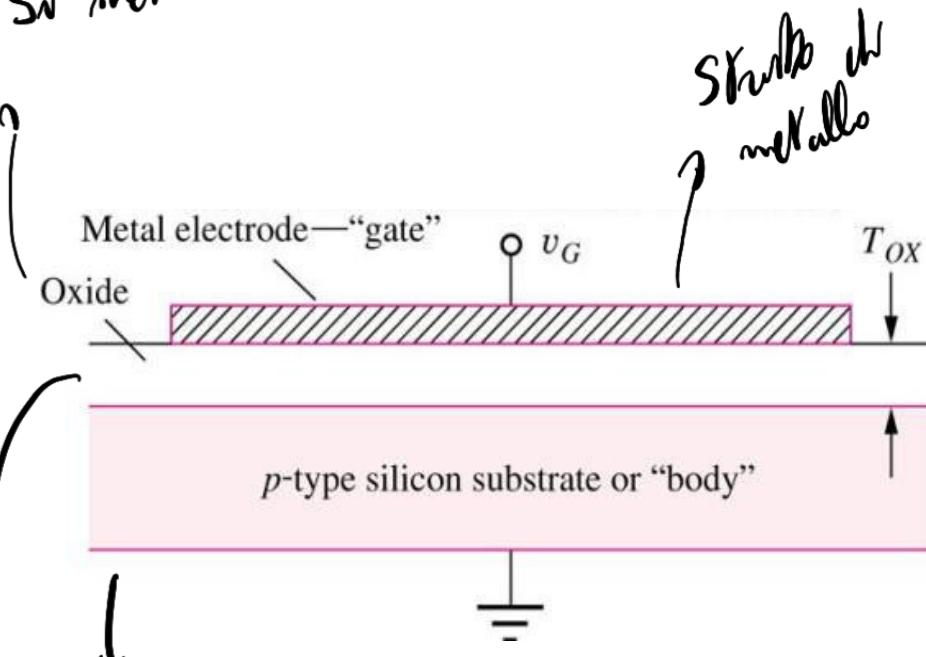


# Struttura del condensatore MOS

Transistor

↳ Metallo - ossido - Semiconduttore

Si mette nel forno per ossidare



Corpo o substrato del Transistor

100 nanometri ( $10^{-9}$  m)

ha costante dielettrica

- Primo elettrodo - Gate: realizzato con materiali a bassa resistività come metallo o silicio policristallino
- Secondo elettrodo - Substrato o Body: semiconduttore di tipo n o p
- Dielettrico - Diossido di silicio: isolante di buona qualità tra gate e substrato.

Transistor a effetto di campo (MOSFET)

Transistor: Transfer Resistor. Trasferisce segnale da un circuito a bassa resistenza ad alta resistenza.

Li possiamo anche usare per rappresentare b.t.

Ossido molto qui dove essere molto luccio (no impurità).

La corrente drain non passa. Altissimo bias cap.  
Ma visto come condensatore, ha 2 armature.

Punto da condensatore drain (q=0 in armatura). Se metto fermi,  
la batteria prende elettroni che mi dà e li porta dall'alto.

Quando E ad o.v. c'è lo stesso delle batterie e fermi tutto.

La corrente non passa all'inverso. Se cambio tensione cambia  
verso, quindi ho corrente alternata.

Now: Applico tensione positiva sul gate (Morsello sopra) rispetto  
allo zerro.

Un potenziale positivo rende ad attivare le cariche negative nel  
substrato P- ( $p^3N_A$ ),  $\epsilon = \frac{m_e^2}{P}$ . Abbiamo molte lacune e pochi conduttori.

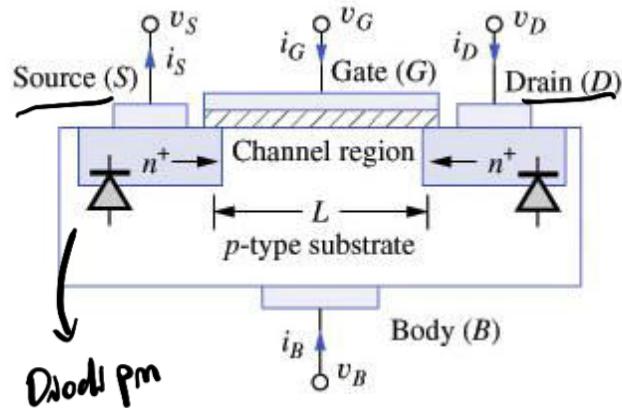
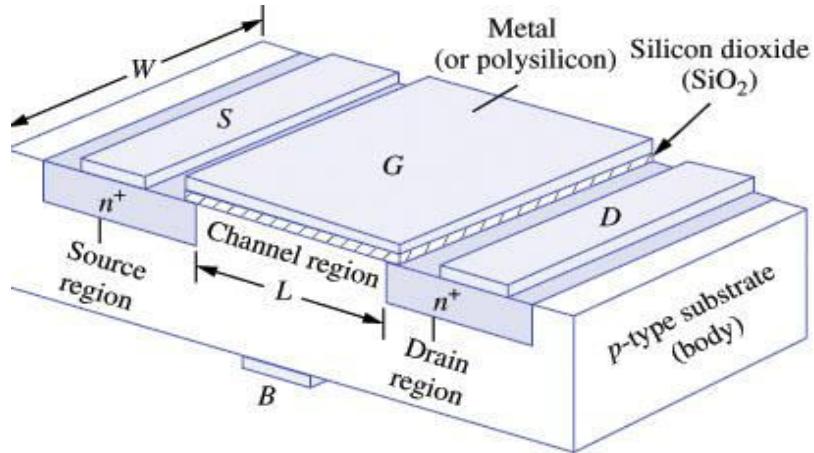
Le lacune sono negative, gli elettroni si addensano sul dielettrico.  
Tensione positiva: un effetto di curva condensatore: cariche negative  
su dielettrico.

Si accumulano elettroni, si crea uno strato di carica negativa molto  
debole: STRATO DI INVERSIONE.

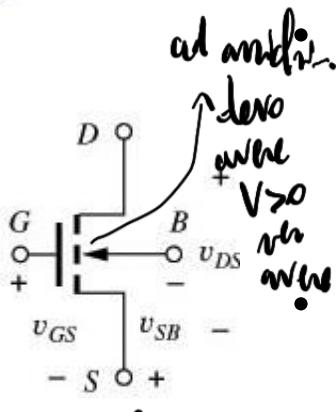
Poiché abbiamo messo potenziale 20 volt su questo lato c'è  
elettroni: Strato ricco di elettroni. Si vede quanto V supera un  
certo sogno: dipende da quanto spesso, ma è questo che  
è Es dell'errore.

Così ce ne faccio?

# Transistore NMOS: Struttura



Suppongo che mettiamo 2 diodi



Simbolo  
circolare

- Dispositivo a 4 terminali: Gate(G), Drain(D), Source(S) e Body(B).
- Le regioni di source e drain formano giunzioni *pn* con il substrato.

