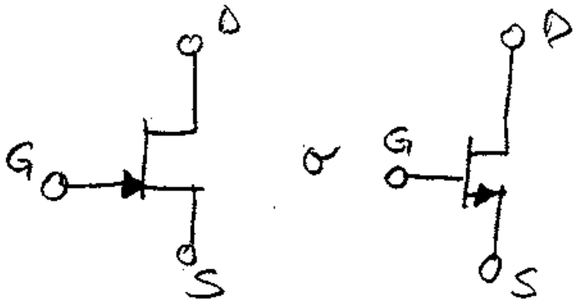
J-FET

- INTRODUZIONE

- Dispositivo a 3 terminali -
- " non-lineare (serve però + circ. lineari (si linearizza x piccoli segnali) —

- J-FET a canale n :



- Funzionam. come amplificatore : in PINCH-OFF (altre zone : TRIODO o SPENTO)
- Occorre fare IPOTESI su stato J-FET -
  Poi VERIFICA (come diodo)

in PINCH-OFF (è un gen. di corrente)

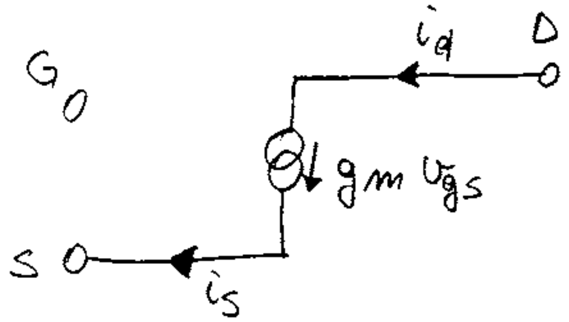
canale n ($V_P < 0$)	canale p ($V_P > 0$)
($V_{GS} \leq 0$)	($V_{SG} \leq 0$)
$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = \frac{I_{DSS}}{V_P^2}\left(V_{GS} - V_P\right)^2$	$I_D = I_{DSS}\left(1 + \frac{V_{SG}}{V_P}\right)^2 = \frac{I_{DSS}}{V_P^2}\left(V_{SG} + V_P\right)^2$
cond: $V_{DS} \geqslant V_{GS} - V_P$ o $V_{DG} \geqslant -V_P$	$V_{SD} \geqslant V_{SG} + V_P$ $V_{GD} \geqslant V_P$
e $V_{GS} > V_P$ (accensione)	$V_{SG} > -V_P$

TRIODO:

$$I_D = I_{DSS}\left[2\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)\left(\frac{V_{DS}}{-V_P}\right) - \left(\frac{V_{DS}}{V_P}\right)^2\right]$$

- CALCOLO PUNTO DI LAVORO

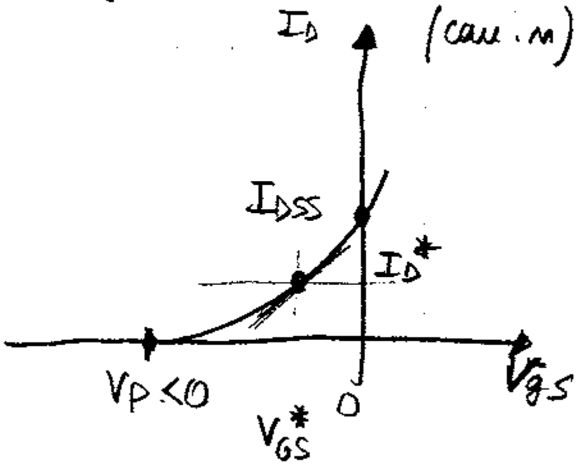
- GUAD. × PICCOLI SEGN. (MOD × PICCOLI SEGN.):



! uguale + can. n e p!

$i_d = i_s$!!

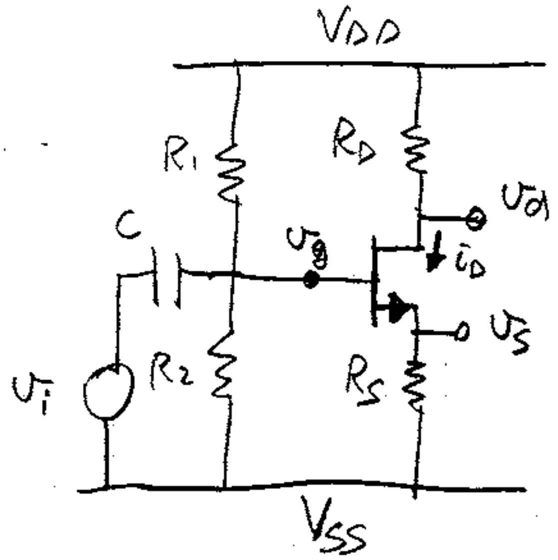
g_m da transcaratteristica



$$g_m = \left.\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}\right|_{I_D = I_D^*}$$

$$g_m = \frac{2 I_{DSS}}{|V_P|}\left(1 - \frac{V_{GS}^*}{V_P}\right) = \frac{2 I_{DSS}}{|V_P|} \cdot \sqrt{\frac{I_D^*}{I_{DSS}}} = \frac{2}{|V_P|}\sqrt{I_D^* I_{DSS}}$$

RELAZIONI TRA TENSIONI di SEGNALE: (DA RICORDARE)



$v_g = v_i$

? v_s, v_d, v_{gs} ?

$$\boxed{v_s = v_g \cdot \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} \left(\simeq v_g\right)}$$

$$\boxed{v_{gs} = v_g - v_s = v_g \cdot \frac{1}{1 + g_m R_S}}$$

$$\boxed{v_d = - v_g \cdot \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S}}$$

