

# TRANSISTORE MOS

## \* PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

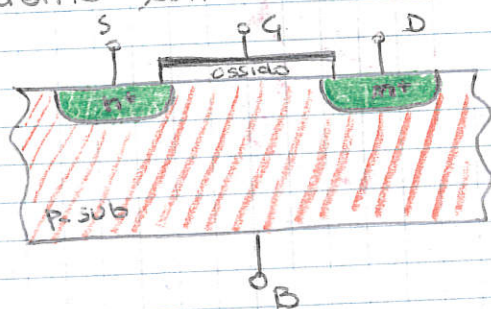
Il Transistore è un dispositivo a tre terminali:

- uno per l'ingresso del segnale
- uno per l'uscita del segnale
- riferimento comune.

L'ingresso è pilotato con un piccolo segnale di tensione (poche centinaia di mV) ed assorbe una corrente trascurabile (inferiore a  $\mu\text{A}$ ); il Transistore risponde con ampie variazioni della corrente (e dunque della tensione) di uscita e pertanto si comporta come amplificatore della potenza tra ingresso ed uscita.

Esistono diverse famiglie di Transistori: bipolari e ad effetto di campo.

Consideriamo un Transistore MOSFET a canale n ad arricchimento

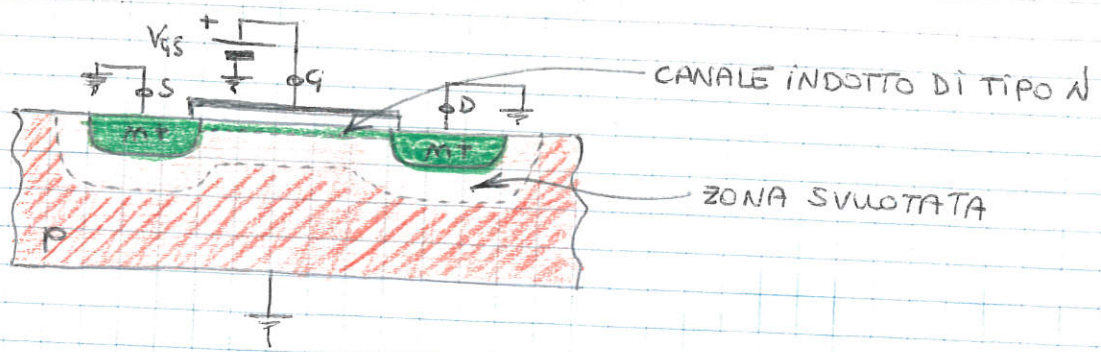


Il funzionamento del MOSFET si basa sulla possibilità di agire sul potenziale di gate per modificare la concentrazione di elettroni in prossimità dell'interfaccia ossido-silicio modulando, quindi, la corrente tra source e drain.

Supponiamo di collegare a massa source e drain e substrato ed applichiamo una tensione positiva al gate ( $V_{gs}$ ), si crea un campo elettrico trasversale all'interfaccia ossido-silicio che allontana le lacune verso il substrato e richiama



... in prossimità dell'interfaccia.



d'allontanamento delle lacune crea una zona svuotata che si estende per

$$x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} \Phi} \quad \text{ZONA SVUOTATA}$$

dove  $\Phi$  è la differenza di potenziale tra il substrato e l'interfaccia,  $N_A$  il drogaggio di substrato e  $\epsilon_s$  la costante dielettrica del Silicio ( $\epsilon_s \approx 10^{-12} \text{ F/cm}$ )

da carica fissa presente in tale regione è:

$$Q_b = qN_A x_d = \sqrt{2qN_A \epsilon_s \Phi}$$

Se aumentiamo il potenziale di gate aumentiamo lo spessore della zona svuotata fino a che un ulteriore aumento di  $V_{gs}$  non incrementa più la zona svuotata ma tende ad indurre un sottile strato di elettroni immediatamente sotto l'interfaccia ossido-silicio che dà luogo ad un CANALE conduttivo tra source e drain.

CONDIZIONE DI INVERSIONE: la densità di elettroni nel canale uguaglia la densità di droganti nel substrato  $\Rightarrow$  sotto l'interfaccia ossido-silicio si è invertito il tipo di drogaggio lo strato di cariche mobili e l'elettrodo di gate formano le armature di un condensatore piano il cui dielettrico è l'ossido di gate (CONDENSATORE MOS)

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{x_{ox}} = \frac{\epsilon_s}{3x_{ox}}$$

CAPACITÀ PER UNITÀ DI AREA  
DI UN CONDENSATORE MOS

la Tensione  $\Phi_f$  in condizioni di inversione è pari a  $2 \cdot \Phi_f^+$  con  $\Phi_f^+ \approx 0.3V$  (potenziale del livello di Fermi, che lega la densità di lacune nel substrato drogato con quella che si avrebbe nel silicio intrinseco)

la Tensione  $V_{GS}$  necessaria per indurre il canale conduttivo è detta TENSIONE DI SOGLIA,  $V_T$  (THRESHOLD VOLTAGE)

$$V_T = 2 \cdot \Phi_f^+ + \frac{Q_b}{C_{ox}} + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (10)$$