*v<sub>SB</sub>, v<sub>DS</sub> e v<sub>GS</sub> sono sempre positive nelle normali condizioni di funzionamento*  
*v<sub>DS</sub> > 0*  
*v<sub>GS</sub> > 0*  
*v<sub>SB</sub> > 0*  
*v<sub>DS</sub> < v<sub>GS</sub>* e *v<sub>GS</sub> < v<sub>SB</sub>* per polarizzare inversamente le giunzioni *pn*

↳ controlli: Transistor NMOS a canale N

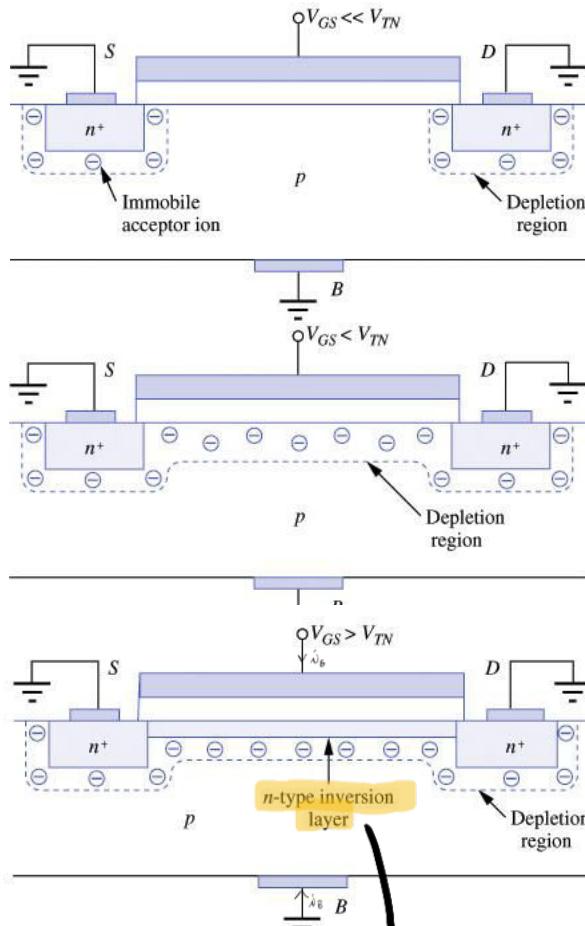
Se creo canale, cioè  $V_g$  metto tensione grande, SW

crea regione di elettroni tra drain e source, e se

applico un DDP tra source e drain e non faccio  
accendere drain (non faccio pressione corrente verticalmente)

Ciò mette a massa il substrato, abbiamo polarizzaz.  
inversa. No corrente.

# Transistore NMOS: Analisi qualitativa del comportamento I-V

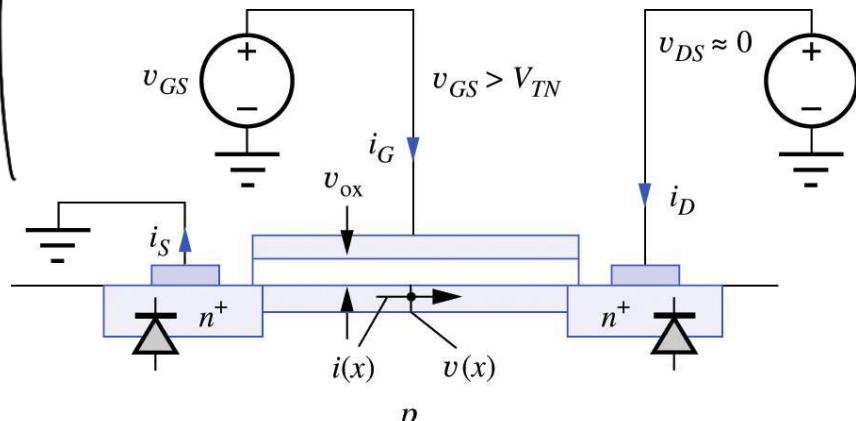


- $V_{GS} \ll V_{TN}$ : Passa solo una debole corrente di saturazione inversa.
- $V_{GS} < V_{TN}$ : Si forma una regione di svuotamento sotto il gate che si unisce alle regioni di svuotamento di source e drain. Non c'è passaggio di corrente tra source e drain.
- $V_{GS} > V_{TN}$ : Si forma un canale tra source e drain. Se  $v_{DS} > 0$ , una corrente  $i_D$  fluisce tra drain e source
- $i_B = 0$  e  $i_G = 0$ .

↳ Maggioranza di elettroni in tipo p.

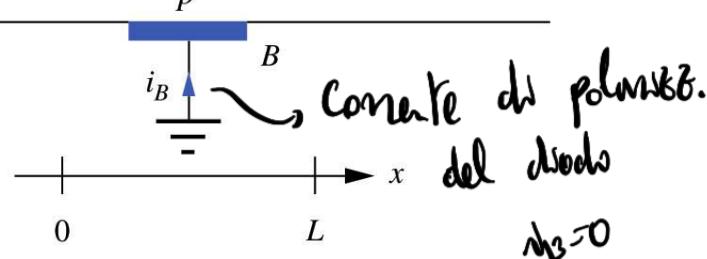
# Transistore NMOS: Caratteristiche della regione di triodo

Ora mettiamo a massa la s



Perciò

ns e nd  
hanno verso  
opposto.



$$i_D = K_n \left( v_{GS} - V_{TN} - \frac{v_{DS}}{2} \right) v_{DS}$$

Non esattamente

lineare, ma comunque

$V_{TN}$  = tensione  
di soglia

per  $v_{GS} - V_{TN} \geq v_{DS} \geq 0$  ?

dove,  $K_n = K_n' W/L$

$$K_n' = \mu_n C_{ox}'' (\text{A/V}^2)$$

$C_{ox}'' = \epsilon_{ox} / T_{ox}$  capacità per unità  
di lunghezza

$\epsilon_{ox}$  = permittività  
dell'ossido (F/cm)

$T_{ox}$  = spessore dell'ossido  
(cm)

$v_{GS}$  (Tensione di gate), ma  
anche  $v_{DS}$  alla seconda potenza

Metto un collegamento 2 regioni anche di elettroni con lo stesso di dielettrico. Passa una corrente  $I(x)$ .

Ho un oggetto che fa fluire corrente tra due poli attraverso  
sotto di un verso.

NOTA: se aumenta tensione, aumenta elettroni. Resistenza cambia,  
se abbassa: ho più elettroni che portano la corrente.

RESISTORE CONTROLLABILE IN TENSIONE: Posso controllare la  
resistività. Con un elettrodo terzo (gire) controllo la resistenza

Se metto a massa il substrato, il diodo non si accende

Il substrato va tenuto a potenziale più basso.

Più fai fluire corrente, metti uno dei due a potenziale  
 $\geq 0$  (in questo caso) ho DDP che fa scomparire corrente.

(Corrente che passa dopo la resistenza del canale)

Spostando molto il canale da zero.

