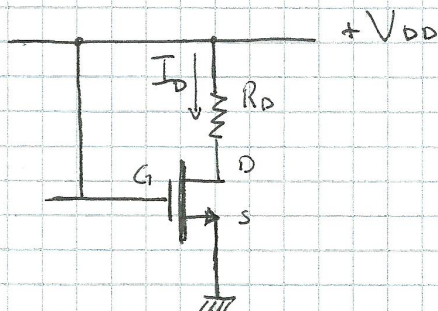


## LEZIONE 12

### ESERCIZIO

POLARIZZARE IL MOS ENHANCEMENT NELLA SEGUENTE CONFIGURAZIONE:



SIA:

$$V_t = 1V \quad ; \quad V_{DD} = +5V$$

$$K = 0,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

POICHÉ IL GATE È CONNESSO ALL'ALIMENTAZIONE SI HA:

$$V_{GS} = +5V$$

SUPPONIAMO DI VOLER USARE IL DISPOSITIVO COME RESISTENZA, BISOGNA METTERSI IN REGIONE DI TRIODO:

$$V_{DS} < V_{GS} - V_t = 4V$$

A TALE SCOPO IMPONIAMO, PER DINAMICA, CHE SIA:

$$V_{DS} = 0,1V$$

CALCOLIAMO LA CORRENTE DI DRAIN:

$$I_D = K [2(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2] = 0,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} [2(5V - 1V)0,1V - 0,01] =$$

$$= 0,39 \text{ mA}$$

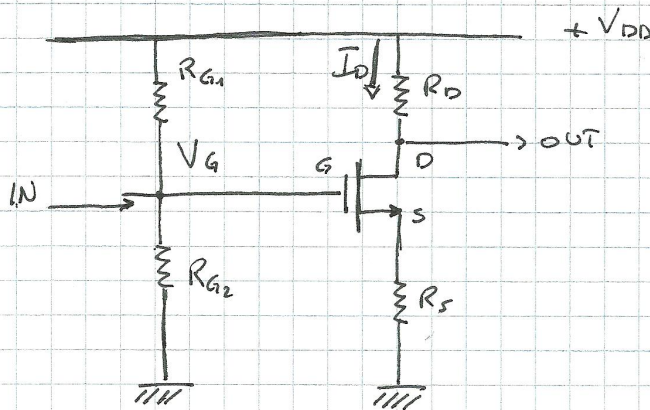
RIEVO LA RESISTENZA DI DRAIN:

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{5V - 0,1V}{0,39 \text{ mA}} = 12,5 \text{ k}\Omega$$



## ESERCIZIO

POLARIZZARE IL MOS ENHANCEMENT NELLA SEGUENTE CONFIGURAZIONE:



OSSERVIAMO CHE IL GATE VA POSTO A TENSIONE POSITIVA ESSENDO IL DISPOSITIVO UN N-MOS ENHANCEMENT.

SIA:

$$V_t = 1V \quad ; \quad V_{DD} = +10V$$

$$K = 0,5 \frac{mA}{V^2}$$

SUPPONIAMO DI VOLERE CHE IL MOS FUNZIONI IN REGIME DI SATURAZIONE, PERTANTO DOBBIAMO IMPORRE LA CONDIZIONE:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t$$

SUPPONIAMO INOLTRE CHE IL PARTITORE  $R_{G1} - R_{G2}$  DIA AL GATE UNA TENSIONE CHE È LA METÀ DELLA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE:

$$V_G = 5V$$

È PERFETTAMENTE RAGIONEVOLG A QUESTO PUNTO IMPORRE:

$$V_S = 3V$$

E, PER DINAMICO, DARE UNA TENSIONE AL DRAIN DI:

$$V_D = 5V$$



STANDO COSÌ LE COSE SI HA:

$$V_{GS} = V_G - V_S = 5V - 3V = 2V$$

CHE È SUFFICIENTE PER FARE IL DISPOSITIVO SIA ACCESO:

$$V_{GS} > V_t$$

E, INOLTRE:

$$V_{DS} = V_D - V_S = 5V - 3V = 2V$$

RISPETTO LA CONDIZIONE PER IL FUNZIONAMENTO IN SATURAZIONE:

$$V_{DS} > (V_{GS} - V_t) = 1V$$

SCEGLIAMO VALORI DI RESISTENZA UGUALI PER IL PARTITORE:

$$R_{G1} = R_{G2} = 10 \text{ M}\Omega$$

E IL DISPOSITIVO È POLARIZZATO CORRETTAMENTE.

CALCOLIAMO LA TRANS CONDUZIONE

$$g_m = 2 \sqrt{I_D \cdot k} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}$$

IMPONIAMO UNA CORRENTE:

$$I_D = 0,5 \text{ mA}$$

QUINDI:

$$g_m = 2 \sqrt{0,5 \text{ mA} \cdot \frac{0,5 \text{ mA}}{V^2}} = 1 \frac{\text{mA}}{V} = 1 \text{ mS}$$

PER CALCOLARE IL GUADAGNO PER UN CERTO SEGNALE IN

IN GROSSO  $V_{in}$  CONVIENE ESPRIMERE LA TENSIONE  $V_{GS}$  IN QUESTA FORMA:

$$V_{GS} = V_{in} - I_D R_s$$



IN TERMINI DELLA TRANSCONDUZIONE, LA CORRENTE  $I_D$  SI SCRIVE COME

$$I_D = g_m V_{GS}$$

QUINDI:

$$V_{GS} = V_{IN} - g_m V_{GS} \cdot R_S$$

RICAVIAMO  $V_{GS}$ :

$$V_{GS} = \frac{V_{IN}}{1 + g_m \cdot R_S}$$

LA TENSIONE DI USCITA È DATA DA:

$$V_{OUT} = I_D R_D = g_m V_{GS} \cdot R_D$$

SOSTITUENDO L'ESPRESSIONE DI  $V_{GS}$  NELLA FORMULA DI  $V_{OUT}$  OBTENIAMO UNA RELAZIONE TRA  $V_{IN}$  E  $V_{OUT}$  CHE È PROPRIO IL GUADAGNO DELLA MAGLIA:

$$V_{OUT} = g_m \cdot \left( \frac{V_{IN}}{1 + g_m \cdot R_S} \right) R_D$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = G = \frac{g_m R_D}{1 + g_m \cdot R_S}$$