tensione necessaria per mantenere la carica e silicio

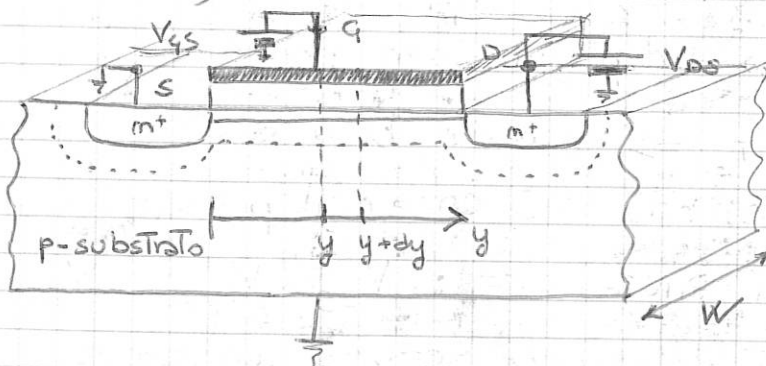
$Q_b$  (carica di canale e della regione di svuotamento) ai capi del condensatore  $C_{ox}$

lavoro di estrazione tra Gate

termine dovuto alla carica  $Q_{ss}$  (positiva) imprigionata all'interfaccia ossido-silicio a causa delle discontinuità delle due superfici.

Tipicamente  $0.5V < V_T < 2V$  e dipende dal drogaggio del substrato, dallo spessore dell'ossido di gate e dalle cariche fisse in esso presenti.

Con  $V_{GS} > V_T$  se aumentiamo  $V_{GS}$  aumentiamo la corrente tra i contatti di source e drain che non sono più tra loro isolati.



Sia  $V(y)$  la Tensione ad un generico punto  $y$  nel canale rispetto al source tenuto a massa, allora la carica indotta per unità di area nel canale è pari a:

$$q(y) = C_{ox} [V_{GS} - V(y) - V_T]$$

e la resistenza  $dR$  di un tratto di canale è data da:



$$dR = \frac{dy}{W \cdot \mu_n \cdot q(y)}$$

$$W \cdot \mu_n \cdot q(y)$$

Quindi la caduta di tensione sarà data da:

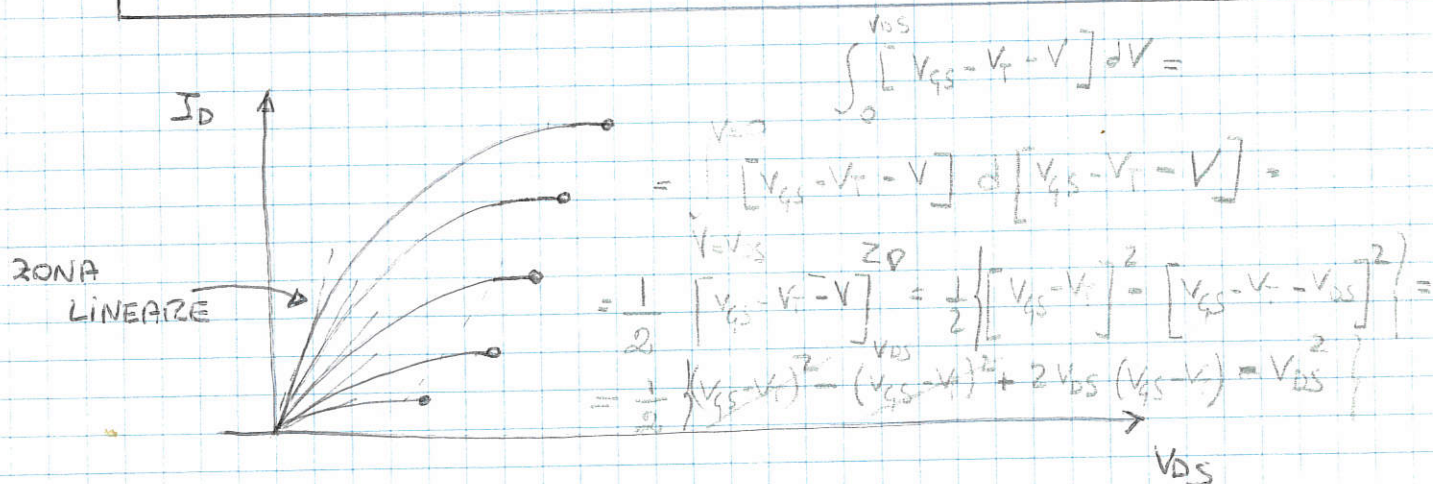
$$dV = I_D \cdot dR = \frac{I_D}{W \cdot \mu_n \cdot q(y)} dy = \frac{I_D}{W \cdot \mu_n \cdot C_{ox} [V_{GS} - V(y) - V_T]} dy$$

Se separiamo le variabili ed integriamo:

$$\int_0^L I_D \cdot dy = \int_0^{V_{DS}} W \mu_n C_{ox} [V_{GS} - V - V_T] dV$$

$$\Downarrow \quad I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[ 2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$$

CURVA CARATTERISTICA MOSFET IN ZONA OHMICA



Se aumentiamo ulteriormente  $V_{DS}$  il canale indotto sotto il gate tende ad impoverirsi in corrispondenza del drain poiché stiamo diminuendo la d.d.p. tra drain e gate.