NOTA: è approssimabile con retta fino a un certo punto.

K parametru di conduttorità:  $K = K' \cdot \frac{W}{L}$

$\rightarrow$  legato alla mobilità degli elettroni

e alla capacità  
dell'ossido

$C_{ox}$ : capacità per  
unità di superficie

$C_{ox}$  = capacità per unità di superficie

$C_{ox} \cdot WL =$  Capacità Totale

$K'$  dipende da mobilità, capacità dell'osso per unità di area.  
( costante dielettrica e spessore)

Parametri ma modificabili facilmente.

$\frac{W}{L}$  rispetto d'aspetto.

$N_D$  è una parabola con termi che dipendono da parametri fisici e geometrici ( $k_m$ ) e dipende da  $V_{TN}$ .

Se  $V_{DS}$  è piccolo, offerta valore lineare.

$$V_{DS}^2 \rightarrow 0$$

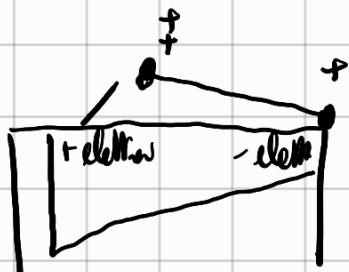
Se  $V_{DS} \ll 1$ .

Regola corrente tra due morsetti con  
morsetti aggiuntivi.

lineare rispetto a?

Se  $V_{DS} \rightarrow 0$  curva informe. Se  $V_{DS}$  cresce, riduce DDP

ma top e bottom:



Con tensione positiva sufficientemente grande, c'è sfurto di inversione.

Dopo l'inversione sempre contropolarità: V<sub>S</sub> più piccolo di V<sub>T</sub> ma di altro.

Applicando tensione tra Drain e Source, c'è corrente!  
(Corrente)

Segue per tensione precede le regole della resistenza.

V<sub>SB</sub> < V<sub>GS</sub>?

B e S sono alla stessa tensione. Si muove Source come punto di riferimento.

Se c'è passaggio di corrente c'è una caduta di tensione.

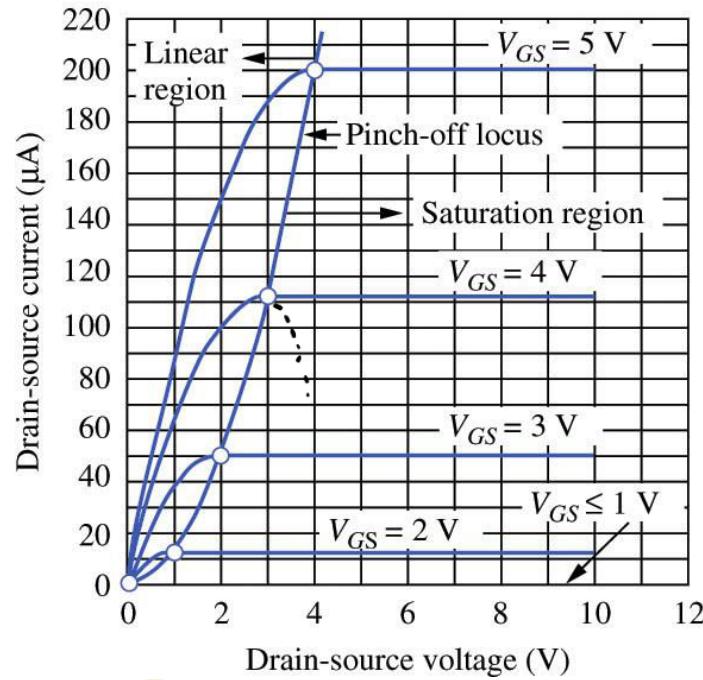
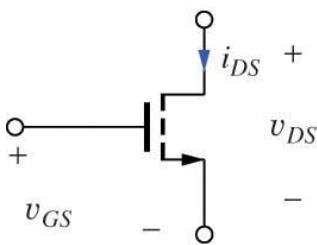
A sinistra c'è sempre massa, a destra no. Avremmo meno addensamento di elettroni.

Diodi acesi: Corrente verticale che va da S a Massa (B) e da B a nua.  
Scopo, corrente catodizzata da tensione.

Alla fine idea: Creare un resistore regolabile in situaz. non estrema.

Chiamiamo drain quello a potenziale maggiore.

# Transistore NMOS: Caratteristiche della regione di triodo (cont.)



- Le caratteristiche di uscita sembrano essere lineari.
- Il FET si comporta come un resistore connesso tra source e drain controllato dalla tensione gate-source

Resistenza  $R_{on}$  mosfet.

$$R_{on} = \left[ \frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right]_{v_{DS} \rightarrow 0} = Q_{-pt} \cdot \frac{1}{W} = \frac{1}{K_n \cdot L (V_{GS} - V_{TN} - V_{DS})}_{v_{DS} \rightarrow 0}$$

Punto di lavoro

$$= \frac{1}{K_n \cdot L (V_{GS} - V_{TN})}$$

Converte draw e source al vettore del potenziale.

Sono molti di parabola che normalmente sono linearizzabili.  
NOTA: la parabola non scende: c'è differenza da modello nato.

Vale fino a punto pinch-off (stagnazione): aumentando la tens. DS,  $S_N$  ha effetto di strate: viene stremata form del canale. Diametralmente DOP av capi del canale. Se  $S_N$  esaglia con tensione (tensione per la quale esiste curva  $V_{GS} = V_{DS} - V_{TN}$ , il canale scompare)

In teoria non ci sono elettron.  $N=0$ ? No. Si crea esp. dinamico. Se la corrente scende salirebbe il potenziale, quindi  $S_N$  arriva a condiz. di corrente quasi costante).

Lungo dei punti di pinch-off:  $V_{DS} = V_{GS} - V_{TN}$

$\Rightarrow$  Regione di saturaz.  $\Rightarrow N=C$

Regione lineare/ di trans.  $\Rightarrow$  dove  $N$  parabolico.

## RIEPILOGO

$V_{GS}$  superiore a sogno che dipende da caratter. dei materiali, si crea zona di inversione che mette in comunic. Di S.

Corrente ma segue legge di Ohm. Lo fa fino al punto di sfrangatura.  $\rightarrow$  Dopo la corrente dovrebbe calare, ma salire a un valore quasi costante.

Nota: Se anche sempre di più aumenta la reg. gravitazionale dei due.

$K_m = K_m' \frac{W}{L} \Rightarrow$  Se aumenta molto  $V_{GS}$ , tende ad andare in catoptrio di doppia dx

Usiamo la proprietà di invertibilità: fu possibile convertire o no.

