

MOSFET o semplicemente MOS

Sono dei transistor e come tali si possono usare come dispositivi amplificatori e come interruttori (switch), proprio come i BJT.

Rispetto ai BJT hanno però i seguenti vantaggi:

1. Non sono soggetti a fuga termica
2. Non sono soggetti al 2° Breakdown
3. Richiedono correnti di pilotaggio praticamente nulle (R di ingresso quasi infinita)
4. Funzionano anche da Resistori variabili con la tensione (VDR)
5. Occupano uno spazio su circuito integrato che è il 5% di quello dei BJT

Per i punti 1) e 2) e 3) si possono usare come dispositivi di controllo di potenza (per grandi tensioni e correnti cioè, come ad es. il pilotaggio di Motori) in modo molto più semplice che non i BJT: in particolare si possono collegare in parallelo per condurre correnti maggiori senza troppi problemi, Per tali motivi hanno soppiantato quasi ovunque i BJT in tali applicazioni

Vi sono due Tipologie di Mosfet:

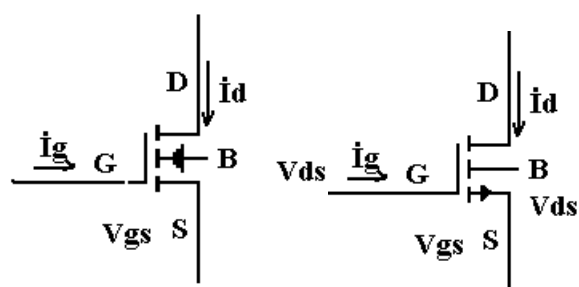
- A Incremento (Enhancement)
- A Svuotamento (Depletion) che possono però anche funzionare ad Incremento: il loro funzionamento è identico a quello dei JFET

Per ognuna di queste famiglie possono poi essere a CANALE N (i più usati) o a CANALE P. Tensioni e correnti sono positive nel tipo N e negative in quello P

A parte considerazioni tecnologiche che fanno preferire quelli N, un circuito con MOS a canale N si può convertire ad uno con MOS tipo P e viceversa, scambiando tra loro Alimentazione e Massa e invertendo tutti gli elementi polarizzati (diodi vari, condensatori elettrolitici ecc.)

Combinando un MOS N con uno P (entrambi a incremento) di caratteristiche uguali o quasi, si ottiene una coppia complementare, da cui il nome CMOS (Complementary MOS) che funziona molto bene come stadio di uscita di circuiti logici: i moderni circuiti integrati logici sono infatti di tipo CMOS.

Il tipo più usato è quello Enhancement a canale N. Vediamo il suo funzionamento dal punto circuitale, cioè trascurando del tutto “come è fatto dentro”



Segno grafico del MOSFET ENHANCEMENT tipo N

D = Drain (equivale al Collettore del BJT)

S = Source (equivale all' Emettitore del BJT)

G = Gate (equivale alla Base del BJT)

B = Bulk. Normalmente è già collegato internamente al S. Nel caso non lo sia farlo esternamente, pena possibili danni al dispositivo

Per ogni MOS vi è un particolare valore di

- V_{gs} chiamata *tensione di soglia (Threshold)* e indicata con V_{TO} o V_{TR} o $V_{GS(th)}$ di valore 2 – 10 V sotto la quale si è in Interdizione, e sopra la quale si è in una delle altre due zone.
- K chiamato *fattore di transconduttanza* che ha le dimensioni di $1/R$ (e si misura pertanto in Siemens o S) che determina il valore della I_d . Non sempre il costruttore lo fornisce, ma si può misurare facilmente. Un valore tipico è $1 \text{ mA} / \text{V}^2$

Proprio come il BJT abbiamo alcune ZONE DI FUNZIONAMENTO:

