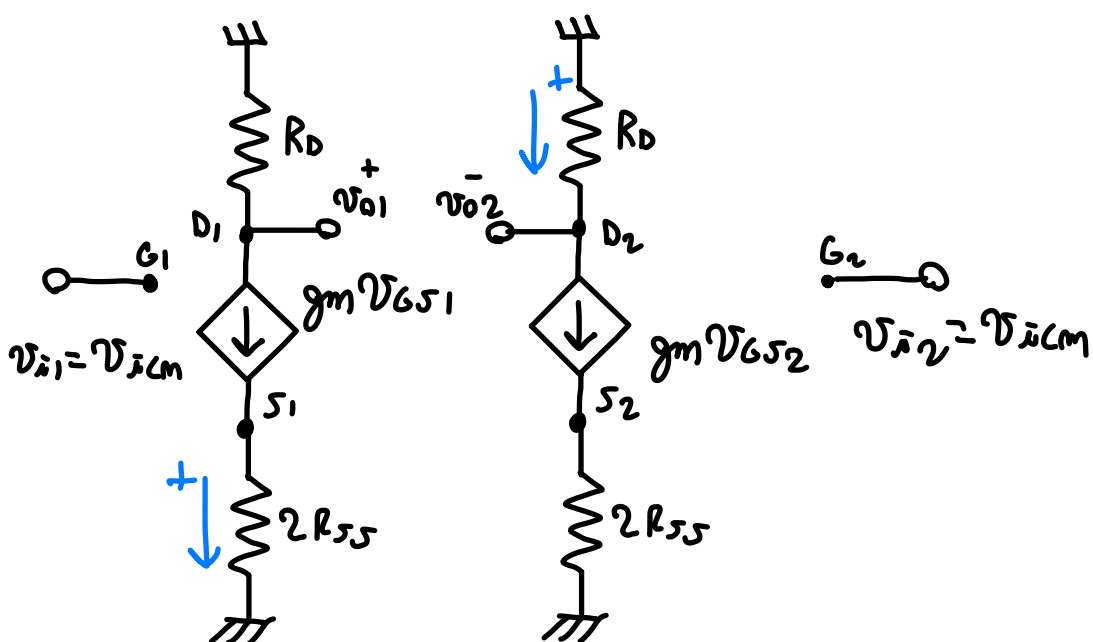
$$v_{od} = v_{o2} - v_{o1} = R_D g_m v_{idD}$$

$$A_{D(SINGLE)}_1 = \frac{v_{o1}}{v_{idD}} = -R_D g_m / 2 = -1.6$$

$$A_{D(SINGLE)}_2 = \frac{v_{o2}}{v_{idD}} = +R_D g_m / 2 = +1.6$$

$$A_{D(DIFF)} = \frac{v_{od}}{v_{idD}} = R_D g_m = 3.2$$

## MODO COMUNE: SOURCES STACCATI



$$v_{GS2} = v_{GS1} = v_G - v_{S1} = v_{idCM} - 2R_{SS} g_m v_{GS1}$$

$$\Rightarrow v_{GS1} = v_{idCM} / (1 - 2R_{SS} g_m)$$

$$v_{idCM} = v_1 = v_2$$

$$v_{o1} = -R_D g_m v_{GS} = -R_D g_m v_{idCM} / (1 - 2R_{SS} g_m)$$

$$v_{o2} = -R_D g_m v_{GS} = -R_D g_m v_{idCM} / (1 - 2R_{SS} g_m)$$

$$v_{od} = v_{o2} - v_{o1} = 0$$

$$A_{CM(SINGLE)} = \frac{v_{o1}}{v_{idCM}} = \frac{v_{o2}}{v_{idCM}} = -R_D g_m / (1 - 2R_{SS} g_m)$$

$$A_{CM(DIFF)} = \frac{v_{od}}{v_{idCM}} = 0 = 0.95$$

$$CMRR(SINGLE) = 20 \log \frac{|A_D|_S}{|A_{CM}|_S} = 20 \log \frac{1.6}{0.95} = 4.53 \text{ dB}$$

$$CMRR(DIFF) = 20 \log \frac{|A_D|_{DIFF}}{|A_{CM}|_{DIFF}} = 20 \log \frac{3.2}{0} = +\infty$$