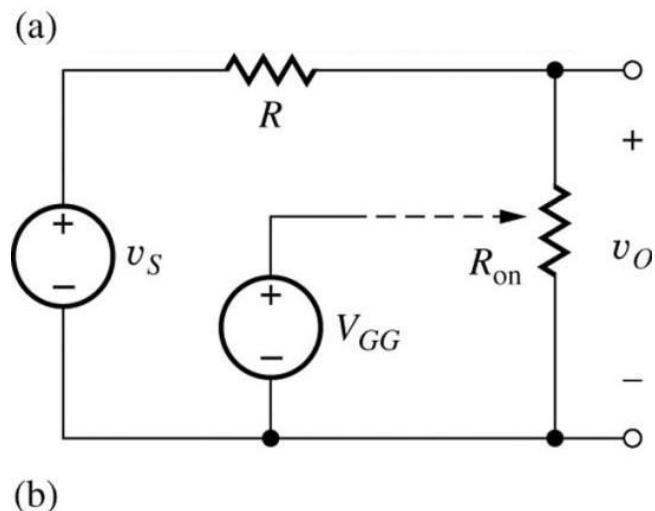
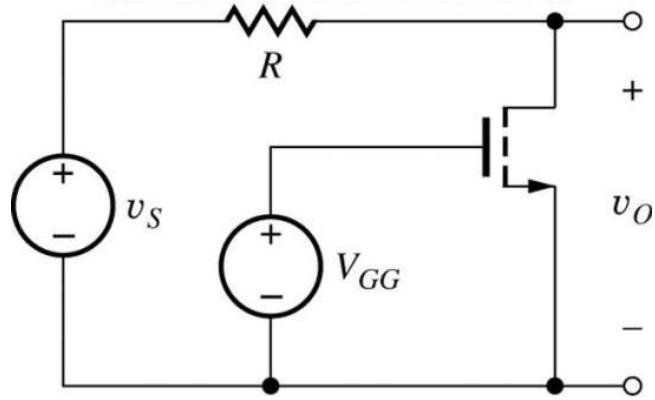
Diodo ha reg. di modulazione + grande e magra corrente. La il  
Si riduce.  $\Rightarrow$  il sale.  
Modulatore.

Usiamo le proprietà di interruttore: fa passare corrente o no.

RICORDA:

- 3 regioni di funz:
  - Spento
  - Accesso ma non regione lineare + linear.
  - Acceso

# MOSFET come resistore controllato in tensione



Esempio : Attenuatore controllato in tensione

$$\frac{v_O}{v_S} = \frac{R_{on}}{R_{on} + R} = \frac{1}{1 + K_n R (V_{GG} - V_{TN})}$$

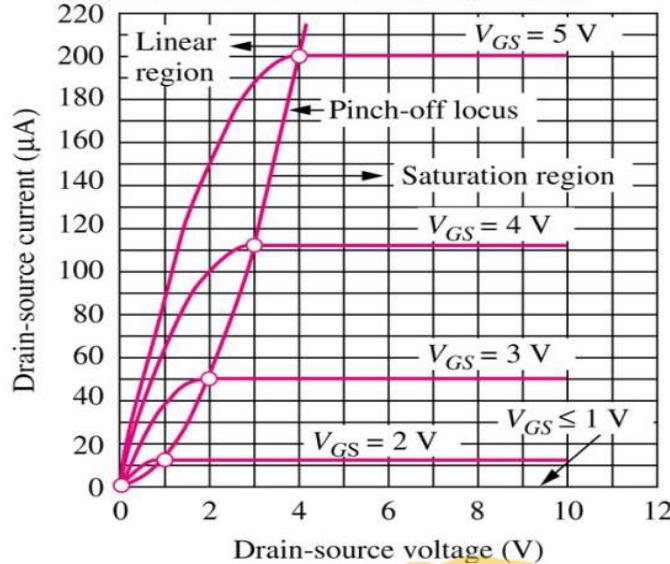
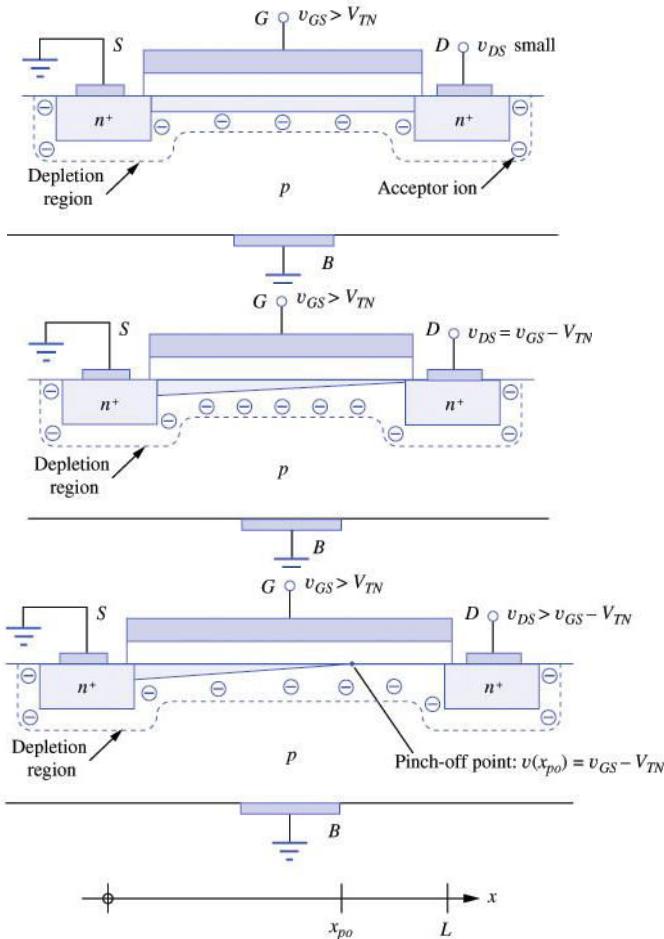
Se  $K_n = 500 \mu\text{A/V}^2$ ,  $V_{TN} = 1\text{V}$ ,  $R = 2\text{k}\Omega$  e  $V_{GG} = 1.5\text{V}$ , quindi,

$$\frac{v_O}{v_S} = \frac{1}{1 + 500 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} (2000\Omega)(1.5 - 1)\text{V}} = 0.667$$

Per rimanere nella regione di triodo,  
 $v_{DS} \leq v_{GS} - V_{TN}$  o  $v_O \leq V_{GG} - V_{TN}$

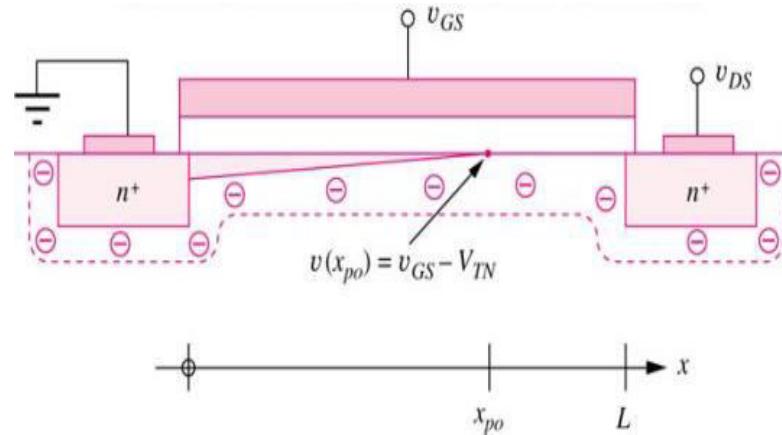
$$0.667 v_S \leq (1.5 - 1)\text{V} \quad \text{o} \quad v_S \leq 0.750\text{V}$$

# Transistore NMOS: Regione di saturazione



- Se  $v_{DS}$  cresce oltre il limite della regione di triodo, scompare lo strato di inversione, condizione anche detta strozzamento del canale (pinch-off).
- La corrente satura ad un valore costante, indipendente da  $v_{DS}$ .
- Il funzionamento in regione di saturazione è utilizzato principalmente per l'amplificazione analogica.

