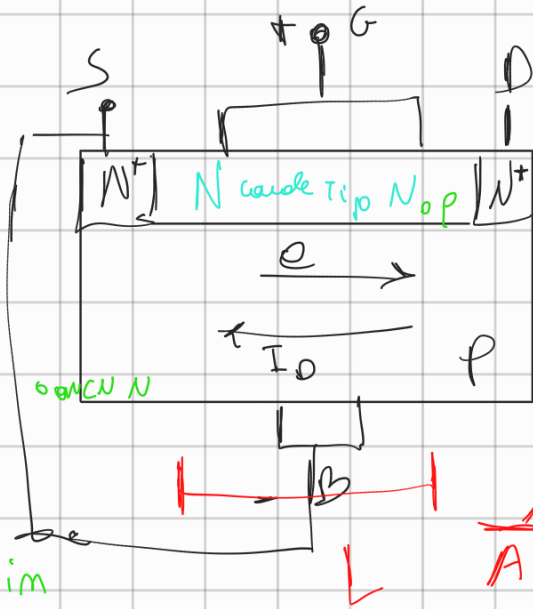


MOS di tipo P MOS a svuotamento



• e se vogliamo metterlo n?

MOS a canale N a SVUOTAMENTO

indipendente dalla V_{GS}

V_{GS} mi serve per

Non ho più V_{GS} che mi tirasse su gli elettroni mobili nel

Substrato P, per renderli disponibili alla conduzione tra D o S

è sempre in conduzione

• ora il dispositivo è sempre in conduzione. e se vogliamo spegnerlo?

anche con V_{GS} negativa è in conduzione

Applico $V \neq V_{TH}$

devo applicare una tensione negativa per interdirlo

• Sia L lunghezza e A spessore del canale N , W la profondità, la carica che induce nel dispositivo artificialmente sarà

carica accumulata sotto l'ossido

→ convenz. inversa nel canale n

• $Q = -N_D A W L$ carica che aggiungo con canale N

mentre + prima era

$$C \cdot V \quad C = C_{ox}'' W L$$

$$Q = -C_{ox}'' W L [V_{GS} - V_{TH}]$$

carica neg.

normale capacità MOS controllando V_{GS}

Se vogliamo in totale Q_{totale} , la riscriviamo così

carica che lo spegna con drogaggio N

$$Q = -C_{ox}'' W L \left[V_{GS} - \left[V_{TH} - \frac{N_D A}{C_{ox}''} \right] \right]$$

ho semplicemente

ho semplicemente

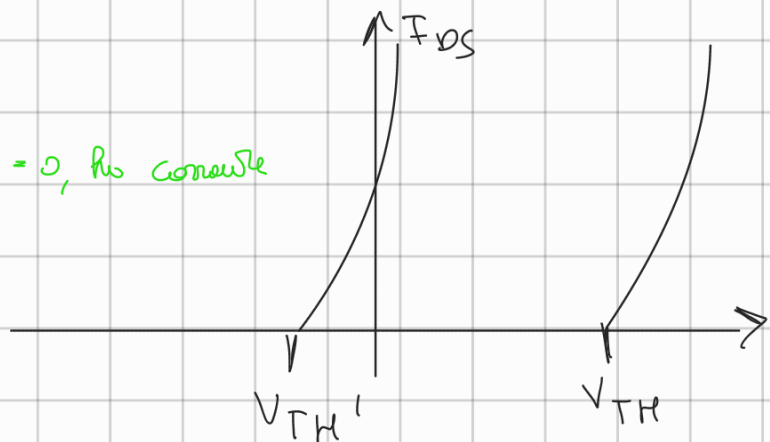
meno soglia

l'effetto del CANALE spesso sia spostare la soglia verso valori negativi

$$\Rightarrow Q^* = -Cox'' W L [V_{GS} - V_{TH}']$$

ho traslato sull'asse V_{TH}

Se $V_{GS} = 0$, ho corrente



mi porta la
traslazione verso SX

$$\Rightarrow I_{DS} = \frac{k_n}{2} (V_{GS} - V_{TH}')^2$$

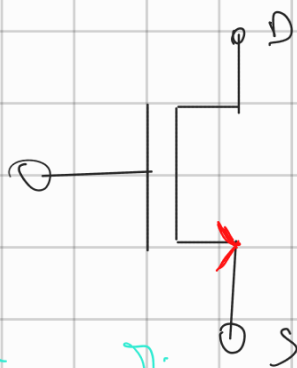
$$V_{TH}' = V_{TH} - \frac{N_D A}{Cox''}$$

Questa carica non fa altro che diminuire la tensione di soglia necessaria per la conduzione, c'ho più messo gli elettroni, non sto tirando su i portatori con V_{GS}

ZONA LINEARE / SATURAZIONE $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}'$ anche V_{TH} è negativo

Se $V_{GS} > 0$, io ho una corrente.