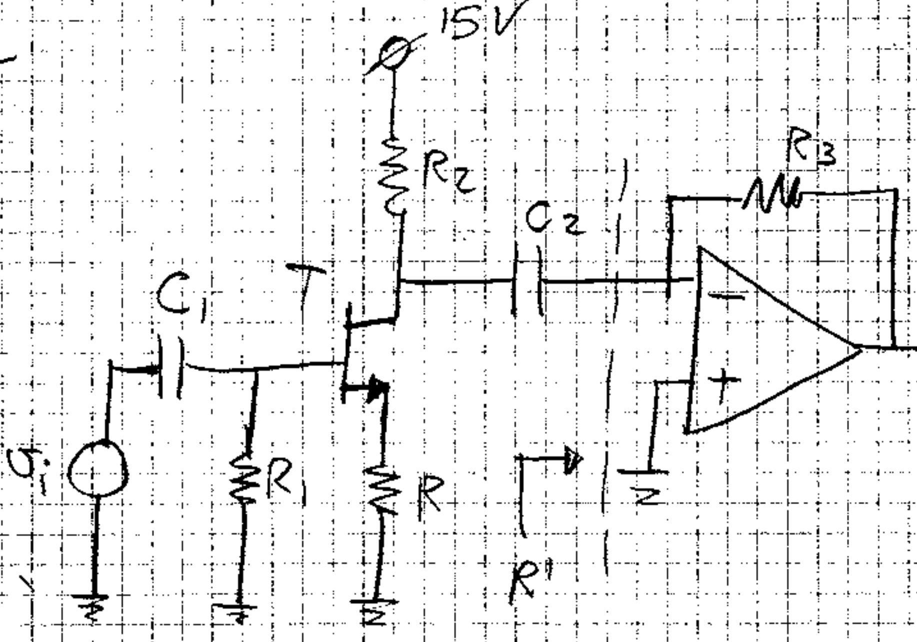
calcolo:

$v_d = - i_D \cdot R_D = - g_m v_{gs} R_D$

IMPEDENZE (piccolo segnale)

(Trascurando r_0) Infinite tra tutti i morsetti tranne che tra S e G (da S) $= \frac{1}{g_m}$

● ES (SCRITTO 28/1/94)



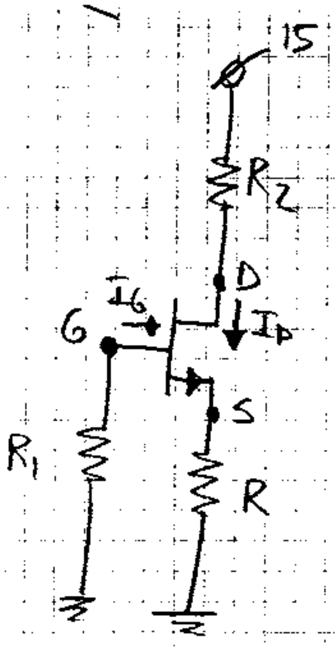
AO id.
$R_1 = 1 M\Omega$
$R_2 = 5 k\Omega$
$R_3 = 100 k\Omega$
$C_1 = 1 \mu F$
$C_2 \to \infty$

$I_{DSS} = 2 mA$
$V_P = -5V$

1. Det R tale che T in pinch-off e $I_D = 1 mA$
2. In media freq: R_{IN}, R_{OUT}, R'
3. g_m e $\frac{v_0}{v_i}$ in media freq.
4. Tipo di F.d.T e freq. di taglio

① Punto di lav. (in cont.) ⟹ - cond = circ. ap.
- Gen. di segn. è ctocto

Det: V_G, V_S, V_D, I_D



$I_G = 0$

$\boxed{V_G = I_G \cdot R_1 = 0\ V}$

IPOTESI: Pinch-off

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^2}\left(V_{GS} - V_P\right)^2$$

? V_S ?

$$V_S = 0 + I_D \cdot R = I_D R$$

Sistema: $\begin{cases} I_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^2}\left(V_{GS} - V_P\right)^2 \\ V_{GS} = V_G - V_S = 0 - I_D R = -I_D R \end{cases}$

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^2}\left(-I_D R - V_P\right)^2$$

Impongo I_D, Trovo R

$$\left(I_D R + V_P\right)^2 = V_P^2 \frac{I_D}{I_{DSS}}$$

$$I_D R + V_P = \pm\sqrt{V_P^2 \frac{I_D}{I_{DSS}}}$$ ho 2 soluz. x R:

$$R = \frac{-V_P \pm \sqrt{V_P^2 \frac{I_D}{I_{DSS}}}}{I_D}$$

$$R^+ = \frac{-V_P + \sqrt{V_P^2 \frac{I_D}{I_{DSS}}}}{I_D} = \frac{5 + \sqrt{25 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}}}{1 \cdot 10^{-3}} = 8.53 \cdot 10^3\ \Omega = 8.53\ k\Omega$$

$$R^- = \frac{-V_P - \sqrt{V_P^2 \frac{I_D}{I_{DSS}}}}{I_D} = \frac{5 - \sqrt{\quad}}{1 \cdot 10^{-3}} = 1.46\ k\Omega$$