# Transistore NMOS: Regione di saturazione (cont.)



$$i_D = \frac{K}{2} \frac{n}{L} \left( v_{GS} - V_{TN} \right)^2 \quad \text{per} \quad v_{DS} \geq v_{GS} - V_{TN}$$

$$v_{DSAT} = v_{GS} - V_{TN}$$

È anche chiamata tensione di saturazione o di pinch-off

# Transconduttanza di un dispositivo MOS

Conduttanza tra drain e source rappresentata dalla tensione del GS.

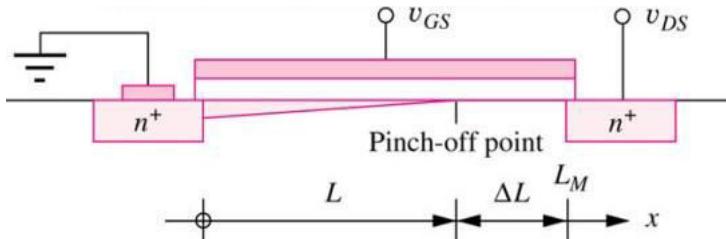
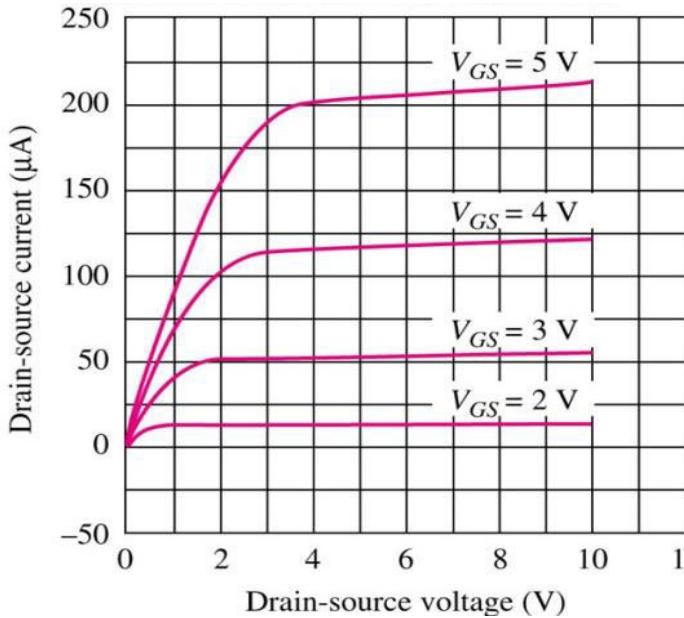
- La transconduttanza lega i cambiamenti nella corrente di drain a variazioni nella tensione gate-source

$$g_m = \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{Q-pt}$$

- Prendendo la derivata dell'espressione della corrente di drain in regime di saturazione,

$$g_m = K_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN}) = \frac{\frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TN}}}{\frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TN}}}$$

# Modulazione della lunghezza di canale



- Quando  $v_{DS}$  cresce oltre  $v_{DSAT}$ , la lunghezza della regione di svuotamento,  $\Delta L$ , aumenta determinando una riduzione di  $L$ .
- $i_D$  cresce leggermente con  $v_{DS}$  invece di rimanere costante.

$$i_D = \frac{K'n'W}{2L} (v_{GS} - V_{TN})^2 (1 + \lambda v_{DS})$$

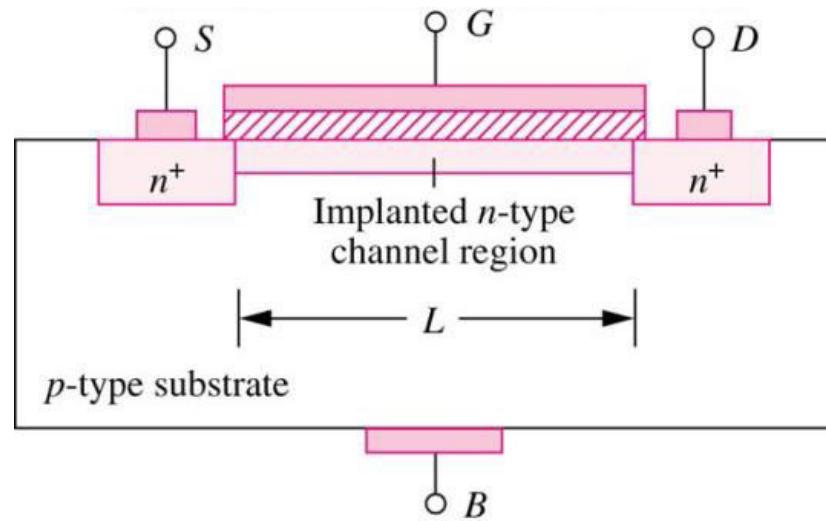
*Normalizz.  
rappresentato*

$\lambda$  = parametro di modulazione della lunghezza di canale

Lo descrivo con  $\lambda$

Regione di svuotamento (non c'è canale)  
Pey. di svuotamento e regione parz.

# MOSFET a svuotamento



- Transistori NMOS con  $V_{TN} \leq 0$
- Viene utilizzato un processo di impiantazione ionica per creare una regione di tipo n che collega le regioni di source e drain
- Per  $v_{GS}=0$  la corrente di drain è diversa da zero, e per interdire il dispositivo è necessaria una  $v_{GS}$  negativa.