SIMBOLO



MOS a canale N a svuotam

ho soglia negativa,
carica n - non più nel
disegno

CONDIZ. di SATURAZIONE

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}'$$

$$\text{dove } V_{TH}' = V_{TH} - \frac{N_D A}{\epsilon}$$

$$(Cox'' = \frac{\epsilon}{d})$$

Se aumenti d o ϵ diminuisco sempre di più la V_{soglia}

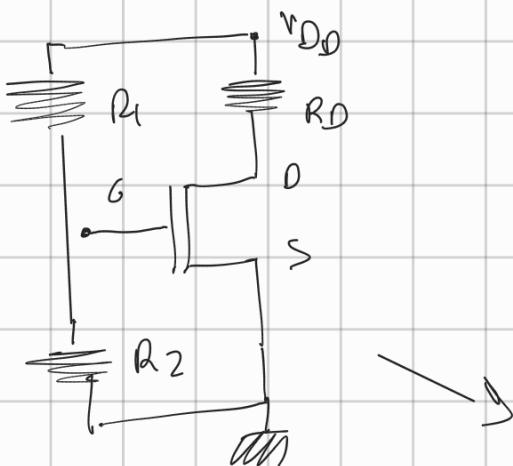
Se vuoi diminuire molto la tensione di soglia
stai forte con d molto grande dell'ossido
come spessore $\Rightarrow$ Se d o A cresce,
riduciamo ancora la soglia invece canali portatori

Polarizzazione MOS a SVUOTAMENTO
cioè applico al gate V_{GT} costante per metterlo in un punto di lavoro

voglio interline MOS a SVO TAVOLLO

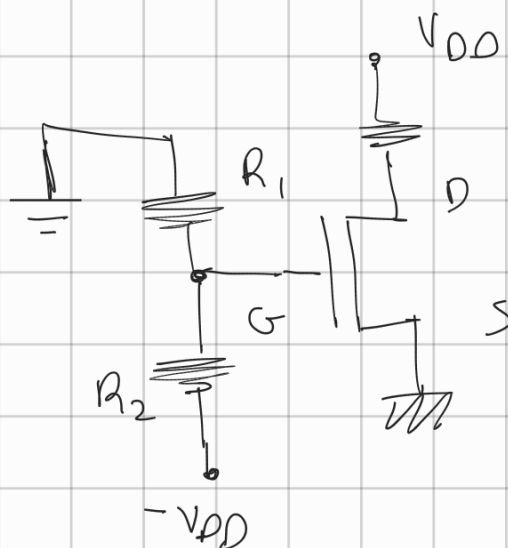
- Per interline, devo dargli una tensione negativa V_{TH} era $\sim 1V$. Se voglio interline il MOS

es.



è possibile INTERLINE MOS?

NO! la minima tensione che posso ricevere da questo circuito è 0, V_{DD} non è negativa