1. Zona di Interdizione (cutoff) in cui opera tra D e S come un interruttore aperto.

$$V_{gs} < V_{GS(th)} \quad I_d \approx 0$$

2. Zona Resistiva (o Ohmica o di Triodo) in cui è simile a una VDR con R inversamente proporzionale alla V_{gs} .

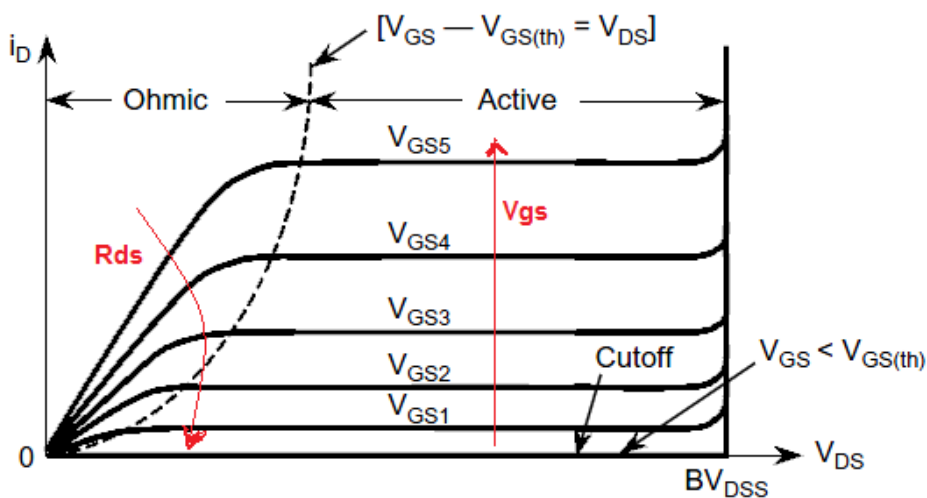
In particolare se la R è molto piccola (si arriva anche ai $m\Omega$) e quindi V_{gs} grande e V_{ds} piccola, allora tra D e S è come avere un Interruttore chiuso

$$V_{gs} > V_{GS(th)} \quad \text{e} \quad V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(th)} \Rightarrow I_d = K[2(V_{GS} - V_{TR})V_{DS} - V_{DS}^2] \quad \text{con} \quad R_{ds} \approx 1 / (2 * K * (V_{GS} - V_{GS(th)}))$$

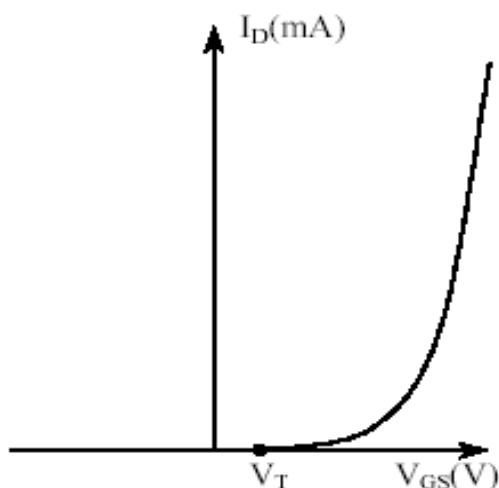
3. Zona di Saturazione (o Lineare o A corrente Costante o di Pinch Off o Attiva) in cui funziona da amplificatore o comunque come elemento (quasi) lineare.

$$V_{gs} > V_{GS(th)} \quad \text{e} \quad V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)} \Rightarrow I_D = K(V_{GS} - V_{TR})^2 \quad \text{e come si vede è costante (rispetto a } V_{ds})$$

Vediamo le caratteristiche di uscita (output) e mutua con collegamento a Source Comune (CS)



Output Characteristics



Caratteristica Mutua (Uscita in funzione di Ingresso)

Come per i BJT si possono avere le configurazioni a Source Comune (CS) che è la più usata, l'unica usata nel funzionamento da interruttore. La CG e la CD, con caratteristiche simili alle corrispondenti del BJT

ANALISI DEI CIRCUITI AMPLIFICATORI A MOSFET

Come per i circuiti a BJT, l'analisi dei circuiti amplificatori a MOSFET si compone di **due fasi**:

- 1) l'analisi **DC** finalizzata alla determinazione del **punto di riposo**;
- 2) l'analisi **AC** basata sull'utilizzo del **circuito equivalente per piccoli segnali per il calcolo del guadagno di tensione e delle impedenze di ingresso e di uscita**.