SE LE TRANSCONDUENZE SONO SUFFICIENTEMENTE ELEVATE POSSIAMO TRASCURARE 1 E APPROSSIMARE IL GUADAGNO COME

$$G = \frac{R_D}{R_S}$$

POIENA È:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{5V}{0,5mA} = 10k\Omega$$

$$R_S = \frac{V_S}{I_D} = \frac{3V}{0,5mA} = 2k\Omega$$

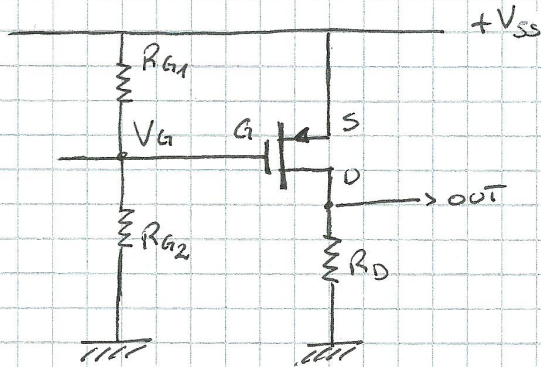


IL GUADDO GMD VALE:

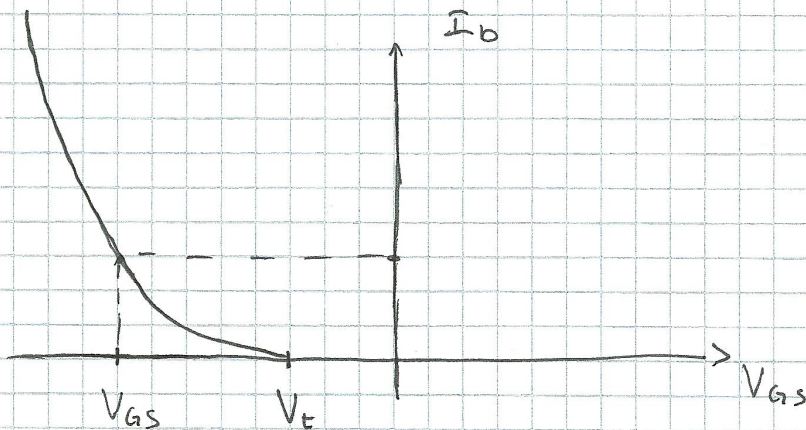
$$G = \frac{10 \text{ k}\Omega}{8 \text{ k}\Omega} \approx 2$$

## ESERCIZIO

POLARIZZARE IL SEGUENTE P-MOS ENHANCEMENT:



RICORDANDO LE CARATTERISTICHE DEL P-MOS SI HA:



SICCOME  $V_t$  È NEGATIVO PER QUESTA FAMIGLIA DI MOS, AFFINCHÉ IL DISPOSITIVO SIA ACCESSO È NECESSARIO SCEGLIERE UNA  $V_{GS}$  NEGATIVA E MAGGIORE, IN MODULO, DI  $V_t$

SIA:

$$I_D = 0,5 \text{ mA} \quad ; \quad V_{GS} = +5 \text{ V}$$

$$V_t = -1 \text{ V}$$

$$k = 0,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

DALL'EQUAZIONE DI  $I_D$  RISPETTO  $V_{GS}$ :

$$I_D = k (V_{GS} - V_t)^2$$



$$0,5 \text{ mA} = 0,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} [V_{GS} - (-1\text{V})]^2$$

DOVRAN' ESSERE ALLORA:

$$V_{GS} = -2\text{V}$$

QUINDI:

$$V_G - V_S = -2\text{V};$$

$$V_G = -2\text{V} + V_S = -2\text{V} + 5\text{V} = 3\text{V}$$

IMPONGO I VALORI DI RESISTENZE NEL PARTITORE  $R_{G1} - R_{G2}$   
PER AVERE UNA TENSIONE DI GATE DI 3V:

$$V_{SS} \cdot \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}} = 3\text{V}$$

$$5\text{V} \cdot \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}} = 3\text{V}$$

$$R_{G1} \approx 2 \text{ M}\Omega$$

$$R_{G2} \approx 1 \text{ M}\Omega$$

SCEGLIAMO LA  $V_{DS}$  TENENDO CONTO DELLA CONDIZIONE:

$$|V_{DS}| > |(V_{GS} - V_t)| = |(-1\text{V})|$$

È RAGIONEVOLE CHE SIA  $V_{DS} = -2\text{V}$  IN MODO DA AVERE:

$$V_D - V_S = V_D - 5\text{V} = -2\text{V}$$

QUINDI:

$$V_D = 3\text{V}$$

CALCOLIAMO LA RESISTENZA DI DRAIN PER OTTENERE IL GUADAGNO

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{3\text{V}}{0,5\text{mA}} = 6\text{K}\Omega$$



NON ESSENDOVI  $R_S$  IL GUADAGNO È INFO DA:

$$g = \frac{R_D}{1/g_m}$$

POLARE:

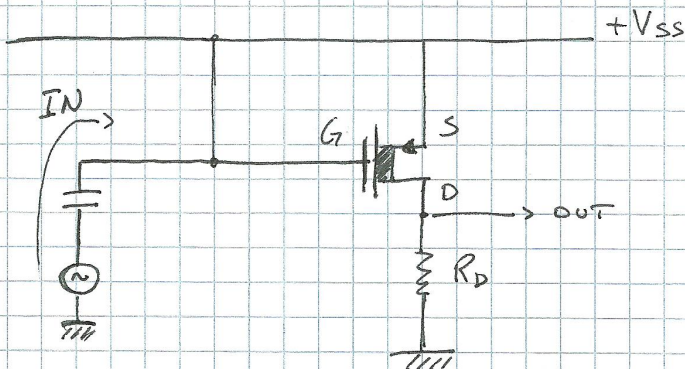
$$g_m = 2 \sqrt{I_D \cdot \mu} = 2 \sqrt{0,5 \text{ mA} \cdot 0,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}} = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

SI HA:

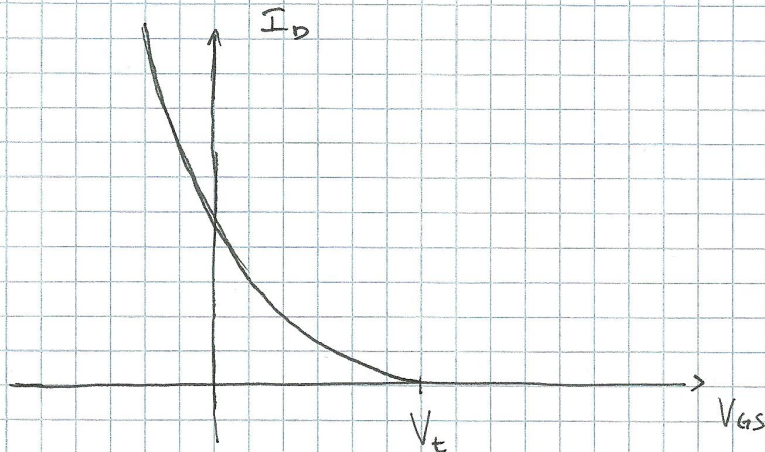
$$g = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \cdot 6 \frac{\text{V}}{\text{mA}} = 6$$