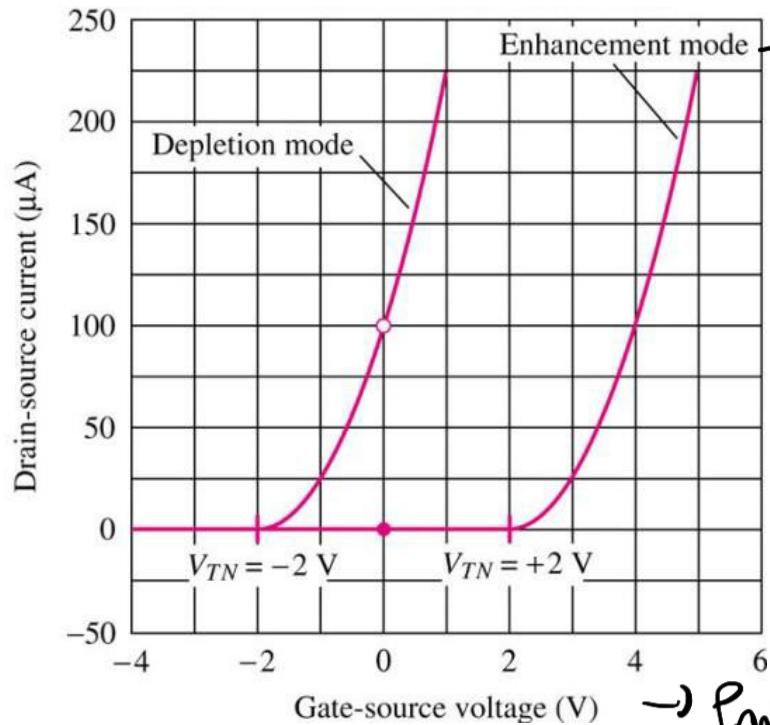
Si crea un campo in che esiste già. Ma già curvo.

Per evitare passaggi di corrente: Tensione negativa su gomme:  
dove cacciano gli elettroni.

Regione di soglia negativa. Il resto è tutto uguale.

# Caratteristiche di trasferimento dei MOSFET

Dipende da  $V_{GS}$ .



→ Tensione di soglia  
positiva.

→ Punto: DS tensioni: Per ogni

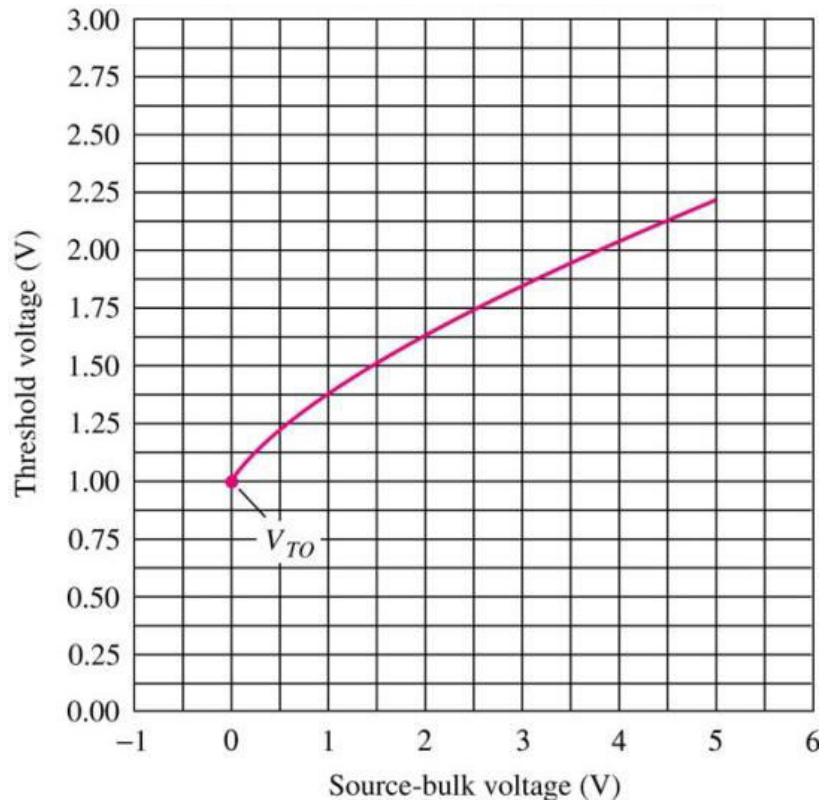
- Grafico della corrente di drain rispetto alla tensione gate-source per una tensione drain-source definita

valore di

$V_{GS}$  cambia  
grado,

Non c'è corrente finché non arriva a una soglia.  
Riflettiamo l'onda al source perché in molte condizioni si trova  
a mano.

# Effetto body



- Valori di  $v_{SB}$  diversi da zero modificano la tensione di soglia, causando l'effetto body che puo' essere descritto da

$$V_{TN} = V_{TO} + \gamma \left( \sqrt{v_{SB} + 2\phi_F} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$

dove

$V_{TO}$  = Valore della tensione di soglia per  $V_{TN}$  (V)

$\gamma$  = parametro relativo all'effetto body ( $\sqrt{V}$ )

$2\Phi_F$  = parametro relativo al potenziale superficiale (V)

Per ora abbiamo visto che c'è un segnale.

Sia aggiunto ulteriore al volt. Ma  $V_{IN}$  non è cost.

Dipende da 3 parametri: 2 fisici (qualità ossido, concentraz.)  
↓ ohmiche... Non modificabili).

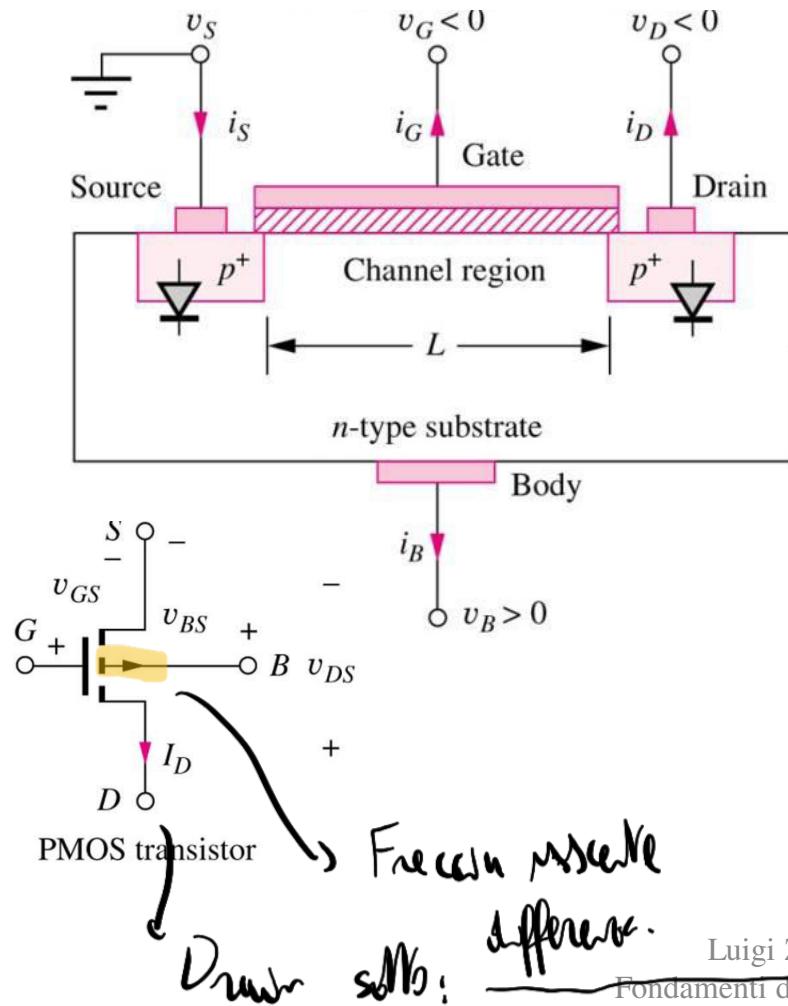
$$\propto e^{2\frac{V}{V_T}}$$

3^ variabile: dipende da come mantengono costanti. VSB. Se è 0,  
 $V_{IN}$  è due a massa,  $V_{IN} = V_{S0}$  costante.