Lo scopo dei circuiti di polarizzazione è quello di fissare il punto di riposo di ogni MOSFET **indipendente dalle variazioni dei suoi parametri (da dispositivo a dispositivo a al variare della temperatura)** all'interno della **regione di saturazione** (quando questo opera come un amplificatore) e possibilmente al centro della retta di carico in modo da massimizzare lo swing massimo della tensione di uscita senza che ci sia distorsione.

13

CIRCUITO DI POLARIZZAZIONE A 4 RESISTENZE

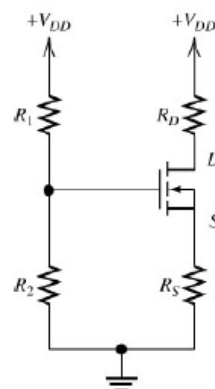
Il circuito di polarizzazione a 4 resistenze è adatto per polarizzare i circuiti amplificatori discreti.

La tensione e la resistenza equivalente Thevenin del circuiti di ingresso sono dati da:

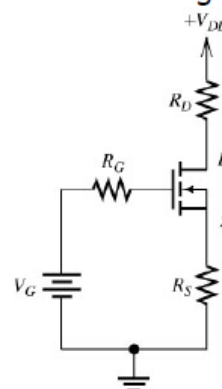
$$V_G = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_G = R_1 || R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

A differenza del caso del BJT, in questo caso R_1 e R_2 costituiscono un vero partitore resistivo, dato che $I_G = 0$.



(a) Original circuit



(b) Gate bias circuit replaced by its Thévenin equivalent

14

POLARIZZAZIONE A 4 RESISTENZE / 2

L'equazione della maglia di ingresso è ($I_G=0$): $V_G = V_{GSQ} + R_S I_{DQ}$

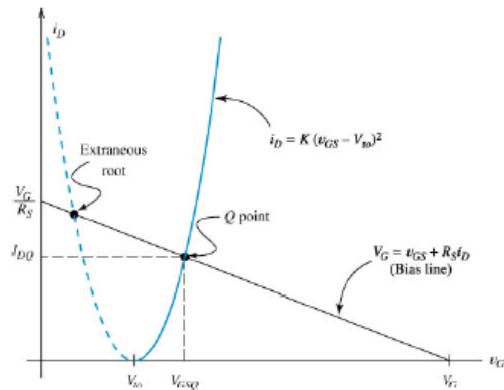
Supponendo che il MOSFET operi in regione di saturazione:

$$I_{DQ} = K(V_{GSQ} - V_{T0})^2$$

La soluzione simultanea delle due equazioni fornisce il punto di riposo. Il sistema (di secondo grado) ha due soluzioni in V_{GSQ} delle quali una è minore di V_{T0} e come tale è da scartare.

Determinati V_{GSQ} e I_{DQ} , l'equazione della maglia di uscita consente di calcolare V_{DSQ} e verificare se l'ipotesi di funzionamento in saturazione è corretta ($v_{DS} > v_{GS} - v_{T0}$):

$$V_{DSQ} = V_{DD} - (R_D + R_S) I_{DQ}$$



ESEMPIO NUMERICO

Dati: $K_n = \mu_n C_{ox} = 50 \mu A/V^2$, $V_{T0} = 2 V$,
 $L = 10 \mu m$, $W = 400 \mu m$.