Quando  $V_{DS} = V_{GS} - V_T \Rightarrow$  la d.d.p. tra drain e gate è pari alla  $V_T$  e non si ha più canale in prossimità del drain (CONDIZIONE DI PINCH-OFF:  $V_{DS} = V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$ ).

Gli elettroni provenienti dal source vedono un campo elettrico giunto in prossimità del punto di pinch-off che li trasporta al drain. Se aumentiamo  $V_{DS}$  oltre  $V_{DSsat}$  idealmente il punto di pinch-off non si muove, la corrente non cambia e l'eccesso di tensione  $V_{DS}$  oltre a  $V_{GS} - V_T$  cade tra il punto di pinch-off e il drain.

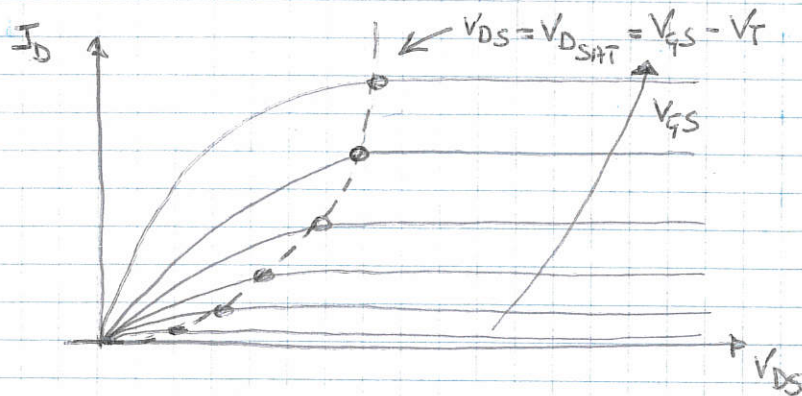


Quindi il MOSFET è polarizzato "sopra-soglia" ( $V_{GS} > V_T$ )  
 ma in condizioni di pinch-off ( $V_{GD} < V_T$ ) si dice che opera  
 in ZONA DI SATURAZIONE:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 = k (V_{GS} - V_T)^2$$

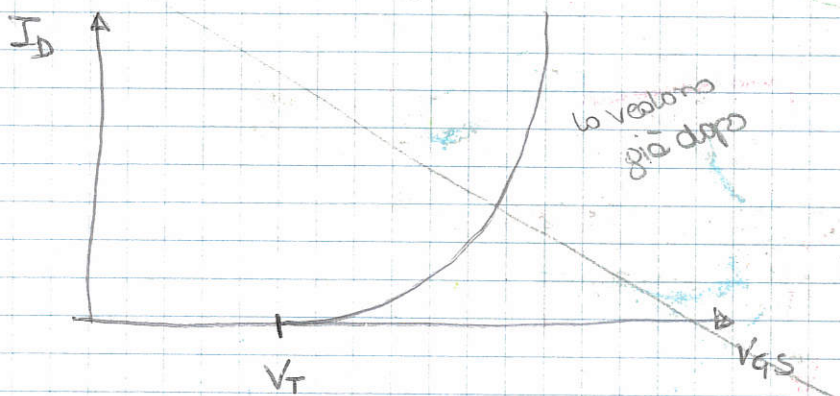
Tipicamente  $k = 10 \mu A/V^2 \div 10 mA/V^2$ .

In queste condizioni, quindi, il MOSFET si comporta come  
 un generatore di corrente  $I_D$ , controllato dalla Tensione  
 $V_{GS}$  applicata tra gate e source.



CURVE CARATTERISTICHE  
 MOSFET A CANALE N

È interessante rappresentare anche la corrente  $I_D$  in funzione  
 della Tensione  $V_{GS}$  (CURVA TRANSCARATTERISTICA)

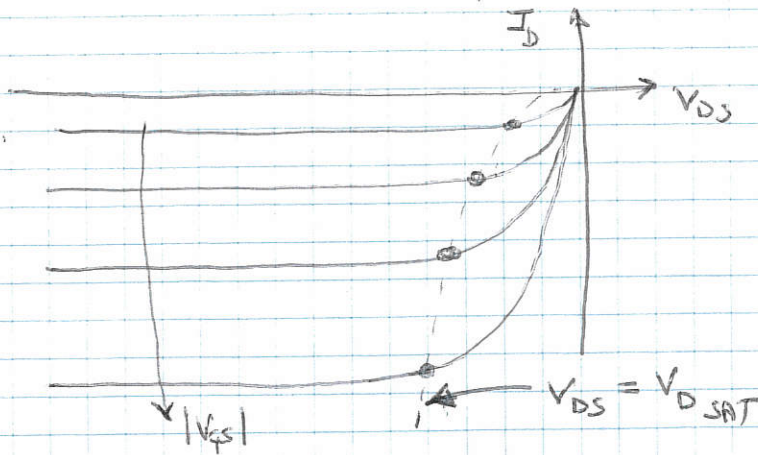


CURVA TRANSCARATTE-  
 RISTICA MOSFET A  
 CANALE N.