$V_{IN}$  cresce con tensione source Body: Se ammetta polarizz, riduce effettiva della tensione positiva sulla gate. Per accendere il canale deve aumentare di più.

Vi ostacola l'effetto di creazione. Tensione positiva ai limiti, ostacolo è invece più potente per accendere le carene. Come ad esempio.

# Struttura duale: Transistori PMOS ad arricchimento: Struttura



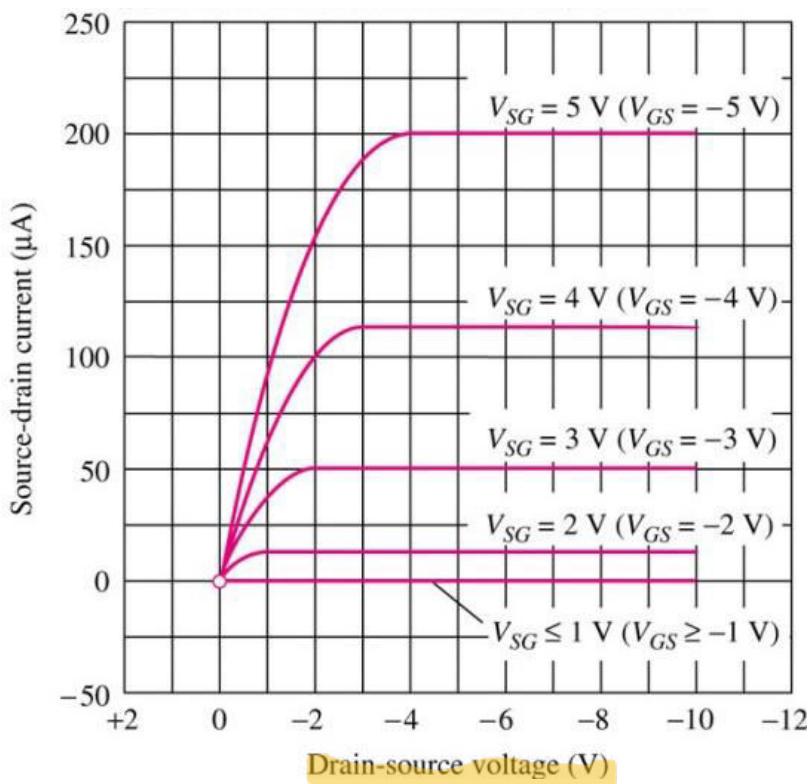
- Regioni di source e drain di tipo *p* in un substrato di tipo *n*.
- È necessario che  $v_{GS} < 0$  per creare uno strato di inversione di tipo *p* nella regione di canale
- Per il flusso di corrente,  $v_{GS} < v_{TP}$
- Per mantenere una polarizzazione inversa sulle giunzioni di source-substrato e drain-substrato,  $v_{SB} < 0$  e  $v_{DB} < 0$
- All'aumentare della tensione bulk-source  $V_{TP}$  diventa ancora più negativa

Substrato a potenziale più alto: non abbina alcunione.

Nota: V<sub>TSS</sub>: tensione di soglia negativa.

Famiglia di curve ha stesso andamento.

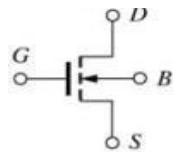
# Transistori PMOS ad arricchimento: Caratteristiche di uscita



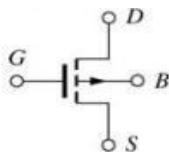
- Per  $V_{GS} \geq V_{TP}$  il transistore è interdetto
- Per valori ancora più negativi di  $V_{GS}$ , la corrente di drain cresce.
- Il PMOS si trova nella regione di triodo per bassi valori di  $V_{DS}$  e nella regione di saturazione per valori elevati.

Sarà invertito per vedere Version 20.  $\rightarrow$  Tensione di soglia nulla al valore assoluto.

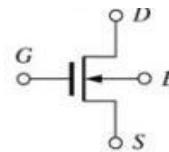
# Simboli circuitali del MOSFET



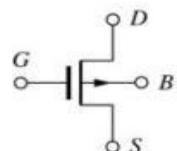
(a) NMOS enhancement-mode device



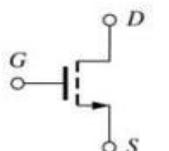
(b) PMOS enhancement-mode device



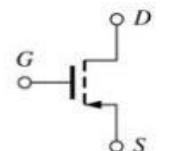
(c) NMOS depletion-mode device



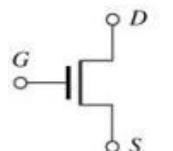
(d) PMOS depletion-mode device



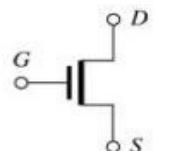
(e) Three-terminal NMOS transistors



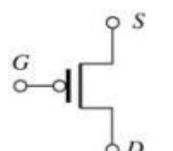
(f) Three-terminal PMOS transistors



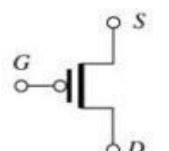
(g) Shorthand notation—NMOS enhancement-mode device



(h) Shorthand notation—NMOS depletion-mode device



(i) Shorthand notation—PMOS enhancement-mode device



(j) Shorthand notation—PMOS depletion-mode device

per il canale c'è.

\* Prima di mettere nel circuito.

- (g) e (i) sono i simboli maggiormente utilizzati nel progetto VLSI.
- I dispositivi MOS sono simmetrici → Non ha chi è S o D
- In un NMOS, il drain corrisponde alla regione  $n^+$  che si trova a potenziale maggiore
- In un PMOS il drain corrisponde alla regione  $p^+$  che si trova a potenziale minore

Quando il drain è  
connesso al substrato.

Non c'è vantaggio di  $V_{DS}$ .

# Capacità interne nei dispositivi elettronici

- Limitano le prestazioni ad alta frequenza del dispositivo elettronico a cui sono associate.
- Limitano il tempo di commutazione dei circuiti nelle applicazioni digitali
- Negli amplificatori limitano l'intervallo di frequenze a cui l'amplificazione assume valori adeguati  
*, punto di lavoro*
- Le capacità nei MOSFET dipendono dalla regione di funzionamento e sono funzione non lineare delle tensioni sui terminali del dispositivo

Tanti elementi capacitorsi tra i morsetti che si vengono a creare.

Alcune fisse, altre dipendono da regione di sviluppo.