Quale valore scelgo? Il J-FET deve essere <u>ACCESO</u>: $V_{GS} > V_P$

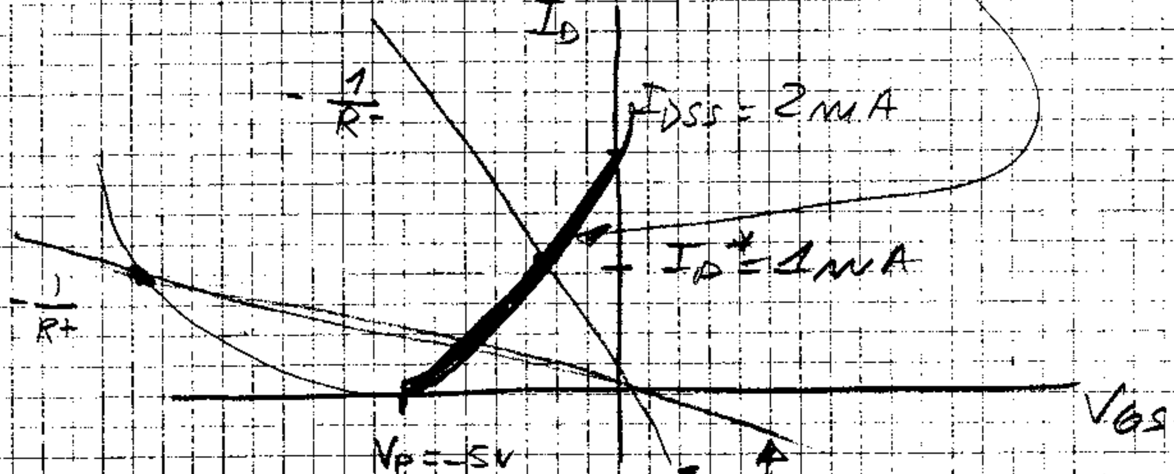
$$V_{GS} = -I_D R$$

$$V_{GS}^{+} = -I_D R^{+} = -1\cdot 10^{-3} \cdot 8.53 \cdot 10^{3} = -8.53\,V$$

$$V_{GS}^{-} = -I_D R^{-} = -1.46\,V$$

$V_P = -5V \to$ prendo $\underline{R = R^{-} = 1.46\,k\Omega}$

Motivo delle 2 soluz. x R: Eq. I_D in pinch-off è parabola - Solo 1 tratto è "fisico"



<u>VERIFICA Pinch-off</u>

? $V_{DG} > -V_P$?

$$V_D = 15 - I_D R_2 = 15 - 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{3} = +10\,V$$

$$V_{DG} = V_D - V_G = 10 - 0 = +10\,V \quad \underline{OK}$$

!! Fare massimo pto lav. !!

(2) Media freq: Tutti i C = cto c.to.
↳ dip. da FdT !!!
(HP: C → cto cto
LP: C → aperto)

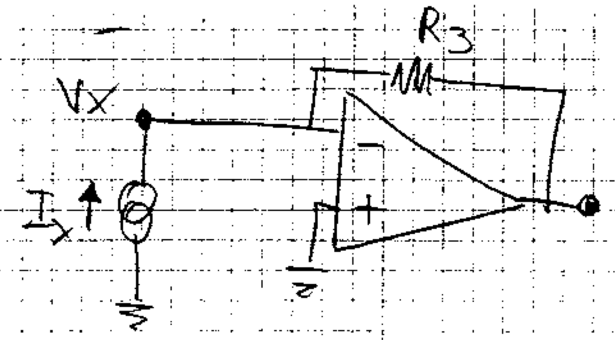
!! Significato Media freq (C → cto c.to, No parassiti)

$R_{IN} = R_1 = 1\,M\Omega$

$R_{OUT} = 0$ (A.O. id)

R' ?

$\boxed{\text{! BATTERIE = MASSA !}}$



$R' = \frac{V_x}{I_x}$

$V_x = V^- = V^+ = 0$

$R' = 0$

(3) $g_m = 2 \cdot \frac{\sqrt{I_D \cdot I_{DSS}}}{|V_P|} = 2 \cdot \frac{\sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}}{5} =$

$= 0.56 \cdot 10^{-3} \frac{A}{V} = 0.56 \frac{mA}{V}$

Calcolo il guadagno: $(C = C_{TOC} \cdot T_O)$

c'è una corr. di piccolo segnale i_d

$i_d = g_m v_{gs}$

$v_g = v_i$

$v_{gs} = v_g \cdot \frac{1}{1 + g_m R} = v_i \frac{1}{1 + g_m R}$

! i_d scorre in R_3 (poiché per il segnale il drain è a massa e in R_2 non scorre corr.)

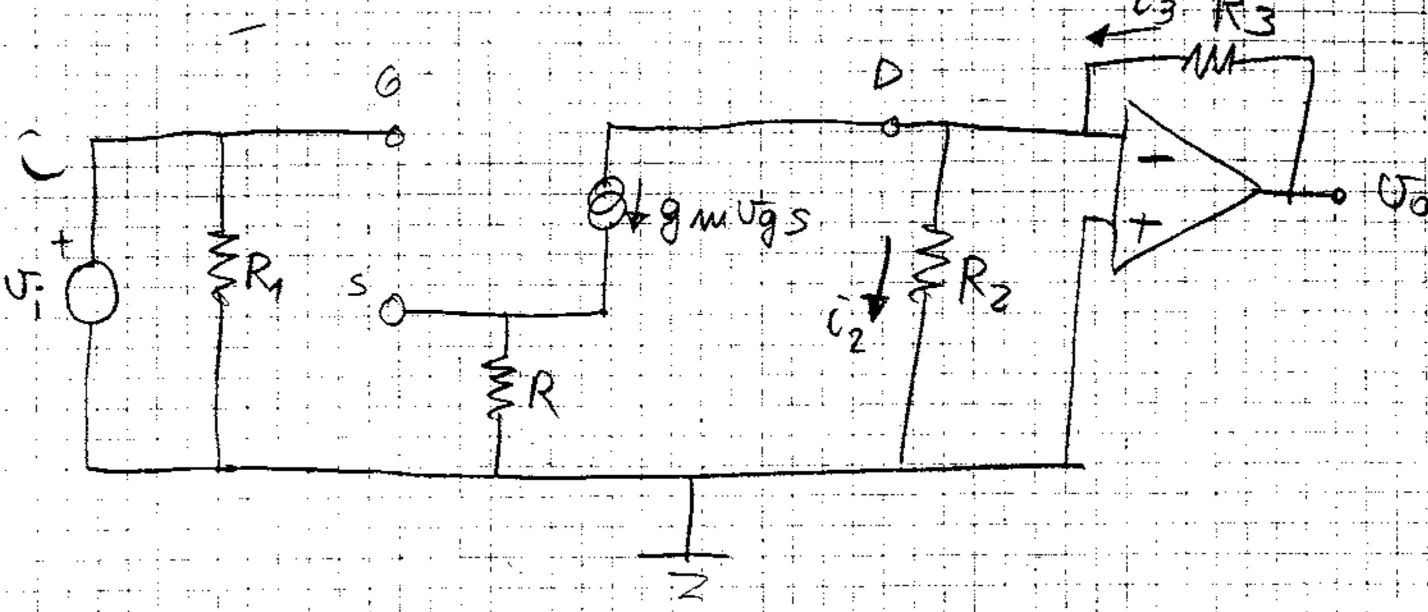
$v_o = + i_d \cdot R_3 = + g_m v_i \frac{1}{1 + g_m R} R_3$

$\frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m R_3}{1 + g_m R}$ (è simile a "senza el. a massa" ma con segno cambiato)

!! scrivo g_m in $\frac{mA}{V}$ e Res. in $k\Omega$!!