Esistono anche dispositivi MOSFET A CANALE P (sempre  
 ad arricchimento, cioè del tipo in cui è necessario applicare  
 una Tensione al gate per formare un canale conduttivo  
 tra source e drain). In tal caso il substrato è di tipo  
 n, le regioni di source e drain saranno realizzate con diffu-  
 sioni di tipo p+. È portatori mobili che devono formare il  
 canale sono in questo caso le lacune e sono richiamate



all'interfaccia ossido-silicio, applicando una tensione negativa al gate rispetto al source  $\Rightarrow$  la tensione di soglia  $V_T$  e la tensione  $V_{GS}$  applicata saranno negative.



### \* TRANSCARATTERISTICA

Come visto, il MOSFET operante in zona di saturazione si comporta come un generatore di corrente comandato in tensione attraverso il gate.

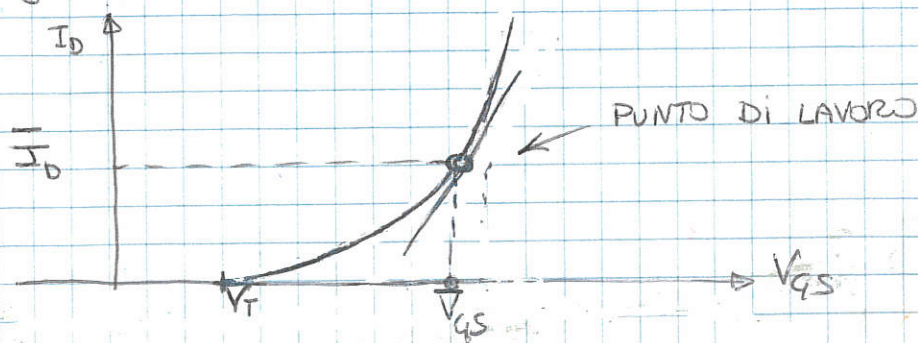
$$I_D = k (V_{GS} - V_T)^2 \quad k = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

Si definisce TRANSCONDUITANZA del MOSFET,  $g_m$ :

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = 2k (V_{GS} - V_T) = 2\sqrt{k I_D}$$

e prende conto di quanto una variazione infinitesima della tensione di comando  $V_{GS}$  faccia variare la corrente  $I_D$ .

Graficamente la transconduttanza è la pendenza della tangente alla caratteristica nel punto di lavoro.

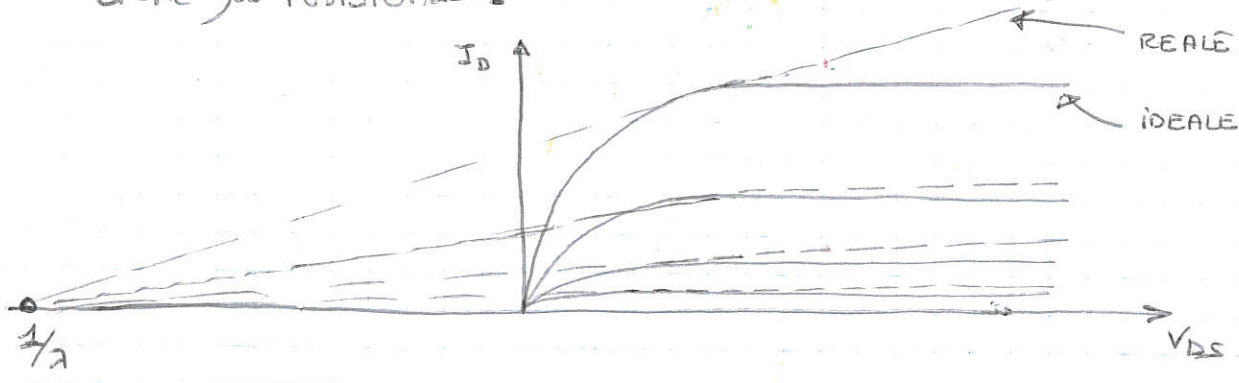


### \* RESISTENZA DI USCITA (fore alla fine 'e c'è tempo)

Non realla, il MOSFET in saturazione non si comporta come un generatore di corrente ideale, ma reale, poiché la corrente



$I_D$  erogata dipende anche debolmente dalla Tensione  $V_{DS}$ . Questo accade poiché, in realtà, all'aumentare di  $V_{DS}$  il punto di pinch-off arretra, accorciando il canale e, dunque, diminuendo la resistenza.



d'entità della dipendenza della corrente dalla Tensione  $V_{DS}$  può essere quantificata con l'inverso della pendenza  $\frac{dI_D}{dV_{DS}}$  nel punto di lavoro. (RESISTENZA DI USCITA)

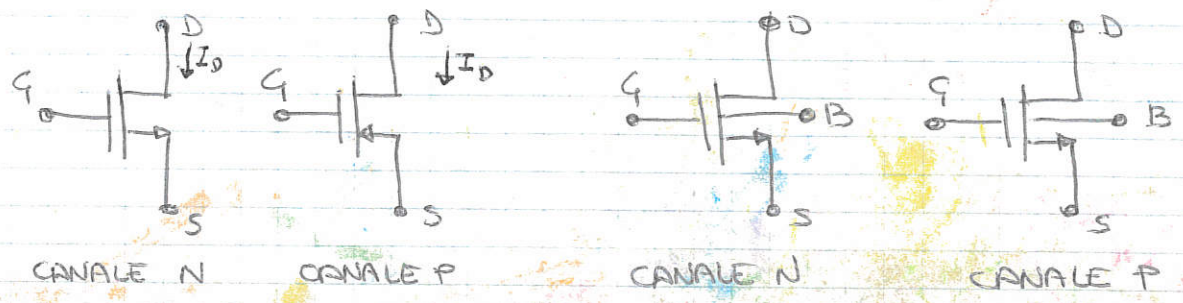
Si è soliti approssimare l'andamento della corrente  $I_D$  con la Tensione  $V_{DS}$  in zona di saturazione con un andamento lineare, poiché se prolungassimo tutte le curve caratteristiche in zona di saturazione esse convergono tutte in unico punto alla sinistra di  $V_{DS} = 0$ :