Cancello di sviluppo non è fisso: Capacità dipende da quelli.

Quantità di elementi reattivi che dipendono dalla regione di funzionamento.

EFFETTO: Modificare i fronti dei segnali applicati.  $\Rightarrow$  CIRCUITI DIGITALI: Come i segnali variano quando vengono elaborati, questi elementi reattivi influiscono sul tempo di commutazione. Sulla velocità di risposta.

Elementi reattivi hanno importanza nella def. di velocità di commutazione: liberano la velocità di elaboraz. dei dati.

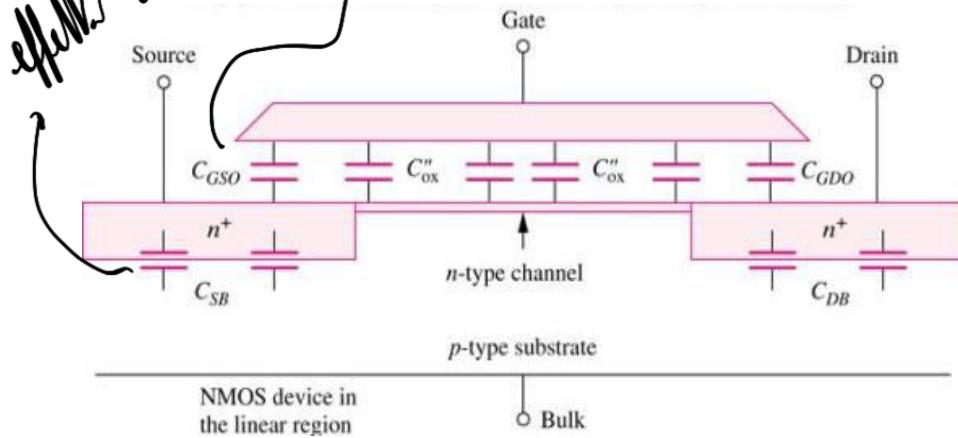
Se usano MOSFET in diversi punti di lavoro, come risolvere?

Per ridurre capacità interne dovendo trasmettere parallelo con quelle dei fili di interconnessione. Se C trascurabile, effetto contenuto.

Capacità di gate dipende strettamente da regione di sviluppo.

# Capacità del transistore NMOS: Regione

*effetto inversione  
tra gate e canale di triodo*



$$C_{GS} = \frac{C_{GC}}{2} + C_{GSO} W = C_{ox}'' \frac{WL}{2} + C_{GSO} W$$

$$C_{GD} = \frac{C_{GC}}{2} + C_{GSO} W = C_{ox}'' \frac{WL}{2} + C_{GSO} W$$

$C_{ox}''$  = Capacità gate-canale per unità di area ( $F/m^2$ )

$C_{GC}$  = Capacità gate-canale totale

$C_{GS}$  = Capacità gate-source

$C_{GD}$  = Capacità gate-drain

$C_{GSO}$  e  $C_{GDO}$  = capacità di sovrapposizione ( $F/m$ )

# Capacità del transistore NMOS: Regione di triodo (cont.)

$C_{SB}$  = Capacità source-substrato

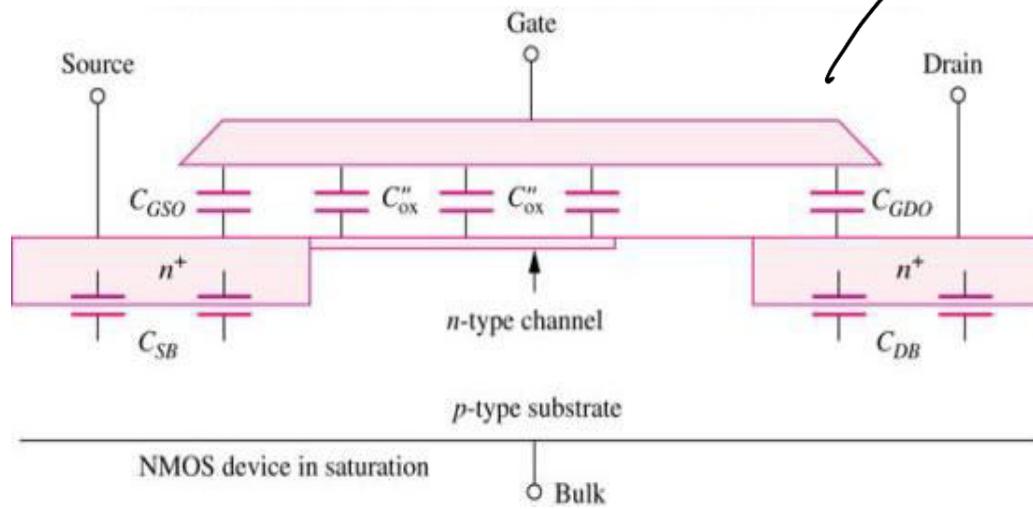
$C_{DB} = C_J A_D + C_{JSW} P_D$        $C_{DB}$  = Capacità drain-substrato

$A_S$  e  $A_D$  = Area di diffusione di source e drain

$P_S$  e  $P_D$  = Perimetro di source e drain

# Capacità del transistore NMOS: Regione di saturazione

*Nel caso di saturazione*

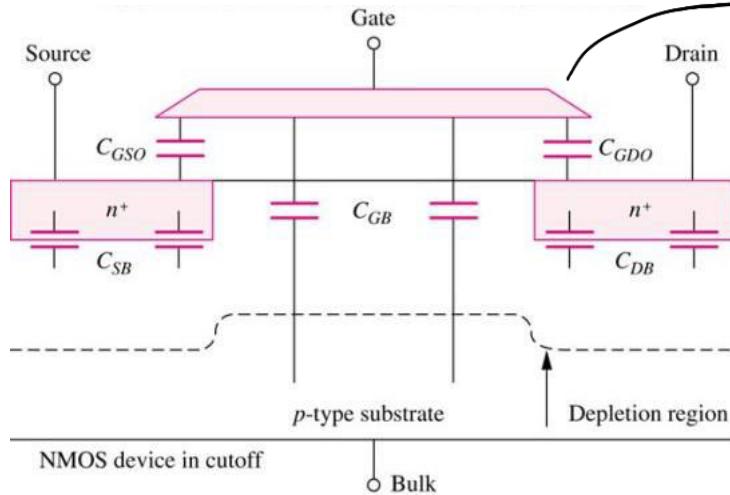


- Il drain non è più collegato al canale

$$C_{GS} = \frac{2}{3} C_{GC} + C_{GSO} W$$

$$C_{GD} = C_{GDO} W$$

# Capacità del transistore NMOS: Regione di interdizione



Capacità diretta verso il substrato.

- Non esiste alcun canale.

$$C_{GS} = C_{GSO}^W$$

$$C_{GD} = C_{GDO}^W$$

$$C_{GB} = C_{GBO}^W$$

$C_{GB}$  = Capacità gate-body

$C_{GBO}$  = Capacità gate-body per larghezza unitaria