$\frac{v_o}{v_i} = \frac{0.56 \cdot 100}{1 + 0.56 \cdot 1.46} = \frac{56}{1.81} = 30.80$

con circuito equivalente:



$v_d = V^- = V^+ = 0$

$i_2 = \frac{v_D - 0}{R_2} = \frac{0-0}{R_2} = 0$

$i_3 = g_m v_{gs}$

$v_O = V^- + i_3 R_3 = + i_3 R_3$

Devo trovare $v_{gs} = v_g - v_s$

$v_G = v_i$

? v_s ? $\quad v_s = g_m v_{gs} \cdot R$

$v_s = v_g g_m R - v_s g_m R$

$v_s = v_g \frac{g_m R}{1+g_m R}$

$v_{gs} = v_g \left(1 - \frac{g_m R}{1+g_m R}\right) = v_g \frac{1}{1+g_m R}$

$v_O = i_3 R_3 = g_m v_{gs} R_3 = g_m \cdot v_i \frac{1}{1+g_m R} \cdot R_3$

$\frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m R_3}{1+g_m R}$

(4) $C_2 \to \infty$

$C_1 = 1\,nF$

F.d.T è passa alto_

Taglio: $\omega_c = \frac{1}{\tau}$

$\tau = R_1 C_1 = 10^6 \cdot 10^{-9} = 10^{-3}\,s$

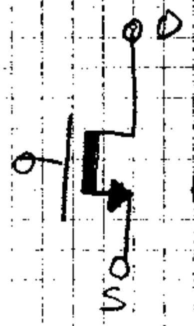
$\omega_c = 10^3\,r/s$

$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = 159\,Hz.$

$\Rightarrow$ Le "media freq" di prima sono le "alte" freq ($\gg f_c$)

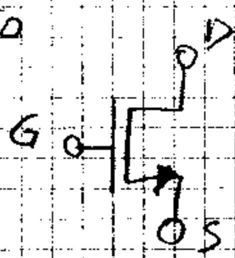
MOS-FET

- MOS-FET A SVUOTAMENTO -
  - è come J-FET, ma può jure in arricchimento ($V_{GS} > 0$ (n ch) ; $V_{SG} > 0$ (p ch))



con n (no substrato)

- MOS-FET AD ARRICCHIMENTO



con n

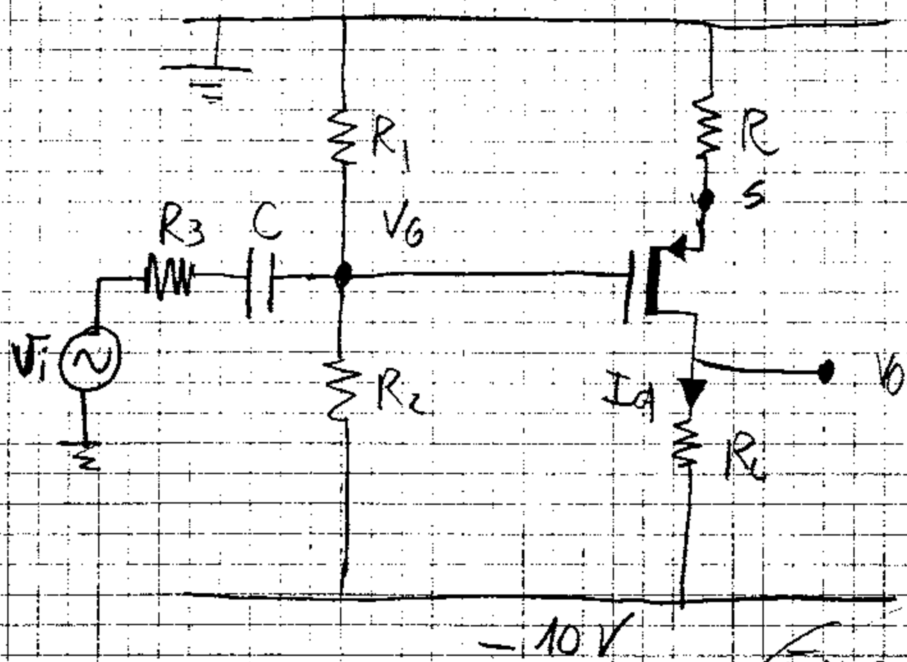
canale n ($V_t > 0$)	canale p ($V_t < 0$)
PINCH-OFF (o SATURAZIONE)	
$I_D = K(V_{GS} - V_t)^2$	$I_D = K(V_{SG} + V_t)^2$
$K = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}$ $[A/V^2]$	$K = \frac{1}{2}\mu_p C_{ox}\frac{W}{L}$
cond: $V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$ o $V_{DG} \geq -V_t$	cond: $V_{SD} \geq V_{SG} + V_t$ o $V_{GD} \geq + V_t$
e $V_{GS} > V_t$	e $V_{SG} > -V_t$

TRIODO: $I_D = K\left[2(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2\right]$

TRANSCONDUTTANZA:

$$g_m = 2K(V_{GS} - V_t) = 2\sqrt{K}\sqrt{I_d} = \sqrt{2\mu_n C_{ox}} \cdot \sqrt{\frac{W}{L}} \cdot \sqrt{I_d}$$

• ES MOS (sc. 27/9/96)



→ è MOS a SVUOTAM. (P)
Ha $V_P > 0$. Visto come ARRICCHIM. ha $V_T = V_P > 0$ (come svuotam. avrebbe $V_T < 0$)

$K = 1\,mA/V^2 \quad \underline{V_T = +2V}$

$C \to \infty \quad R_1 = 4\,M\Omega ; R_2 = 6\,M\Omega ; R_3 = 1K\Omega ;$
$R_L = 700\,\Omega$