$$I_D = k (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$r_o = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} \approx \frac{V_{DS} + 1/\lambda}{I_D} \approx \frac{1}{\lambda I_D}$$

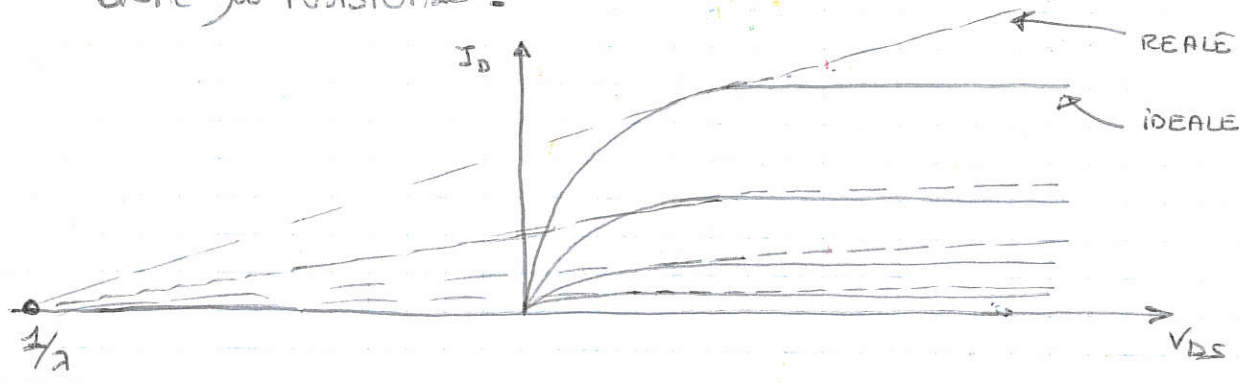
$\lambda$  è detto PARAMETRO DI MODULAZIONE DELLA LUNGHEZZA DI CANALE ( $\lambda = 0.1 - 0.01 \text{ V}^{-1}$ ).

\* SIMBOLI CIRCUITALI



da freccia sul source indica il verso della corrente conven

$I_D$  erogata dipende anche debolmente dalla Tensione  $V_{DS}$ . Questo accade poiché, in realtà, all'aumentare di  $V_{DS}$  il punto di pinch-off arretra, accorciando il canale e, dunque, diminuendo la resistenza.



d'entità della dipendenza della corrente dalla Tensione  $V_{DS}$  può essere quantificata con l'inverso della pendenza  $\frac{dI_D}{dV_{DS}}$  nel punto di lavoro. (RESISTENZA DI USCITA)

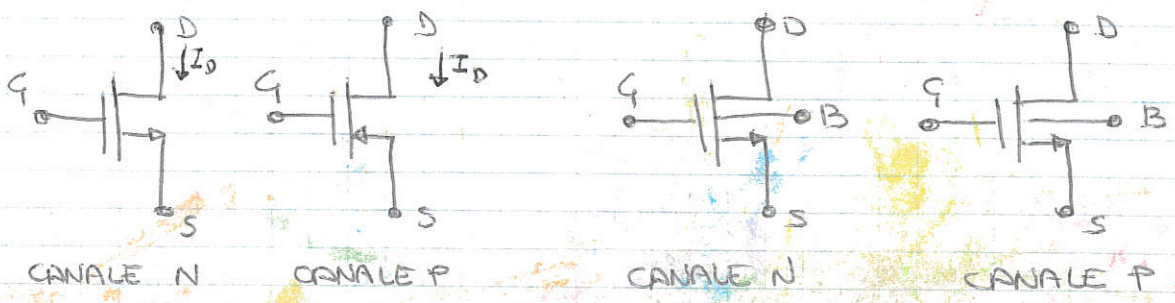
Si è soliti approssimare l'andamento della corrente  $I_D$  con la Tensione  $V_{DS}$  in zona di saturazione con un andamento lineare, poiché se prolungassimo tutte le curve caratteristiche in zona di saturazione esse convergono tutte in un unico punto alla sinistra di  $V_{DS} = 0$ :

$$I_D = k (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$r_o = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} \approx \frac{V_{DS} + V_A}{I_D} \approx \frac{1}{\lambda I_D}$$

$\lambda$  è detto PARAMETRO DI MODULAZIONE DELLA LUNGHEZZA DI CANALE ( $\lambda = 0.1 - 0.01 V^{-1}$ ).