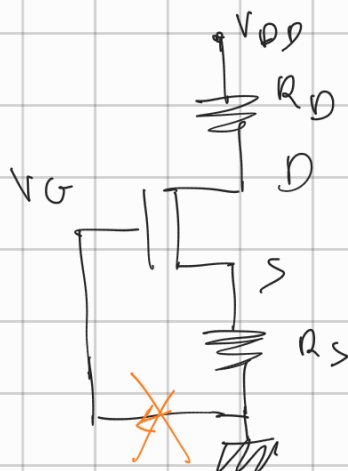


qui ho bisogno di

V_{DD} e $-V_{DD}$ rispetto ad un unico punto di massa

$$V_{GS} = \frac{-V_{DD} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

- altro modo per polarizzare MOS a SVO TAVOLLO



non si lavora
concente

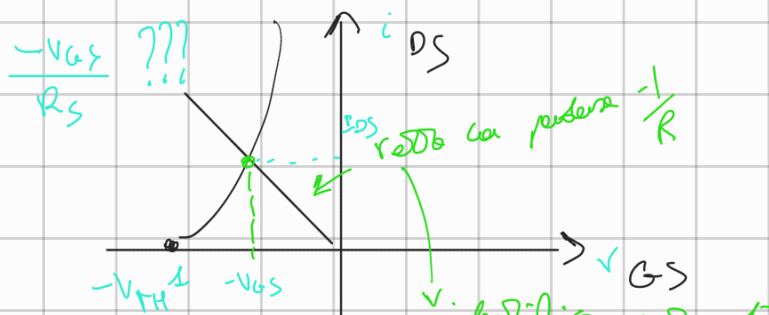
$$I_{DS} = \frac{-V_{GS}}{R_S}$$

$$V_G = V_{GS} = 0$$

$$V_{GS} = V_G - V_S$$

$$\Rightarrow -V_S = I_{DS} \cdot R_S$$

MOS a SVO TAVOLLO
a canale N



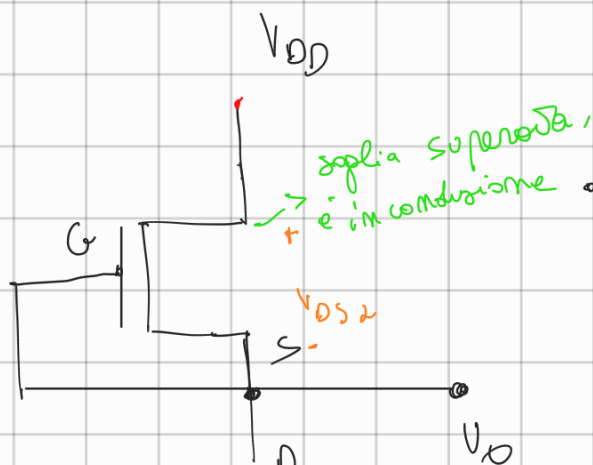
polarizzare il transistor con circuiti
nel gate sotto il SOURCE con MOS a SVO TAVOLLO.

• Insieme MOS SU VOTAM. e AZZUCCHIM. per fare un Carico ATTIVO

e se usati come carico attivo MOS a SVOTAMENTO?

PONTA NOT non Complementary
Sfrutto le proprietà

2
a SVOTAM

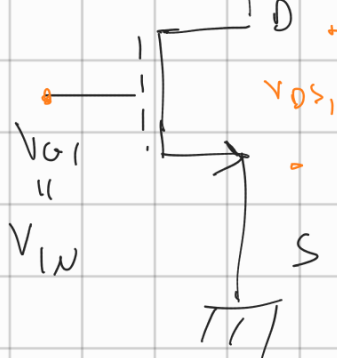


MOS 2 ha Gate e Source C.C. ; conduce sempre, solo che V_{GS} è 0, è a svotamento, sempre in conduzione MA NON SO IN CHE

regione è in sat. se $V_{DS2} > V_{GS2} - V_{TH2}$, $V_{GS2} = 0$

MOS 2 dipende da $I_{DS1} \Rightarrow$ se $V_{DS2} > V_{TH2}$

4
ad azucch.



$$I_{DS2} = f(I_{DS1})$$

Supponiamo che I_{DS2} dia in saturazione

Corrente dipende dalla tensione di zappia, drogaggio

$$\Rightarrow I_{DS2} = \frac{k_{n2}}{2} \cdot [V_{GS2} - V_{TH2}]^2$$

Corrente dipende da V_{TH2}
 $= \frac{k_{n2}}{2} V_{TH2}^2$

se anche lui è in sat.

$$I_{DS1} = \frac{k_{n1}}{2} [V_{GS1} - V_{TH1}]^2$$

$V_{GS1} = V_{IN}$
relaz. tra I_{DS1} e V_{DS1}

$$V_D = V_{DS1}$$

lo solo una volta carico, $V_{GS2} = 0$

$$V_{DD} = V_{DS1} + V_{DS2}$$

$$\Rightarrow V_{DS2} = V_{DD} - V_{DS1}$$

$$= V_{DD} - V_{DS1}$$

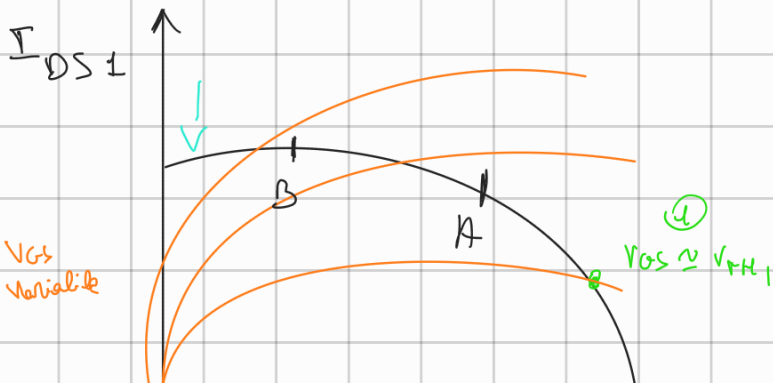
Tramontare MOS 1 da po unida e traslada

$$V_{GS2} = 0$$

la curva è una sola,

una V_{GS2} .