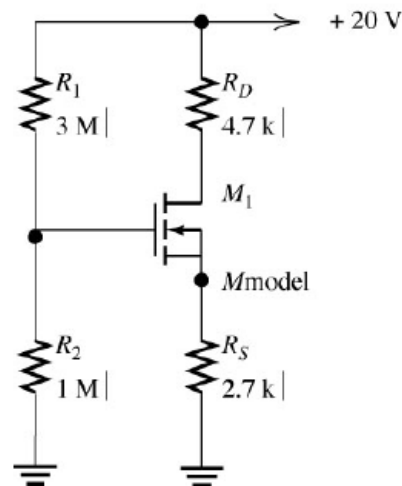
Determinare il valore di riposo di M_1 .

$$K = \left(\frac{W}{L}\right) \frac{K_n}{2} = 1 mA/V^2$$

$$V_G = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 20 \frac{1}{3+1} = 5V$$

$$\begin{cases} V_G = V_{GSQ} + R_S I_{DQ} \\ I_{DQ} = K(V_{GSQ} - V_{T0})^2 \end{cases}$$

$$V_{GSQ}^2 + \left(\frac{1}{R_S K} - 2V_{T0}\right) \cdot V_{GSQ} + V_{T0}^2 - \frac{V_G}{R_S K} = 0 \quad V_{GSQ} = \begin{cases} 2.886V \\ \cancel{0.744V} \end{cases}$$



$$I_{DQ} = K(V_{GSQ} - V_{T0})^2 = 0.784\text{mA}$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - (R_D + R_S)I_{DQ} = 14.2\text{V} > (V_{GSQ} - V_{T0})$$

risulta verificato che il MOSFET opera in saturazione!

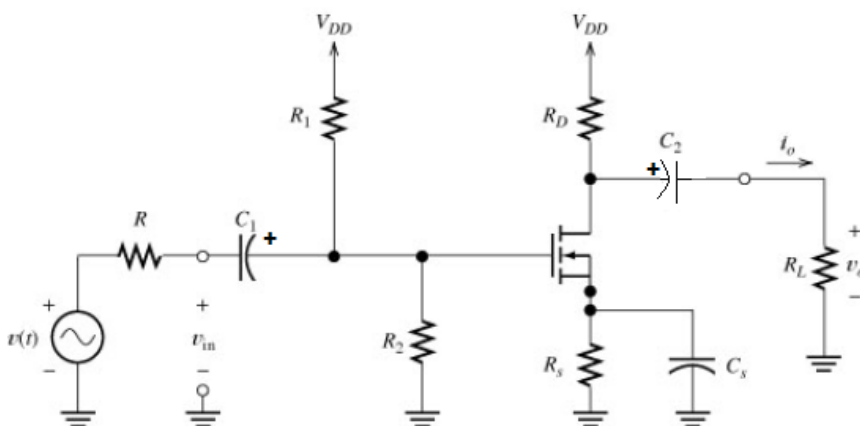
MOSFET COME INTERRUTTORE

- Se $v_{GS} \leq V_{T0}$ siamo in **interdizione** e l'interruttore è **aperto**: la corrente di drain i_D è nulla anche se viene applicata una $v_{DS} > 0$ e quindi sul MOS non è dissipata alcuna potenza $P_{MOS} = V_{DS} I_{DS} = 0$
- Se $v_{GS} > V_{T0}$ l'interruttore è **chiuso** (scorre corrente, i_D): affinché la potenza dissipata sul MOS sia il più piccola possibile ad una data corrente, è necessario che il MOSFET opera in **triodo**, dove v_{DS} è più bassa