## ESERCIZIO

POLARIZZARE IL SEGUENTE P-MOS DEPLETION



RICORDIAMO LA TRANSCARATTERISTICA DEL P-MOS DEPLETION:



AFFINCHÉ IL DISPOSITIVO SIA ACCESO BISOGNA IMPORRE:



$$V_{GS} < V_t$$

IMPONENDO CHE SIA:

$$V_t = 1V$$

$$K = 0,5 \frac{mA}{V^2}$$

$$V_{GS} = 0V$$

CALCOLO LA  $I_D$  IN QUESTI PARAMETRI:

$$I_D = K (V_{GS} - V_t)^2 = 0,5 \frac{mA}{V^2} (0V - 1V)^2 = 0,5 mA$$

SCELGO UNA  $V_{DS}$  CHE RISPETTI LA SECONDA CONDIZIONE:

$$|V_{DS}| > |(V_{GS} - V_t)| = |(-1V)|$$

QUINDI SCELGO:

$$V_{DS} = -2V$$

IN TAL MODO AVRO':

$$V_D - V_S = V_D - 5V = -2V$$

QUINDI:

$$V_D = 3V$$

CALCOLO LA RESISTENZA DI DRAIN

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = 6k\Omega$$

IL GUADAGNO E' DATO DA:

$$G = g_m \cdot R_D$$

$$8.12 \text{ CON: } g_m = 2 \sqrt{I_D \cdot K} = 1 \text{ mS}$$

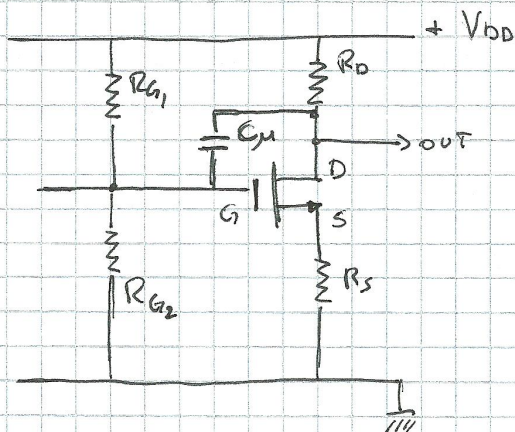


AVINB1 :

$$g = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \cdot 6 \frac{\text{V}}{\text{mA}} = 6$$

ABBINMO VISTO NEGLI ESERCIZI PRECEDENTI CHE LE 3 CONFIGURAZIONI IN CUI PUO' ESSERE POSTO UN BJT SONO APPLICABILI ANCHE AI MOS IN MANIERA PRESSOCHE' ANALOGA.

LA CONFIGURAZIONE USATA NEGLI ESERCIZI PRECEDENTI, AD ESEMPIO, E' QUELLA A SOURCE COMUNE CHE, ANALOGAMENTE A QUANDO NASCE NEGLI EMISSIONE COMUNE, PRESENTA IL PROBLEMA DELLE CAPACITA' PARASSITE CON CONSEGUENTE TAGLIO NELLA BANDA PASSANTE

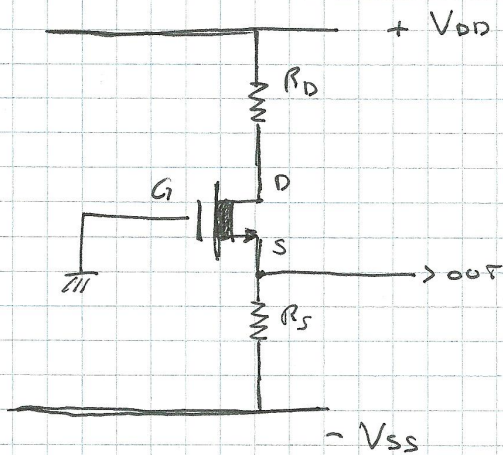


PER GIUNGERE A UN BUON COMPROMESSO TRA GUADAGNO E BANDA PASSANTE, ANCHE NEI MOS SI RICORRE ALLA CONFIGURAZIONE A GATE COMUNE (ANALOGO DEL BASE COMUNE NEI BJT)

## ESERCIZIO

POLARIZZARE IL SEGUENTE MOS IN CONFIGURAZIONE CG, UTILIZZANDO UN DISPOSITIVO N-MOS DEPLETION





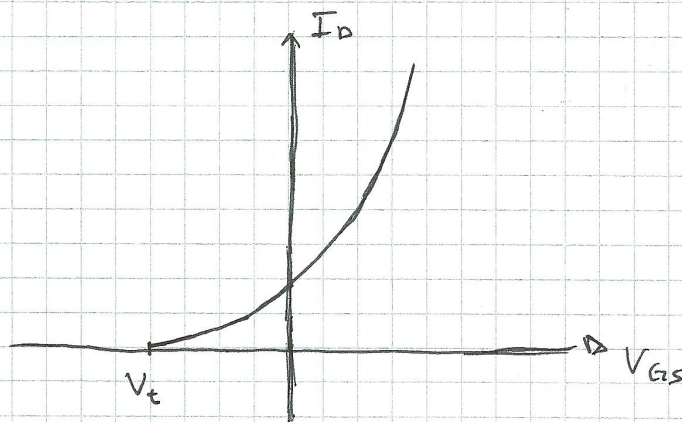
IMPONGO CHE SIA :

$$I_D = 4 \text{ mA} ; V_{DD} = +5 \text{ V} ; V_{SS} = -5 \text{ V}$$

$$V_t = -4 \text{ V}$$

$$K = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

RICORDANDO LA TRASCARATTERISTICA DEL N-MOS DEPLETION



DOVRA' ESSERE :

$$|V_{GS}| < |V_t|$$

AFFINCHÉ IL DISPOSITIVO SIA ACCESSO. QUINDI SCELGO :

$$V_{GS} = -2 \text{ V}$$

VERIFICO CHE LA CORRENTE DI DRAIN, CON QUESTI PARAMETRI DEL DISPOSITIVO È

10-12 QUESTA  $V_{GS}$ , VALGA PROPRIO 4 mA



$$I_D = k (V_{GS} - V_t)^2 = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \left( -2\text{V} - (-4\text{V}) \right)^2 = 4 \text{mA}$$

IMPONGO  $V_{DS}$  RICORDANDO LA CONDIZIONE:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t = [-2 - (-4)] \text{V} = 2\text{V}$$