1. Val R x saturaz. con $I_D = 4\,mA$ - Det. p.to lav.
2. In media freq $\frac{v_o}{v_i}$
3. Max val R_L x MOS in sat (con R del p.to 1)

(1) POLARIZZAZIONE

$I_G \cong 0 \Rightarrow$ V_G si trova tramite il partitore

$$\boxed{V_G = -10 + [0-(-10)] \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2}} =$$

$$= -10 + 10\frac{R_2}{R_1+R_2} = -10 + 10 \cdot \frac{6}{10} = \boxed{-4\,V}$$

!! **OSS**: corrente in Pinch-off è det. da tens. su gate (fissata da R_1, R_2) e da res. su SOURCE (R) -

IP: pinch-off

è come: $I_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^2}\left(V_{SG}+V_P\right)^2$

$$\begin{cases} I_D = K\left(V_{SG}+V_T\right)^2 \\ V_S = 0 - I_D \cdot R \end{cases}$$

$$V_S = -I_D \cdot R$$

$$I_D = K\left(V_S - V_G + V_T\right)^2$$

$$I_D = K\left(-I_D R - V_G + V_T\right)^2$$

$$+ \quad + \quad -$$

$$I_D R + V_G - V_T = \pm\sqrt{\frac{I_D}{K}}$$

$$R = \frac{-V_G + V_T \pm \sqrt{\frac{I_D}{K}}}{I_D}$$

$$R^+ = \frac{+4+2+\sqrt{\frac{4}{1}}}{4} = 2\,k\Omega$$

mA

mA/V²

[a [V]

mA (→ kΩ)

$$R^- = \frac{+4+2-\sqrt{4/1}}{4} = 1\,k\Omega$$

? Quale scelgo ? $\quad V_S^+ = -I_D R^+ = -4 \cdot 2 = -8\,V$ (mA kΩ)

$$V_S^- = -4 \cdot 1 = -4\,V$$

Deve essere: $V_{SG} \geq -V_P = -V_T = -2\,V$

$$V_{SG}^+ = V_S^+ - V_G = -8 - (-4) = -4 < -2 \text{ NO}$$

$$V_{SG}^- = V_S^- - V_G = -4 - (-4) = 0 > -2 \text{ OK}$$

scelgo $R = 1\,k\Omega$

(prendo il val + basso per R perché il disp. deve funz. con una V_S NON TROPPO NEG.)

Calcolo V_D : $V_D = -10 + I_D \cdot R_L = -10 + 4 \cdot 0.7 =$

$= -10 + 2.8 = -7.2\ V$

Verifica Pinch-off

$V_{GD} \geq V_P = V_T = 2\ V$

$V_{GD} = V_G - V_D = -4 + 7.2 = +3.2 > 2$ Ok

Occorre anche det. corr. in R_1 e R_2!!

OSS : Se devo det. una resist. (come qui) devono essere verif.le 2 cond:

- MOS acceso
- MOS in pinch-off -

(2) A occhio : $v_g = v_i \cdot \dfrac{R_1 // R_2}{R_3 + R_1 // R_2}$

conf. senza el. a massa: $\dfrac{v_o}{v_g} = - \dfrac{g_m R_{DRAIN}}{1 + g_m R_{SOURCE}} = - \dfrac{g_m R_L}{1 + g_m R}$

$$\frac{v_o}{v_i} = - \frac{R_1 // R_2}{R_3 + R_1 // R_2} \cdot \frac{g_m R_L}{1 + g_m R}$$

$g_m = 2K (V_{SG} + V_T) = 2\sqrt{K}\sqrt{I_D} = 2 \cdot \sqrt{1} \cdot \sqrt{4}$

$= 4\ mA/V$

$R_1 // R_2 = \dfrac{4 \cdot 6}{4+6} = 2.4\ M\Omega$

$$\frac{v_o}{v_i} \simeq - \frac{4 \cdot 0.7}{1 + 4 \cdot 1} = - \frac{2.8}{5} = -5.6$$

③ MOS esce da saturaz (entra in triodo) quando: 53

$V_G - V_D < V_P = V_T$

Se R_L è grande, V_D sale e V_{GD} diminuisce

$V_D = -10 + I_D \cdot R_L$

$V_G + 10 - I_D R_L = V_T$

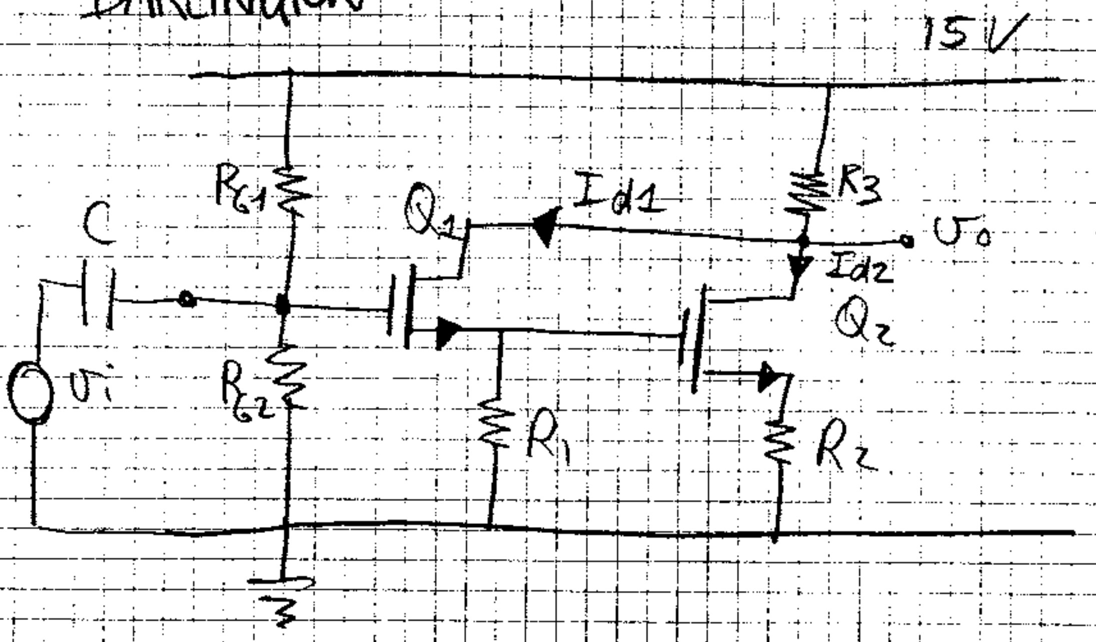
$$R_L = \frac{V_G + 10 - V_T}{I_D} = \frac{-4 + 10 - 2}{4} = 1\,k\Omega$$

val. max x RL

OSS: In genere res. troppo grandi sul drain fanno entrare in triodo. (⇒ non si può avere un guad troppo alto)