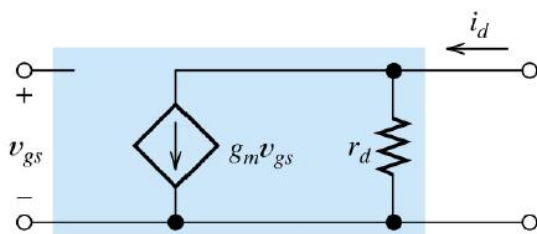
STADIO AMPLIFICATORE A SOURCE COMUNE

SCHEMA ELETTRICO

Il segnale di ingresso è applicato al gate del MOSFET attraverso il **condensatore di accoppiamento C_1** . L'uscita è presa sul drain e connessa al carico attraverso **C_2** . C_1 , C_2 e C_S sono i condensatori di accoppiamento, e quindi si possono considerare corto-circuiti alle frequenze del segnale (centro-banda). Il source è pertanto a massa per i segnali. R_1 , R_2 , R_D e R_S formano una rete di polarizzazione a 4 resistenze.



Per piccoli segnali si sostituisce al MOS il suo circuito equivalente (qui vediamo quello per basse



frequenze). Compagno N° 2 parametri: g_m ed r_d . r_d è fornito dal costruttore, mentre g_m si calcola con

$$g_m = 2 * K * \sqrt{I_{DQ}} \text{ dove } I_{DQ} \text{ è la corrente a riposo}$$

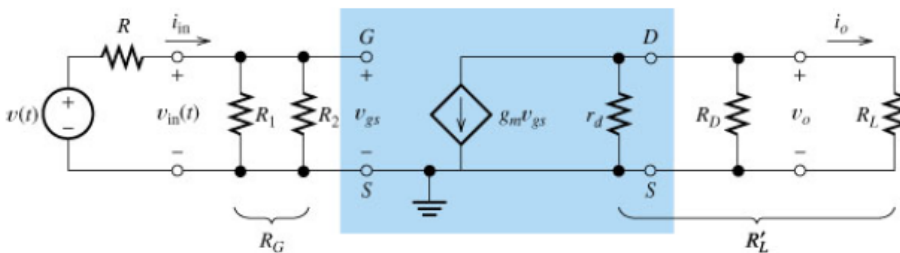
Il circuito è visto secondo Norton. Volendo averlo secondo Thevenin (generatore reale di tensione), il generatore ideale vale $g_m * r_d * v_{gs}$. Si definisce

$$\mu = g_m * r_d \text{ Amplificazione di Tensione a Circuito aperto}$$

CIRCUITO EQUIV. AI PICCOLI SEGNALI

Per costruire il circuito equivalente ai piccoli segnali dell'amplificatore a source comune si deve sostituire: **1) ai condensatori dei cortocircuiti; 2) al MOSFET il suo circuito equivalente per piccoli segnali; 3) ai generatori indipendenti di tensione DC dei cortocircuiti** (dal momento che su di essi la variazione di tensione, ossia il segnale, è sempre nullo per qualsiasi variazione di corrente).

Per semplificare lo schema equivalente così ottenuto, possiamo definire $R_G = R_1 \parallel R_2$ ed $R_L' = R_D \parallel R_L$ (NB: noi trascuriamo r_d , che è analogo al considerare r_d infinita)



$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} = -g_m R_L'$$

Amplificazione di Tensione

A_v è negativo e in modulo può essere molto maggiore di uno: ciò significa che l'amplificatore a source comune è un amplificatore di tensione **invertente**.

Nel caso NON vi sia C3 $A_v \approx -R_L' / R_s$ Proprio come visto per il BJT (vi è controreazione)