QUINDI SCELGO

$$V_{DS} = 4\text{V}$$

PER CUI:

$$V_D - V_S = 4\text{V}$$

IMPLICA:

$$V_D = 2\text{V}$$

$$V_S = -2\text{V}$$

POSSO CALCOLARE LE RESISTENZE  $R_D$ ,  $R_S$

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{3\text{V}}{4\text{mA}} = 750\text{k}\Omega$$

$$R_S = \frac{V_S - V_{SS}}{I_D} = \frac{3\text{V}}{4\text{mA}} = 750\text{k}\Omega$$

METENDO L'USCITA SUL SOURCE, PER CALCOLARE IL GUADAGNO MI OCCORRE L'IMPEDENZA DI USCITA VISTA DAL SEGNALE:

$$Z_{out} = \frac{1}{g_m} \parallel R_S \approx \frac{1}{g_m}$$

QUINDI:

$$g = \frac{R_D}{\frac{1}{g_m}} = \frac{R_D}{Z_{out}}$$



VEDIAMO IN CHE MODO I PARAMETRI COSTRUTTIVI DEL MOS  
NE INFLUENZANO IL GUADAGNO:

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = 2K(V_{GS} - V_t);$$

$$\begin{aligned} g_m &= 2 \left[ \frac{1}{2} \mu C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) \right] (V_{GS} - V_t) = \mu C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) \sqrt{\frac{I_D}{K}} = \\ &= \mu C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) \sqrt{\frac{I_D}{\frac{1}{2} \mu C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right)}} = \\ &= \sqrt{2 \mu C_{ox}} \sqrt{\frac{W}{L}} \sqrt{I_D} \end{aligned}$$

LA TRANS CONDUCTANZA È IL PRODOTTO 3 TERMINI, DUE DEI QUALI  
CONTENGONO I PARAMETRI COSTRUTTIVI E UNO È LA RADICE DELLA CORRENTE  
DI DRAIN. SEPPURE  $g_m$  È SEMPRE UN NUMERO PICCOLO E QUINDI  
I GUADAGNI NON SONO MAI ELEVATI NEI MOS, PRESENTA IL VANTAGGIO  
DI ESSERE MOLTO STABILE PERCHÉ VA COME LA RADICE DI  $I_D$ .  
QUESTO IMPLICA CHE LE FLUTTAZIONI DI  $I_D$  SONO TRASCURABILI  
NEL COMPUTO DEL GUADAGNO DI UN CIRCUITO A MOS.

INOLTRE, VOLENDO AUMENTARLO, È SUFFICIENTE MODIFICARE  
I PARAMETRI COSTRUTTIVI  $W$  E  $L$ .

TUTAVIA IL RAPPORTO  $\frac{W}{L}$  È SEMPRE RADICE QUINDI, ANCHE  
IN QUESTO CASO, LA DIPENDENZA È TRASCURABILE E PER  
AVERE DELLE DIFFERENZE APPREZZABILI BISOGNA CESSARE  
QUESTO RAPPORTO.

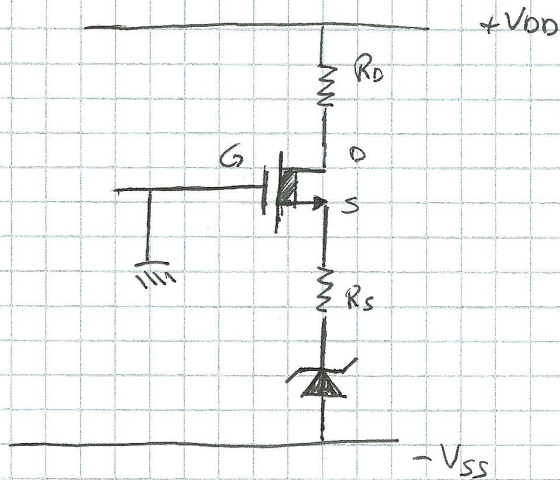
ILLO IL MAGGIORE DIFETTO DEI MOS: A FRONTE DI UNA  
GRANDE STABILITÀ SIA IN GUADAGNO CHE IN TEMPERATURA  
E DI UNA ELEVATISSIMA IMPEDENZA DI INGRESSO (PER VIA  
DELL'ISOLAMENTO DEL GATE) QUESTI DISPOSITIVI PRESENTANO  
L'INCONVENIENTE DI AMPLIFICARE MOLTO POCO I SEGNALE.

12.12 BISOGNA TROVARE DEGLI ESPEDIENTI PER INCREMENTARNE IL  
GUADAGNO.

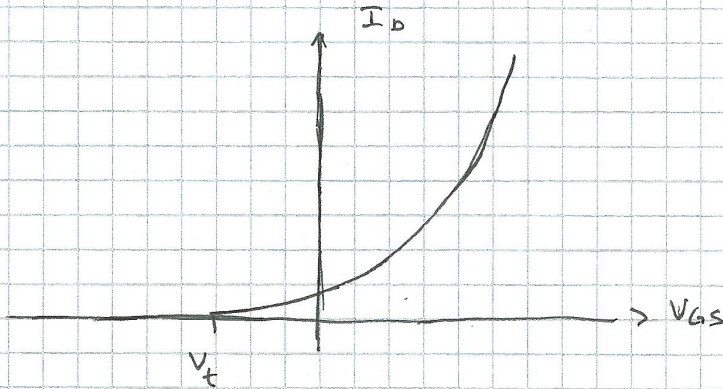


# ESERCIZIO

POLARIZZARE IL SEGUENTE N-MOS DEPLETION



DALLA TRASCARATTERISTICA DELL N-MOS DEPLETION



SI EVINCE CHE, AFFINCHÉ IL DISPOSITIVO SIA ACCESO DEVE ESSERE :

$$|V_{GS}| < |V_t|$$

SIA :

$$K = 0,2 \frac{mA}{V^2}$$

$$V_{DD} = +20V ; V_{SS} = -20V$$

$$V_t = -3V$$

SEELGO :

$$V_{GS} = -0,6V$$

CALCOLO LA CORRENTE DI DRAIN:



$$I_D = K (V_{GS} - V_t)^2 = 0,2 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} [0,6 \text{ V} - (-3 \text{ V})]^2 = 1,2 \text{ mA}$$

SEGLIAMO  $V_{DS}$  TENENDO CONTO DELLA CONDIZIONE

$$V_{DS} > V_{GS} - V_t = -0,6 \text{ V} - (-3 \text{ V}) = 2,4 \text{ V}$$

QUINDI IMPONGO:

$$V_{DS} = 5,6 \text{ V}$$

DI MODO CHE

$$V_D = 5 \text{ V}$$

$$V_S = -0,6 \text{ V}$$

POI CHE LA TENSIONE DI SOURCE È MOLTO PICCOLA E LA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE, IN VALORE ASSOLUTO, È MOLTO GRANDE ONDE EVITARE DI DOVER IMPORRE UNA  $R_S$  TROPPO GRANDE, CON CONSEGUENZE NEGATIVE SUL GUADAGNO, PONIAMO TRA  $V_{SS}$  E  $R_S$  UN DIODO ZENER CHE CI PERMETTE DI SCEGLIERE  $R_S$  PICCOLA A PIACERE (A SECONDA DELLA TENSIONE AI SUOI CAPI).