● ES MOS (SC. 8/2/93)

DARLINGTON



$K = 1\, mA/V^2 \quad V_t = +3\,V$

$R_1 = 1\,K\Omega \;;\; R_2 = 100\,\Omega \;;\; R_3 = 1\,K\Omega$

(1) con $R_{G1} = 100\,K\Omega$, $R_{G2} = 200\,K\Omega$, det p.to di lav. e gm dei MOS

(2) Rifo punto (1) con $R_{G1} = 200\,K\Omega$; $R_{G2} = 100\,K\Omega$

(3) Caso (1): det. in media freq: R_{IN}, R_{OUT}, $\frac{v_o}{v_i}$

(1) Ipotesi: MOS in saturaz. (è + semplice)

$$V_{G1} = 15 \cdot \frac{R_{G2}}{R_{G1}+R_{G2}} = 15\,\frac{200}{100+200} = +10\,V$$

$$\begin{cases} I_{D1} = K\,(V_{GS1} - V_t)^2 \\ V_{S1} = I_{D1} \cdot R_1 \end{cases}$$

$$I_{D1} = K\,(V_{G1} - V_{S1} - V_t)^2$$

$$I_{D1} = K\,(V_{G1} - I_{D1}R_1 - V_t)^2$$

$$I_{D1} = K R_1^2 I_{D1}^2 + K(V_{G1} - V_t)^2 - 2KR_1(V_{G1} - V_t) I_{D1}$$

$$K R_1^2 I_{D1}^2 - \left[1 + 2 K R_1 (V_{G1} - V_t)\right] I_{D1} + K (V_{G1} - V_t)^2 = 0$$ 54

$$I_{D1} = \frac{1 + 2KR_1(V_{G1} - V_t) \pm \sqrt{[\quad]^2 - 4}}{}$$

dopo verifica dimensionale, inserisco val. numerici.

$$I_{D1}^2 - 15 I_{D1} + 49 = 0$$

$$I_{D1} = \frac{15 \pm \sqrt{15^2 - 4 \cdot 49}}{2} = \begin{cases} 10.19\ mA & (a) \\ 4.80\ mA & (b) \end{cases}$$

Per l'accensione di Q_1: $V_{GS1} > V_t$

(a) $V_{S1} = 10.19\ V$ $\quad V_{GS1} = 10 - 10.19 = -0.19\ V < 3$ NO

(b) $V_{S2} = 4.8\ V$ $\quad V_{GS1} = 10 - 4.8 = 5.2\ V > 3\ V$ OK

? V_{D1} ? lo calcolo dopo

$V_{G2} = V_{S1} = 4.8\ V$

$$\begin{cases} I_{D2} = K (V_{GS2} - V_t)^2 \\ V_{S2} = I_{D2} R_2 \end{cases}$$

Ottengo equaz. come prima:

$$K R_2^2 I_{D2}^2 - \left[1 + 2KR_2(V_{G2} - V_t)\right] I_{D2} + K(V_{G1} - V_t)^2 = 0$$

$$10^{-2} I_{D2}^2 - 1.36 I_{D2} + 3.24 = 0$$

$$I_{D2} = \frac{1.36 \pm \sqrt{1.36^2 - \cancel{0.04} \cdot 3.24}}{0.02} = \begin{cases} 133.6\ mA & (a) \\ 2.42\ mA & (b) \end{cases}$$

? accensione di Q_2 ?

(a) Troppo grande (si spegne)

(b) $V_{GS2} > V_t$?

$V_{S2} = 0.24\ V \quad V_{GS2} = 4.8 - 0.24 = 4.56 > 3$

Ok

? Verifica Pinch-off per Q_1, Q_i ?

$$V_{D1} = V_{D2} = 15 - (I_{D1} + I_{D2}) \cdot R_3 =$$
$$= 15 - (4.8 + 2.92) \cdot 1 =$$
$$= 15 - 7.22 = +7.77\ V$$

? $V_{DG} \geq -V_t$?

$V_{DG1} = 7.77 - 10 = -2.23 > -3$ OK Q_1

$V_{DG2} = 7.77 - 4.8 = 2.97 > -3$ OK Q_2

Completato p.to lav.

Calcolo g_m

$$g_{m1} = 2K(V_{GS1} - V_t) = 2 \cdot (10 - 4.8 - 3) =$$
$$= 2 \cdot 2.2 = 4.4\ mA/V$$

$$g_{m2} = 2K(V_{GS2} - V_t) = 2 \cdot (4.8 - 0.24 - 3) =$$
$$= 2 \cdot 1.56 = 3.12\ mA/V$$

(2) Faccio stesse ip.

$$V_{G1} = 15 \cdot \frac{1}{3} = +5\ V$$

!! Noto che: $V_{G1} > V_{GS1} + V_{GS2}$

Poiché $V_{G1} = 5\ V < 2V_t$, i due MOS non possono essere entrambi accesi

(ci vorrebbe $V_{GS1} > V_t$; $V_{GS2} > V_t$)

IP: Q_1 acceso in Pinch-off

$$\begin{cases} I_{D1} = k\,(V_{G1} - V_{S1} - V_t)^2 \\ V_{S1} = I_{D1} R_1 \end{cases}$$