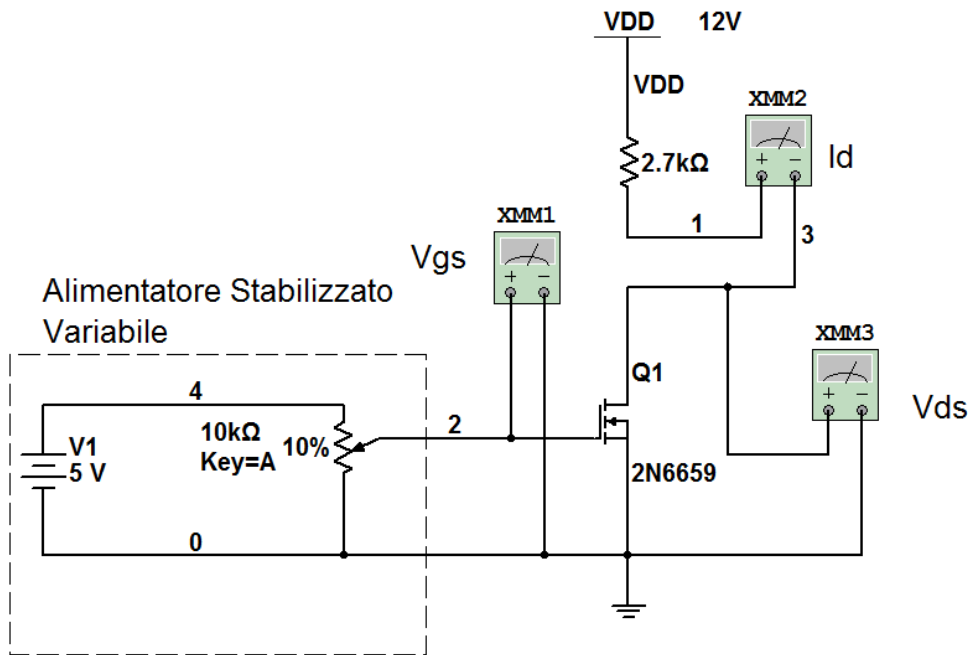
In entrambi i casi:

Resistenza di ingresso = $R_1 \parallel R_2$

Resistenza di uscita = $r_d \parallel R_D$

Per il calcolo delle frequenze di taglio si procede come visto per il circuito preamplificatore a BJT, tenendo conto che C1 non interagisce con le altre, mentre C2 e C3 sono interagenti tra loro e quindi formano un Polo Dominante.

Facendo una simulazione con Multisim-10 per il N-MOS 2N6659:



ANALISI MOS 2N6659 CON MULTISIM - TROVATA $V_t = 1,72$ V circa (molto critico !!!)

Vgs	Id	Vds	ZONA	K calcolato	Rds [ohm] misurata	Rds[ohm] calcolata con K = 106	Id calcolata con K = 106
1,6	0,001776	11,99	INT				
1,65	0,001776	11,99	INT				
1,7	0,001776	11,99	INT				
1,75	0,1	11,80	SAT	81			0,1
1,8	0,7	10,22	SAT	103			0,7
1,85	1,8	7,07	SAT	108			1,8
1,9	3,6	2,39	SAT	110			3,4
1,95	4,4	0,11	RES	101	25,7	18,9	4,2
2	4,4	0,08	RES	104	18,6	15,7	4,2
2,05	4,4	0,07	RES	106	14,9	13,5	4,2
2,1	4,4	0,06	RES	106	12,7	11,8	4,2
2,15	4,4	0,05	RES	106	11,1	10,5	4,2
2,2	4,4	0,04	RES	105	9,9	9,4	4,3
2,25	4,4	0,04	RES	104	9,0	8,6	4,3
2,3	4,4	0,04	RES	106	8,1	7,9	4,3

Come si vede K è meglio calcolarlo, in zona ohmica, quando Vds =circa 0

- In Laboratorio effettuare sperimentalmente la misura e confrontare i risultati.
- Con Multisim_10 ricavare le caratteristiche del N-MOS IRF 331 e quindi ripetere sperimentalmente in laboratorio

Esercizio:

- Determinare analiticamente (tramite il calcolo) il punto di funzionamento a riposo (valori di I_{DQ} , V_{GSQ} e I_{DSQ}) del circuito seguente, indicando la Zona di Funzionamento
- Effettuare la simulazione con Multisim_10
- In laboratorio montare il circuito ed effettuare le misure
- Scambiare di posto i resistori del partitore di Gate e rifare i passaggi precedenti
- Confrontare i risultati