CALCOLIAMO LA  $R_D$ :

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D} = \frac{15 \text{ V}}{1,2 \text{ mA}} = 12,5 \text{ k}\Omega$$

QUINDI IL GUADAGNO:

$$g = \frac{R_D}{R_S}$$

PUÒ VENIRE ANCHE ABBASTANZA GRANDE ( $\sim 100$ ) PERCHÉ

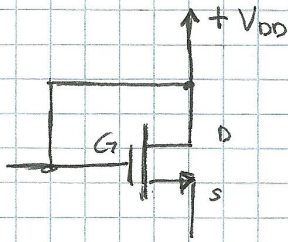
$R_S$  È PICCOLA A PIACERE



# MOSFET CON CARICHI ATTIVI

PER NECESSITA' DI INTEGRAZIONE SU CARICA SECCA, ANCHE NEI MOSFET E' D'UOGO INTRODURRE DEI CARICHI ATTIVI. PER RIMOVERE LE RESISTENZE.

RICORDIAMO CHE I MOS SI POSSONO USARE COME RESISTENZE E CON QUESTA CONSAPEVOLEZZA OSSERVIAMO I SEGUENTI ESPEDIENTI:



UN **N-MOS ENHANCEMENT** IN QUESTA CONFIGURAZIONE E' SEMPRE IN REGIONE DI SATURAZIONE POICHE' E' SEMPRE SODDISFATTA LA CONDIZIONE:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

IN AVANTO  $V_{DS} = V_{GS}$

STANDO COSI' LE COSE POSSO SOSTITUIRE LA  $V_{GS}$  CON LA  $V_{DS}$  NELL'ESPRESSIONE DELLA  $I_D$ :

$$I_D = k (V_{GS} - V_T)^2$$

↓

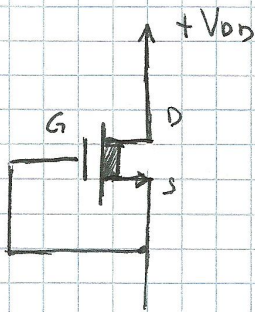
$$I_D = k (V_{DS} - V_T)^2$$

QUESTA ESPRESSIONE ESPRIME UNA RELAZIONE TRA  $I_D$  E  $V_{DS}$  CHE E' PROPRIO LA DEFINIZIONE DI RESISTENZA.

IMPOSTANDO UNA OPPORTUNA  $V_{GS}$  LA CORRISPONDENZA TRA  $V_{DS}$  E  $I_D$  PUO' ESPRIMERE UNA RESISTENZA ANCHE GRANDE. FACCIAMO UN ESEMPIO COMPLEMENTARE. UTILIZZANDO

UN **N-MOS DEPLETION**





IN QUESTO CASO

$$V_{GS} = 0$$

POICHE'  $V_G = V_S$

QUINDI :

$$I_D = k (V_t)^2$$

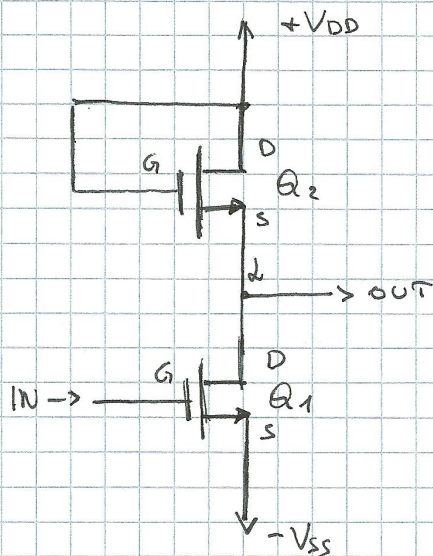
CHE ANCORA UNA VOLTA ESPRIME UNA LEGGE DI TIPO RESISTIVO

POSSO USARE UN MOS IN UNA DI QUESTE DUE CONFIGURAZIONI

COME DI CARICO PER UN ALTRO MOS.

## ESERCIZIO

CALCOLARE IL GUADAGNO DI QUESTO CIRCUITO



CALCOLIAMO LE CORRENTI DI DRAIN :

$$I_{D1} = K_1 (V_{IN} - V_{t1})^2$$



$$I_{D_2} = K_2 (V_{GS_2} - V_{t_2})^2$$

$$I_D (TOT) = K_2 (V_{DD} - V_{OUT} - V_{t_2})^2 = K_1 (V_{IN} - V_{t_1})^2$$

ABBIAMO UGUAGLIATO  $I_{D_1}$  E  $I_{D_2}$  E LE ABBIAMO CHIAMATE  $I_D (TOT)$   
RISOLVENDO  $V_{OUT}$  SUPPONENDO CHE  $V_{t_1} = V_{t_2} = V_t$

$$V_{OUT} = (V_{DD} - V_t + \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} V_t) - \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} V_{IN}$$

LA VARIAZIONE DI  $V_{OUT}$  SU  $V_{IN}$  E' IL GUADAGNO DELL'INTERO CIRCUITO, SVILUPPANDO QUESTO CONTO SI HA:

$$G = \frac{dV_{OUT}}{dV_{IN}} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$$

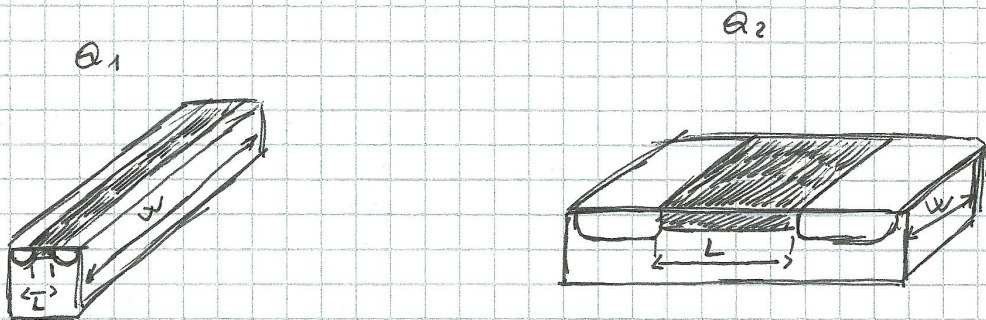
MA, RICORDANDO L'ESPRESSIONE DI  $K$ , SI HA

$$G = \sqrt{\frac{\left(\frac{W}{L}\right)_1}{\left(\frac{W}{L}\right)_2}}$$

IL GUADAGNO DI QUESTO CIRCUITO DIPENDE SOLAMENTE DALLE DIMENSIONI DEI DUE MOS.