\* SIMBOLI CIRCUITALI



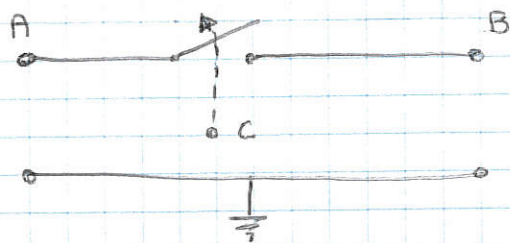
due frecce sul source indica il verso della corrente conven



zione. Pertanto  $I_D$  è la corrente positiva per un MOSFET a canale n e negativa per un MOSFET a canale p.

### \* IL MOSFET COME INTERRUOTTORE

Abbiamo visto come il MOSFET sia in grado di condurre o meno una corrente  $I_{DS}$  source e drain e secondo della tensione applicata al gate.



MODELLO IDEALE DI UN INTERRUOTTORE CONTROLLATO IN TENSIONE

Un interruttore controllato in tensione presenta due stati:

- OFF: interruttore aperto, resistenza  $R_{OFF}$  idealmente infinita  $I_{DS}$  e due terminali
- ON: interruttore chiuso, resistenza  $R_{ON}$  idealmente nulla  $I_{DS}$  e due terminali

Consideriamo un MOSFET a canale n:

-  $V_{GS} < V_T$  : non si ha canale conduttivo tra S e D.  
OFF

Il MOSFET opera in zona di INTERDIZIONE.

La resistenza drain-source  $R_{DSOFF} \approx 100 M\Omega$

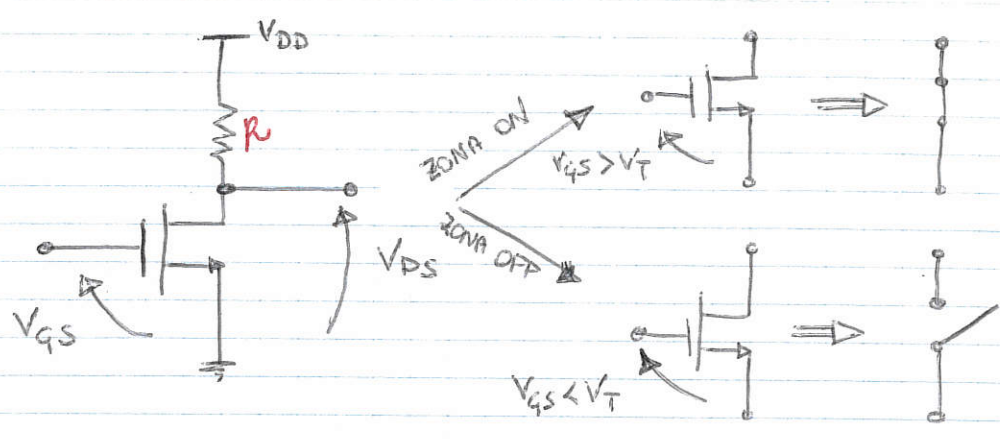
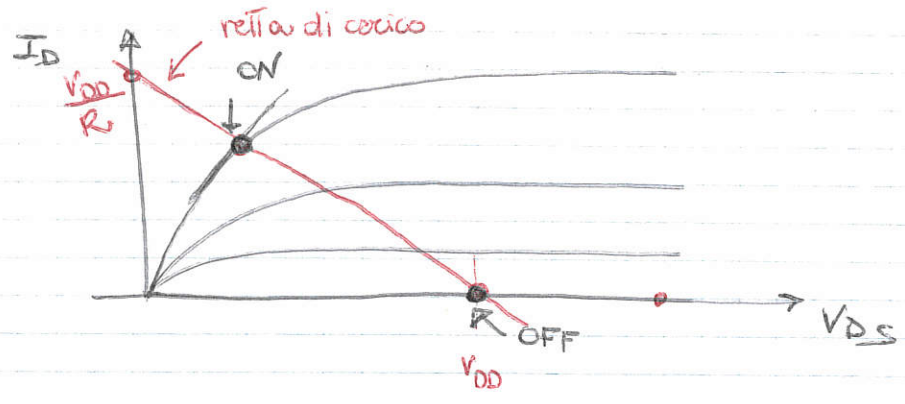
Corrente di leakage source-substrato e drain-substrato (tip decine di pA, ma raddoppia ogni  $10^\circ C$ )

-  $V_{GS} > V_T$  e  $V_{GD} > V_T$  : si ha canale sia al source che al drain ed il MOSFET opera in ZONA OHMICA.

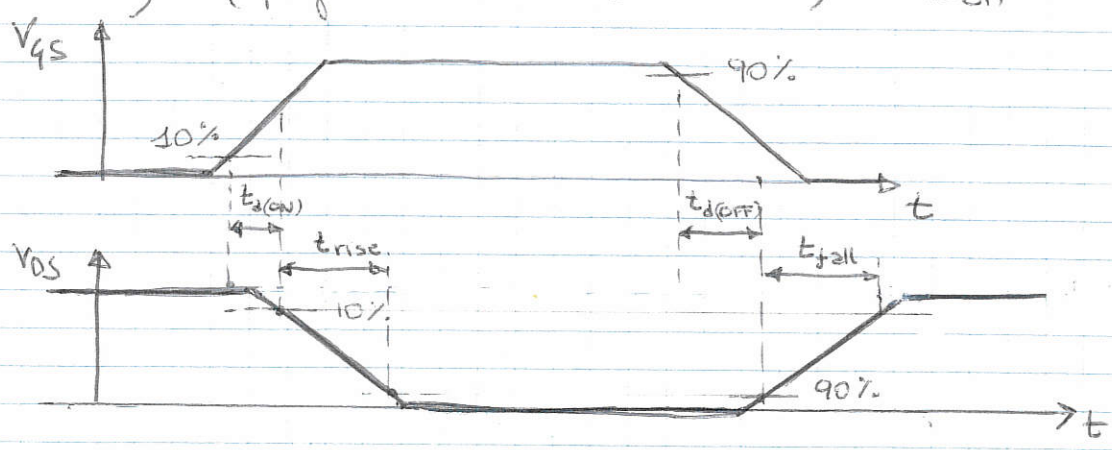
Resistenza statica drain-source:

$$R_{DSON} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T - V_{DS})} \quad \text{Typ } < 1 \Omega$$



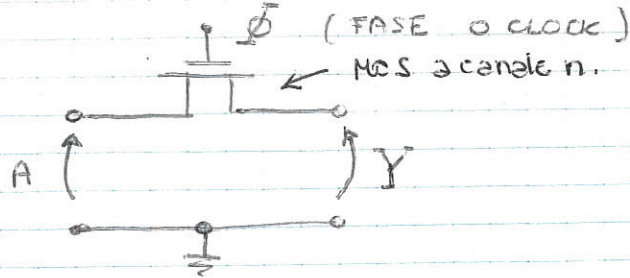


Quando applichiamo  $V_{GS} > V_T$  richiamiamo elettroni all'interfaccia ossido-silicio in numero tanto maggiore quanto più alta è la tensione applicata. Quando abbassiamo la tensione  $V_{GS}$  sotto  $V_T$  non "spegniamo" istantaneamente l'interruttore poiché abbiamo dato tempo agli elettroni di defluire verso il source ed il drain  $\Rightarrow$  la tensione  $V_{GS}$  da applicare per chiudere l'interruttore risulta da un compromesso tra la velocità di spegnimento ed il valore di  $R_{on}$  che si desidera.



i transistori MOSFET possono essere impiegati come interruttori per consentire o meno il passaggio di un segnale lungo una certa linea.



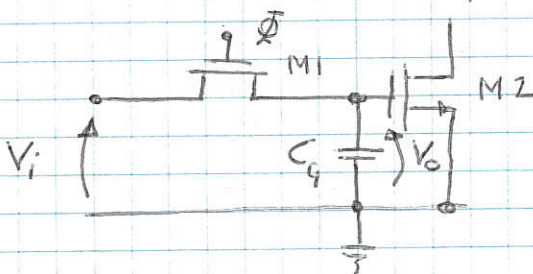


SCHEMA DI PRINCIPIO DI  
UNA PORTA DI TRASMISSIONE

Se  $\Phi < V_T \Rightarrow$  nessun segnale in A può essere trasferito in uscita ad Y poiché il MOSFET si comporta come interruttore aperto

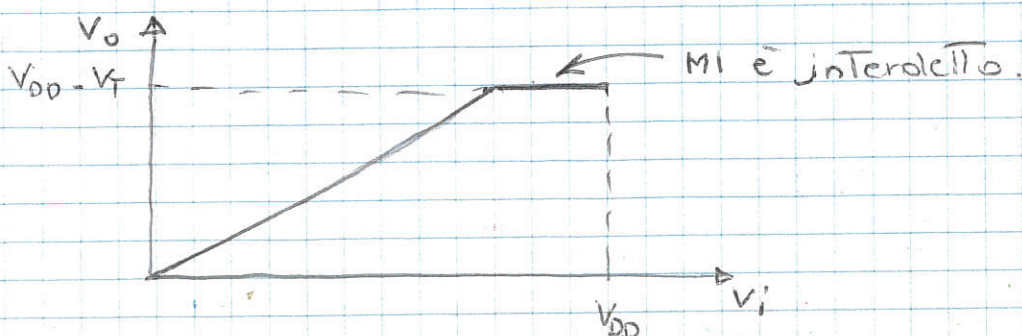
Se  $\Phi > V_T \Rightarrow$  il MOSFET si comporta come porta bidirezionale, se  $A > Y$  la corrente fluisce da A ad Y ed A non il contrario, viceversa accade se  $Y > A$ .

Consideriamo un caso più realistico: (fare il timing ne c'è tempo)



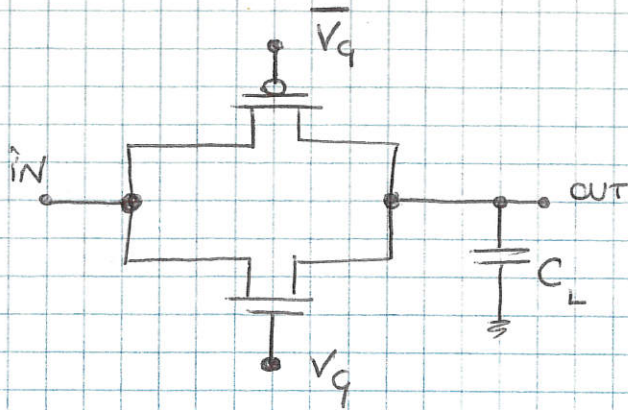
$V_i = V_{DD}$  e  $C_g$  inizialmente scarica.