Ottengo stessa eq. di prima, ma con:

$$I_{D1}^2 - 5 I_{D1} + 4 = 0$$

$$I_{D1} = \frac{5 \pm \sqrt{25-16}}{2} = \frac{5 \pm 3}{2} = \begin{cases} 4\ mA & (a) \\ 1\ mA & (b) \end{cases}$$

(a) $V_{S1} = +4\ V$ $\quad V_{GS1} = 1\ V < V_t$ <u>NO</u>

(b) $V_{S1} = +1\ V$ $\quad V_{GS1} = 4\ V > V_t$ <u>ok</u>

Q_2: $V_{G2} = V_{S1} = +1\ V$

! V_{S2} ha un pot. compreso tra 0 V e 15 V

$\Rightarrow$ Q_2 spento perché non posso avere $V_{GS2} > V_t = 3V$

$\Rightarrow I_{D2} = 0 \longrightarrow V_{S2} = 0\ V$

? verifica pinch-off ?

$V_{D1} = 15 - I_{D1} \cdot R_3 = 15 - 1 = +14\ V$

$V_{DG1} = 14 - 5 = 9\ V > -V_t = -3\ V$ <u>ok</u>

<u>calcolo g_m</u>

$g_{m1} = 2k\,(V_{GS1} - V_t) = 2 \cdot (4-3) = 2\ mA/V$

g_{m2} non è definito (vale solo se disp. è in Pinch-off)

$\rightarrow$ <u>il MOS spento o in triodo NON è un gen. di corrente</u>

(3) caso (1), calcolo R_{IN}, R_{OUT}, $\frac{v_0}{v_i}$ in media freq.

$$- R_{IN} = R_{G1} // R_{G2} = \frac{100 \cdot 200}{100 + 200} = \frac{20000}{300} = 66\,K\Omega$$

$$- R_{OUT} = R_3 = 1\,K\Omega$$

Trascuro r_o

- guadagno: 2 correnti di segnale forzate su R_3 - uso sovrapp. eff.

$$Q_1 : v_{o1} = v_i \cdot \left(- \frac{g_{m1} R_3}{1 + g_{m1} R_1} \right)$$ è stadio senza el a massa.

$$Q_2 : v_{o2} = v_{g2} \cdot \left(- \frac{g_{m2} R_3}{1 + g_{m2} R_2} \right) =$$

$$= v_i \cdot \frac{g_{m1} R_1}{1 + g_{m1} R_1} \cdot \left(- \frac{g_{m2} R_3}{1 + g_{m2} R_2} \right)$$

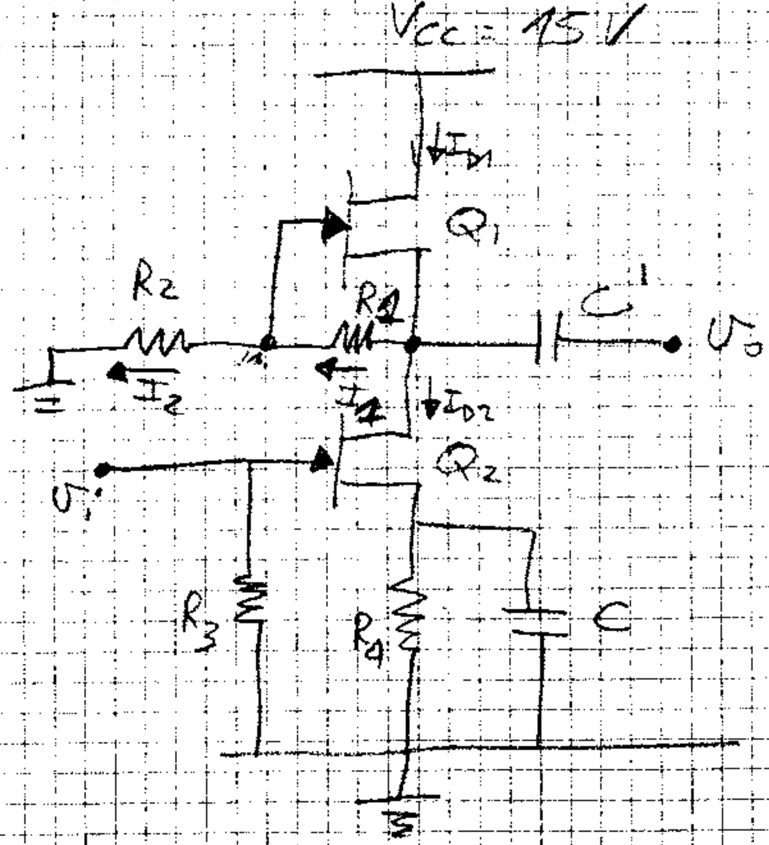
$$\text{TOT}: \frac{v_0}{v_i} = - \left[\frac{g_{m1} R_3}{1 + g_{m1} R_1} + \frac{g_{m1} R_1}{1 + g_{m1} R_1} \cdot \frac{g_{m2} R_3}{1 + g_{m2} R_2} \right] =$$

$$= - \frac{g_{m1} R_3}{1 + g_{m1} R_1} \left[1 + \frac{g_{m2} R_1}{1 + g_{m2} R_2} \right] =$$

$$= - \frac{4.4 \cdot 1}{1 + 4.4 \cdot 1} \left[1 + \frac{3.12 \cdot 1}{1 + 3.12 \cdot 0.1} \right] =$$

$$= - \frac{4.4}{5.4} \left[1 + \frac{3.12}{1.31} \right] = - 2.75$$

• ES (SC. 25/10/96) 66



$R_1 = 10\ M\Omega$
$R_2 = 15\ M\Omega$
$R_3 = 1\ M\Omega$
$R_4 = 2.5k$

SN
$C, C' \to \infty$

$I_{DSS} = 4\ mA$
$V_P = -5V$

① Punto di lav. (ragionevol. approx)
② $\frac{v_o}{v_i}$ in media freq (" ")