CIÒ VUOL DIRE CHE, PER AVERE UN GUADAGNO ELEVATO,

SI RICHIEDE CHE  $Q_1$  ABBA UN CANALE CON GRANDE  $W$  E PICCOLA  $L$  E CHE  $Q_2$  ABBA UN CANALE CON GRANDE  $L$  E PICCOLA  $W$ :



OSSERVIAMO CHE IL CONTO DI QUESTO GUADAGNO POTREVA ESSERE FATTO MOLTO PIÙ VELOCEMENTE IN MANIERA DIRETTA:

$$G = g_m \cdot R_D = g_{m1} \cdot \frac{1}{g_{m2}} = \frac{2\sqrt{K_1 I_D}}{2\sqrt{K_2 I_D}} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$$



## ESERCIZIO

POLARIZZARE IL CIRCUITO PRECEDENTE:

SIA:

$$K_1 = 1,6 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$K_2 = 0,2 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$V_{DD} = +15 \text{ V}$$

$$V_{SS} = -5 \text{ V}$$

$$V_{t1} = 3 \text{ V} = V_{t2}$$

$$V_{GS1} = V_{G1} - V_{S1} = 0 \text{ V} - (-5 \text{ V}) = 5 \text{ V}$$

CALCOLIAMO LA CORRENTE DI DRAIN:

$$I_{D1} = K_1 (V_{GS1} - V_{t1})^2 = 1,6 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (5 \text{ V} - 3 \text{ V})^2 = 6,4 \text{ mA}$$

SUPPONENDO CHE LE CORRENTI NEI DUE MOS SIANO UGUALI:

$$I_{D1} = I_{D2}$$

RICAVIAMO IL VALORE DI  $V_{GS2}$  DALL'ESPRESSIONE DI  $I_{D2}$

$$I_{D2} = K_2 (V_{GS2} - V_{t2})^2$$

DAINDI:

$$V_{GS2} = \sqrt{\frac{I_{D2}}{K_2}} - V_{t2} = \left( \frac{6,4 \text{ mA}}{0,2 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}} \right)^{\frac{1}{2}} + 3 \text{ V} = 8,66 \text{ V}$$

LA TENSIONE SULL'USCITA SARÀ DATA DALLO SCOUTO:

$$V_2 = V_{DD} - V_{GS2} = 6,34 \text{ V}$$



VERIFICHIAMO A QUESTO PUNTO CHE  $Q_1$  SIA IN REGIME DI SATURAZIONE:

$$V_{DS1} = 6,34V - (-5V) = V_D - V_{SS} = 11,34V$$

CHE CERTAMENTE RISPETTA LA CONDIZIONE:

$$V_{DS1} > V_{GS1} - V_{t1} = 2V$$

$Q_2$  È IN SATURAZIONE PER QUANTO DETTO IN PRECEDENZA IL CIRCUITO È TUTTO POLARIZZATO CORRETTAMENTE.

IL GUADAGNO DELL'INTERA MAGLIA VALE:

$$G = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} = \sqrt{\frac{1,6}{0,2}} = \sqrt{8} = 2\sqrt{2}$$

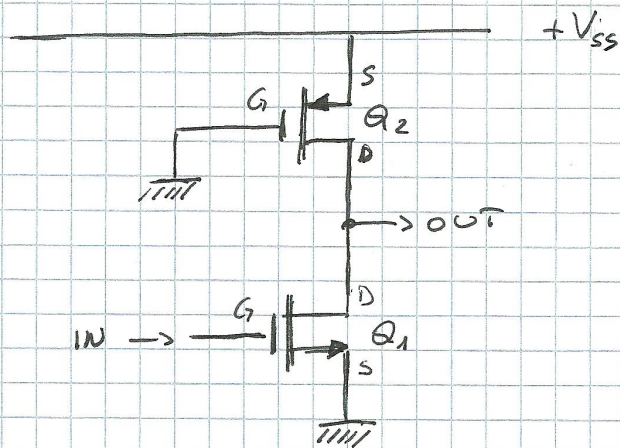
È UN GUADAGNO PIUTTOSTO BASSO - QUESTO PERCHÉ, COME ACCADEVANO PER IL TRANSISTOR, NON BISOGNA OFFERIRE AL DRAIN (COLLETORE) DI UN MOS (BJT) IL SOURCE (EMETTORE) DI UN ALTRO MOS (BJT) POICHÉ NEL PUNTO DI CONGIUNZIONE TRA I DUE DISPOSITIVI IL SEGNALE VEDE UN'IMPIEDENZA MOLTO BASSA (PARI A  $\frac{1}{g_m}$ ) CON OVVIE CONSEGUENZE SUL GUADAGNO - INOLTRE, UN PROBLEMA CHE ABBIAMO TRASCURATO, MA CHE PURTROPPO È NON TRASCURABILE, È QUELLO DELLA CAPACITÀ DI MULLER TRA GATE E DRAIN DEL DISPOSITIVO CHE GUADAGNA (TUTTI I DISCORSI FATTI PER I BJT A QUESTO PROPOSITO SI APPLICANO IN MANIERA ANALOGA AI MOS). PER RISOLVERE ENTRAMBI QUESTI PROBLEMI, IN MANIERA DEL TUTTO ANALOGA A QUELLO FATTO CON IL CASCODE PER I BJT, SI RICORRE PER I MOS ALL'ESPEDIENTE DEL

COMPLEMENTARY MOS

o

C-MOS





NELLA TECNOLOGIA C-MOS SI UTILIZZANO DUE MOS COMPLEMENTARI:

$Q_1$  È UN N-MOS E  $Q_2$  È UN P-MOS - OFFRENDO AL DRAIN DI

$Q_1$  IL DRAIN DI  $Q_2$  FACCIAMO VEDERE AL SEGNALE UNA ALTISSIMA IMPEDENZA, CON UN CONSEGUENTE AUMENTO DEL GUADAGNO.

A FRONTE DEI VANTAGGI IN GUADAGNO VI SONO ANCHE VANTAGGI

IN FREQUENZA POICHÉ L'AMPLIFICAZIONE È AFFIDATA A  $Q_2$

(CHE È IN CONFIGURAZIONE G.C.) RENDENDO INEFFICACE

L'AZIONE DELLA CAPACITÀ DI MILLER SUL SEGNALE IN

INGRESSO GIACCHÉ  $Q_1$  NON GUADAGNA.