$\Phi$  al livello alto pari a  $V_{DD} \Rightarrow$  M1 conduce e carica la capacità  $C_g$ . Tuttavia non può caricarla al valore massimo  $V_{DD}$  poiché quando la tensione ai capi della capacità raggiunge il valore  $V_{DD} - V_T$  il MOSFET M1 comincia a spegnersi ( $V_{GS} = V_T$ ) e non è in grado di caricare ulteriormente la capacità.





## \* PORTA DI TRASMISSIONE CMOS



- $V_{IN} = 0$  oppure  $5V$   
 $V_g = 0$ ;  $\overline{V_g} = 5V$

Qualsiasi sia il valore di  $V_{out}$  tra  $0$  e  $5V \Rightarrow$  il gate dell'NMOS non è mai positivo rispetto ad alcun terminale

$\hookrightarrow$  NMOS interdetto.

$\Rightarrow$  il gate del PMOS non è mai negativo rispetto ad alcun terminale

$\hookrightarrow$  PMOS interdetto



Terminali di ingresso e uscita scollegati: qualsiasi sia il valore della tensione di ingresso, essa non influenza quella della tensione di uscita

- $V_{IN} = 0V$   
 $V_g = 5V$ ;  $\overline{V_g} = 0V$

NMOS: lato ingresso la tensione di gate è maggiore della tensione del canale  $\Rightarrow$  si forma canale conduttivo  $\Rightarrow$  NMOS on

$I_D = 0 \Rightarrow V_{DS} = 0 \Rightarrow$  MOS ohmico e  $V_{OUT} = 0$

PMOS è interdetto

- $V_{IN} = 5V$   
 $V_g = 5V$ ;  $\overline{V_g} = 0V$



Supponiamo inizialmente  $V_{out} = 0V \Rightarrow$  lato ingresso, l'NMOSFET non ha canale, lato uscita c'è canale  $\Rightarrow$  scorre una corrente di drain (pari alla corrente di istaurazione) che carica la capacità fino a che  $V_{out} = V_G - V_{Tn}$ , dopodiché il NMOS si spegne e la corrente si annulla.

Ma anche il PMOS era acceso ed ha contribuito alla carica della capacità: quando  $V_{out} = V_G - V_{Tn}$  il PMOS è ancora acceso e continua a caricare la capacità fino al valore  $V_{in}$ , quando la sua  $V_{ds}$  si annulla e, quindi, la corrente si annulla.



In una porta di trasmissione CMOS:  $V_{out} = V_{in}$

- $V_G = 5V$ ,  $\bar{V}_G = 0V$   
 $V_{in} = 0V$

Supponiamo inizialmente  $V_{out} = 5V$

NMOS: è acceso e percorso da corrente fino a che  $V_{out} = 0V$

PMOS: è acceso e percorso da corrente fino a che  $V_{out} = V_{Tp}$ , dopodiché si interdice e la scarica è garantita dall'NMOS



RISPETTO AD UNA PORTA DI TRASMISSIONE A SINGOLO MOSFET

- 😊  $V_{out} = V_{in}$ , quando la "porta" è in conduzione
- 😊 se usata come interruttore anche analogico, la  $R_{on}$  risulta meno dipendente dall'ampiezza del segnale di ingresso
- 😞 Richiede contemporaneamente il comando  $V_G$  ed il suo complementare per poter funzionare correttamente.

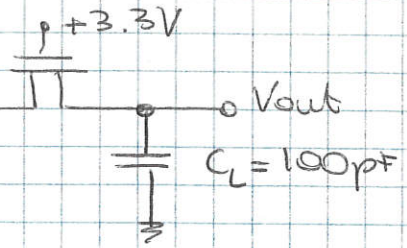


## Tema d'esame del 16/09/03

Si consideri il circuito in Figura, in cui il MOSFET di tipo n ha una tensione di soglia  $V_T = 0.8V$

a) Determinare la tensione a cui si trova l'uscita quando  $V_{in} = 0V$  (esauriti, transistor)

b) Determinare la tensione a cui si trova l'uscita quando  $V_{in} = 3.3V$  (esauriti, transistor)



A regime nel MOS non può scorrere corrente

a.  $V_{in} = 0 \Rightarrow$  lato "ingresso" si ha canale poiché  $V_G = +3.3V$ ,  $V_{in} = 0V$  e la soglia è pari a  $0.8V$   
 $\hookrightarrow$  il MOS è ON, per non avere corrente che fluisce  $V_{DS} = 0 \Rightarrow$  MOS ohmico e  $V_{out} = 0$

b.  $V_{in} = 3.3V \Rightarrow$  lato "ingresso" non c'è canale  
 $\hookrightarrow$  il MOSFET può essere interrotto.

La tensione minima di uscita per cui non ci sia canale lato "uscita" è pari a  $V_{out} = V_G - V_T =$   
 $= +3.3V - 0.8V = +2.5V$

$\Downarrow$   
L'uscita si trova a  $+2.5V$ , infatti nella fase di carica della capacità, quando la tensione di uscita raggiunge  $+2.5V$ , il MOSFET si spegne, quindi si annulla la corrente che carica la capacità e dunque  $V_{out} = +2.5V$