① $v_{G2} = 0\ V$

calcolo I_{D2} (IP: FET in Pinch-off)

$$I_{D2} = \frac{I_{DSS}}{V_P^2}(V_{GS} - V_P)^2$$

$$V_{GS} = 0 - V_S = -I_{D2}R_4$$

$$I_{D2} = \frac{I_{DSS}}{V_P^2}(0 - I_D R_4 - V_P)^2$$

$$\frac{25}{4} I_{D2} = (-2.5\, I_{D2} + 5)^2$$

$$6.25\, I_{D2}^2 - 31.25\, I_{D2} + 25 = 0$$

$$I_{D2} = \frac{31.25 \pm \sqrt{\ldots}^{\,18.75}}{12.5} \quad \begin{cases} 4\ mA & a) \\ \underline{1\ mA} & b) \end{cases}$$

condiz. di accensione:

$V_{GS} > V_P = -5V$

a) $V_{GS} = -4 \cdot 2.5 = -10V < -5V$ NO

b) $V_{GS} = -1 \cdot 2.5 = -2.5 > -5V$ <u>Ok</u>

<u>Ipotesi</u> <u>$I_{D1} \simeq I_{D2} = 1\,mA$</u>

sensata perché $I_1 = I_2$ è piccolo risp. a I_{D2} - ~~è ... $R_2 \gg R_3$ quindi $V_{G1} \simeq V_{S1} \Rightarrow V_{GS1} = 0$~~

~~Verifica:~~

Verifica (calcolo)

Ricavo: $V_{GS1} = V_{GS2} = -2.5\,V$

(stessa $I_D \leftrightarrow$ stessa V_{GS})

$I_1 = \frac{V_{SG1}}{R_1} = \frac{2.5}{10^4} = 0.25\,\mu A \ll I_D$ Ok

⇓

Calcolo V_{G1}

$V_{G1} = I_2 \cdot R_2 = I_1 R_2 = 0.25 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot 10^6 = 3.75\,V$

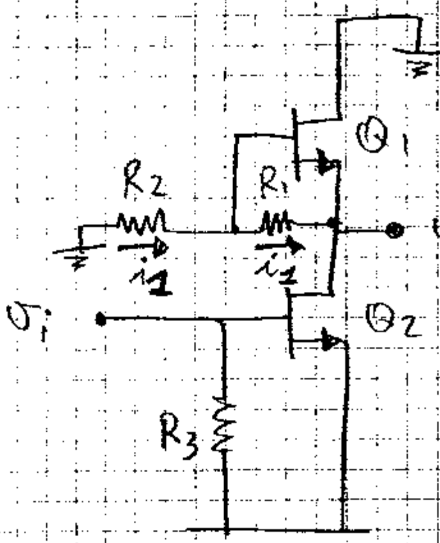
$V_{S1} = V_{D2} = V_{G1} - V_{GS1} = 3.75 + 2.5 = +6.25\,V$

Verifica Pinch-off: $V_{DG} \geq -V_P = +5V$

Q_2: $V_{DG2} = 6.25 - 0 = 6.25\,V > 5V$ Ok

Q_1: $V_{DG1} = 15 - 3.75 = 11.25\,V > 5V$ Ok

② $\frac{v_o}{v_i}$



- Soluzione approx: i due FET ~~hanno~~ sono uguali e hanno ≃ stessa I_d

Pertanto: anche $i_{d1} \simeq i_{d2}$ (Approx vale se $i_1 \ll i_{d1}$!!)

$\Downarrow$

$$v_{gs1} = v_{gs2} = v_i$$

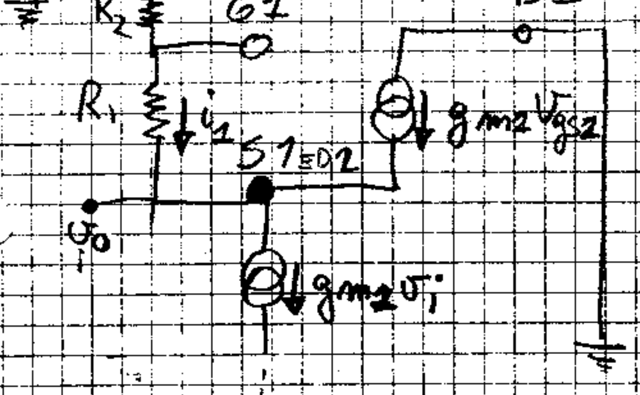
$$i_1 = \frac{v_{gs1}}{R_1} = \frac{v_i}{R_1}$$

$$v_o = -i_1 \cdot (R_1 + R_2) = -v_i \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = - \frac{R_1 + R_2}{R_1} = -\frac{25}{10} = -2.5$$

segno "−" è OK (è come common source + carico attivo)

- Con circuito equivalente:



VERIFICA:

$g_m v_i \gg \frac{v_i}{R_1} \rightarrow g_m R_1 \gg 1$ OK

$v_o = -i_1 (R_1 + R_2)$

$$\begin{cases} i_1 + g_{m2} v_{gs2} = g_{m1} v_i \\ i_1 = \dfrac{v_{gs2}}{R_1} \end{cases}$$

$$\frac{v_{gs2}}{R_1} + g_{m2} v_{gs2} = g_{m1} v_i$$

$$v_{gs2} \left(\frac{1}{R_1} + g_{m2} \right) = g_{m1} v_i$$

$$v_{gs2} = \frac{g_m}{\frac{1}{R_1} + g_m} v_i$$

$$v_{gs2} = \frac{g_m R_1}{1 + g_m R_1} v_i$$

$$v_o = -i_1 (R_1 + R_2) = -v_{gs2} \frac{R_1 + R_2}{R_1} =$$

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m R_1}{1 + g_m R_1} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$g_m = \frac{2}{|V_P|} \sqrt{I_D I_{DSS}} = \frac{2}{5} \sqrt{1 \cdot 4} = \frac{4}{5} = 0.8 \text{ mA/V}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = -\underbrace{\frac{0.8 \cdot 10^4}{1 + 0.8 \cdot 10^4}}_{\simeq 1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \simeq -\frac{R_1 + R_2}{R_1} = -2.5$$