## ESERCIZIO

POLARIZZARE IL CIRCUITO PRECEDENTE

SI A :

$$K_2 = 4 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$V_{t2} = -4 \text{ V}$$

$$K_1 = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$V_{t1} = 2 \text{ V}$$

$$V_{ss} = +5 \text{ V}$$

CALCOLO LA CORRENTE DI DRAIN (TENENDO CONTO CHE  $I_{D1} = I_{D2}$ )



$$I_{D_2} = k_2 (V_{GS_2} - V_{t_2})^2 = 4 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (-5\text{V} - (-4\text{V}))^2 = 4 \text{mA}$$

DOVE  $V_{GS_2} = V_{G_2} - V_{S_2} = 0\text{V} - 5\text{V} = -5\text{V}$

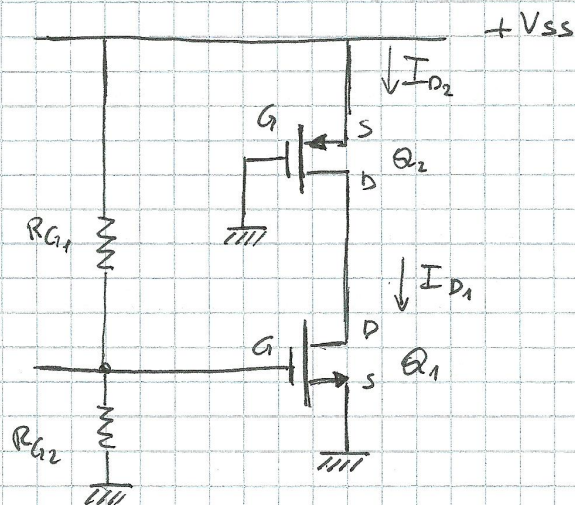
POI CHE' BISOGNA RENDERE COMPATIBILE IL MOS  $Q_1$  CON LA CORRENTE  $I_{D_2} = I_{D_1}$  IMPONGO UN PARTITORE SU  $G_1$  CHE DIA L'OPPORTUNA TENSIONE  $V_{GS_1}$  TALE CHE:

$$I_{D_1} = k_1 (V_{GS_1} - V_{t_1})^2 = 4 \text{mA}$$

QUINDI  $V_{GS_1} = 4\text{V}$ , PER CUI:

$$I_{D_1} = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (4\text{V} - 2\text{V})^2 = 4 \text{mA}$$

E IL CIRCUITO DIVENTA:



SE  $R_{O1}$  E' L'IMPIEDENZA VISTA DAL DRAIN DI  $Q_1$  E  $R_{O2}$  E' L'IMPIEDENZA VISTA DAL DRAIN DI  $Q_2$  (CHE SONO IMPIEDENZE DELL'ORDINE DI  $10 \div 100 \text{ k}\Omega$ ) IL GUADAGNO SARÀ DATO DA:

$$g = g_{m1} \cdot (R_{O1} // R_{O2}) \approx \Omega^{-1} \cdot \text{k}\Omega \approx 100$$

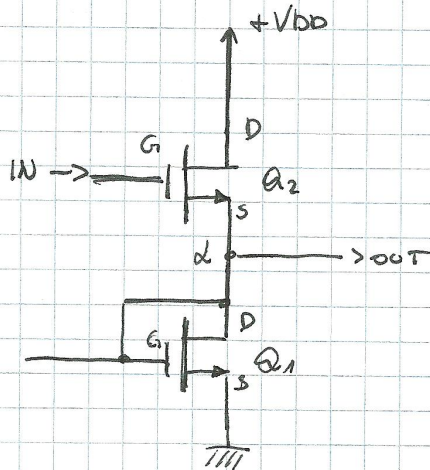
ANCHE CON I BJT, RICORDIAMO, INCORREMMO IN UNA SITUAZIONE SIMILE (VEDI SPECCHI DI CORRENTE).



IN GENERALE, PER AVERE CARICHI A RIVI BISOGNA USARE SEMPRE UNA CONDIZIONE COMPLEMENTARE.

## ESERCIZIO

CONSTRUIRE UN EMITTER FOLLOWER A MOS CON CARICHI A RIVI



PER QUANTO RIGUARDA LE IMPEDENZE, IN INGRESSO ABBIAMO

$$Z_{IN} = \infty$$

POICHÉ È L'IMPEDENZA DEL GATE DI  $Q_2$  CHE È ISOLATO DAL RESTO DEL DISPOSITIVO.

IN USENDO INVECE, SE  $\frac{1}{g_{m2}}$  È L'IMPEDENZA VISTA DAL SOURCE DI  $Q_2$  E  $r_{o1}$  È L'IMPEDENZA VISTA DAL DRAIN DI  $Q_1$  NEL PUNTO 2 L'IMPEDENZA DI USCITA È DATO DAL PARALLELO:

$$Z_{OUT} = \frac{1}{g_{m1}} \parallel \frac{1}{g_{m2}} \parallel r_{o1} \approx \frac{1}{g_{m1}} \parallel \frac{1}{g_{m2}} \approx 100 \, \Omega$$

VALUTIAMO LE CORRENTI:

$$I_{D2} = K_2 \left( \underbrace{V_{IN} - V_{OUT} - V_{t2}}_{= V_{GS2}} \right)^2$$

$$I_{D1} = K_1 \left( \underbrace{V_{OUT} - V_{t1}}_{= V_{GS1}} \right)^2$$

QUESTE CORRENTI DEVONO EGUALGSIARE



$$I_{D1} = I_{D2}$$

Sviluppando questa uguaglianza è possibile ricavare  $V_{out}$ :

$$K_1 (V_{out} - V_{t1})^2 = K_2 (V_{in} - V_{out} - V_{t2})^2;$$

$$V_{out} = \frac{V_{in} - \left( \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} - 1 \right) V_{t1}}{\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} + 1}$$

Se i MOS sono identici si ha:

$$K_1 = K_2$$

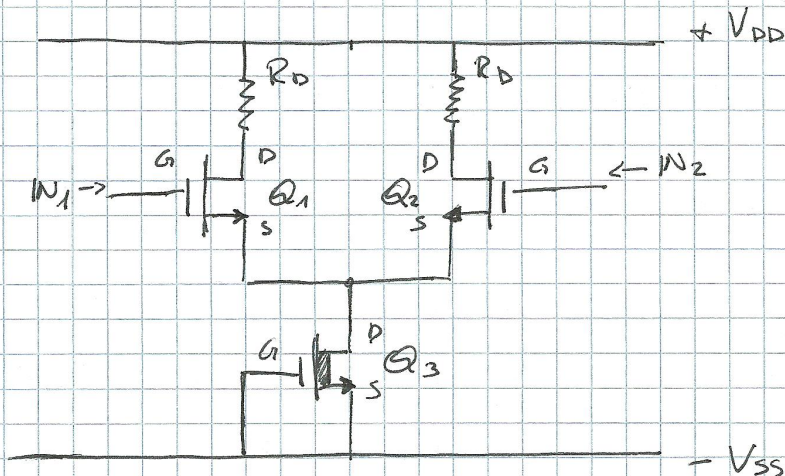
Per tanto si ottiene:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{2}$$

La  $V_{out}$  segue la  $V_{in}$  (anche se diventa la metà) per cui si può dire che questo circuito sia un emitter follower. Questi circuiti vengono solitamente utilizzati per accoppiare le impedenze in uscita a circuiti molto più grandi costituiti da C-MOS (che, ad oggi, sono gli amplificatori più efficienti sul mercato).

## CIRCUITI DIFFERENZIALI A MOS

Procediamo in maniera analoga a quanto fatto per i BJT:





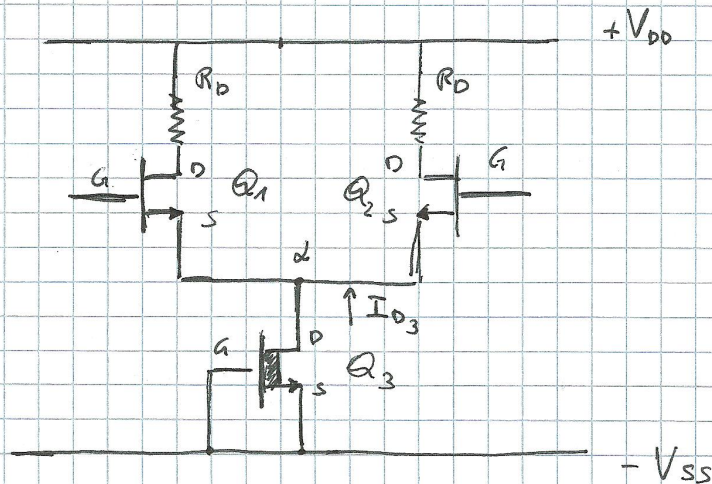
NATURALMENTE AI SOURCE DI  $Q_1$  E  $Q_2$  VA FATTO VEDERE UNA ALTA IMPEDENZA PER MASSIMIZZARE IL FATTORE DI REIEZIONE, QUINDI LI PONIAMO IN CONTATTO CON IL DRAIN DI  $Q_3$  CHE, PER LA CONFIGURAZIONE IN CUI E' POSTO, GENERA UNA CORRENTE DEL TIPO:

$$I_{D3} = K_3 (V_{t3})^2$$

QUINDI  $Q_3$  E' UN GENERATORE DI CORRENTE CHE FA DA RESISTENZA E GARANTISCE UN ALTO FATTORE DI REIEZIONE.

## ESERCIZIO

POLARIZZARE IL SEGUENTE CIRCUITO A J-FET



SIA :

$$K_3 = 4 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} ; \quad V_{DD} = +15\text{V} ; \quad V_{SS} = -15\text{V}$$

$$V_{t3} = -1\text{V}$$

LA CORRENTE PROGRAMMATA NEL FET  $Q_3$  E' :

$$I_{D3} = K_3 (V_{t3})^2 = 4\text{mA}$$

SUPPONENDO CHE  $Q_1$  E  $Q_2$  SIANO IDENTICI, LA  $I_{D3}$

NEL PUNTO A SI SPLITTA IN DUE CORRENTI IDENTICHE:

$$I_{D1} = I_{D2} = 2\text{mA}$$



CALCOLIAMO LE TENSIONI NOTE LE CORRENTI:

$$V_{GS1} = \sqrt{\frac{I_{D1}}{K_1}} + V_{t1} = \sqrt{\frac{2 \text{ mA}}{4 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}}} - 1 \text{ V} = -0,29 \text{ V}$$

ABBIAMO FATTO IL CONTO IPOTIZZANDO DI AVERE TRE FET UGUALI, PER CUI:

$$V_{t1} = V_{t2} = V_{t3} = -1 \text{ V}$$

$$K_1 = K_2 = K_3 = 4 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

IMPONENDO LA TENSIONE DI GATE DI  $Q_1$  A ZERO SI HA

$$V_{GS1} = -0,29 \text{ V} = V_{G1} - V_{S1} = 0 - 0,29 \text{ V}$$

$$\text{QUINDI } V_{S1} = -0,29 \text{ V}$$

SCELGO UNA TENSIONE DI DRAIN TALE CHE SIA SODDISFATTA LA CONDIZIONE DI SATURAZIONE:

$$V_{DS1} > V_{GS1} - V_{t1}$$

$$\text{SIA } V_D = 5 \text{ V}$$

PER CUI:

$$V_{DS1} = V_D - V_{S1} = 5 \text{ V} - (-0,29 \text{ V}) = 5,29 \text{ V}$$

E POI ENER:

$$V_{GS1} - V_{t1} = -0,29 \text{ V} - (-1 \text{ V}) = 0,71 \text{ V}$$

LA CONDIZIONE È SODDISFATTA:

$$5,29 \text{ V} > 0,71 \text{ V}$$

DETO CIO' RISOLVIAMO LA RESISTENZA DI DRAIN:



$$R_D(Q_1) = \frac{V_{DD} - V_{D1}}{I_{D1}} = \frac{15V - 3V}{2mA} = 5 k\Omega$$

CALCOLIAMO IL GUADAGNO DOVUTO A  $Q_1$ :

$$g_{DIFF} = \frac{1}{2} g_{m1} R_D(Q_1) = \frac{1}{2} (2 \sqrt{I_{D1} K_1}) \cdot R_D(Q_1) = 14.15$$

IL FATTORE  $\frac{1}{2}$  VIENE AL FATTO CHE, A CAUSA DELL'INGRESSO DIFFERENZIALE, IL SEGNALE DI INPUT SI DIVIDE A METÀ TRA I DUE GATE DI  $Q_1$  E  $Q_2$ .

IL GUADAGNO IN MODO COMUNE È:

$$g_{M.C.} = \frac{g_{m1} R_D(Q_1)}{1 + 2g_{m1} M_{D3}} \approx 10^{-4}$$

DOVE  $M_{D3}$  È LA RESISTENZA OFFERTA DAL DRAIN DI  $Q_3$  CHE È MOLTO GRANDE.

CON UN UNICO SEGNALE SIAMO RIUSCITI AD OTTENERE UN FATTORE DI REIEZIONE MOLTO GRANDE A FRONTE DI UN GUADAGNO ABBASTANZA BASSO

$$C.M.R.R. = \frac{g_{DIFF}}{g_{M.C.}} \approx 10^4$$