$$I_{DS2} = k_{n2} \cdot [V_{DS2} - V_{TH2}][V_{DD} - V_{DS1}]$$

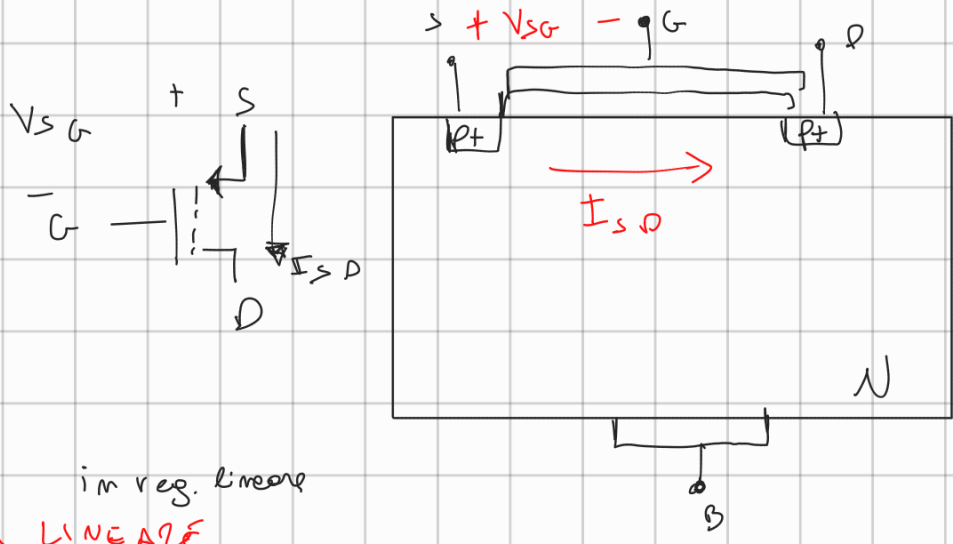


MOSFET DI CONTROLLO $V_{DD} - V_{TH2}$

$$\frac{k_{m1}}{2}(V_1 - V_{TH1})^2 = \frac{k_{m2}}{2}(-V_{TH2})^2$$

$$V_1 = -\sqrt{\frac{k_{m2}}{k_{m1}}} + V_{TH1}$$

2a Circo. MOS canale p ed equilibrio.



Tensione di controllo
è positiva ed induce
corrente scorre
dal source al
Drain

• corrente nel canale
provoca la caduta

in reg. lineare
in LINEARE

$$I_{SD} = k_p \left((V_{SG} - V_{THP}) V_{SD} - \frac{1}{2} V_{SD}^2 \right) \quad \text{con} \quad k_p = \frac{C_{ox} \mu_p W}{L}$$

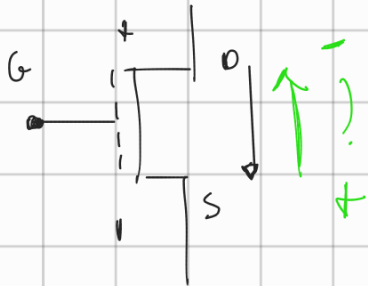
in saturazione.

$$I_{SD} = \frac{k_p}{2} (V_{SG} - V_{THP})^2 \quad \text{con} \quad V_{SD} > V_{SG} - V_{TH}$$

Voglio un MOS in cui la corrente scorra
in entrambi i lati
da S a D e da D a S

MOS a 4 Terminali

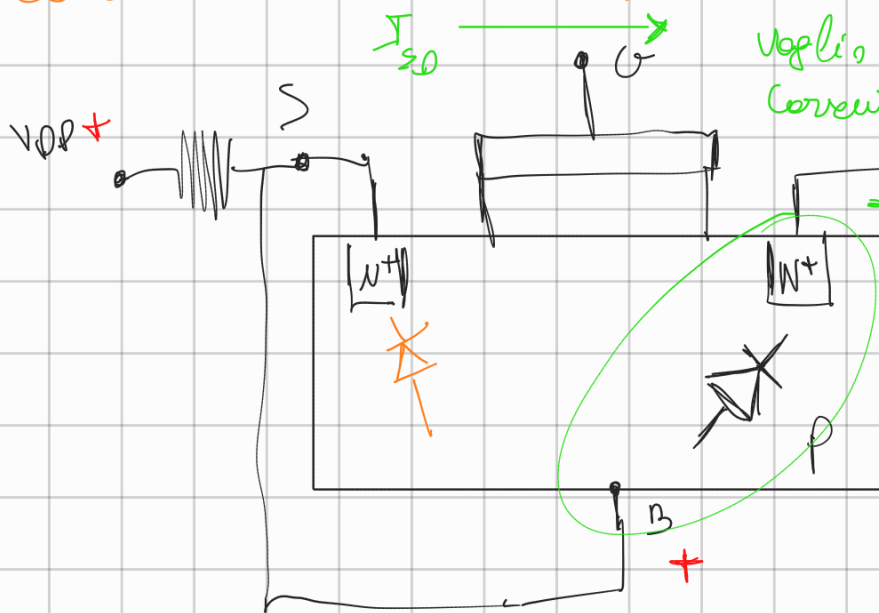
Prendiamo un MOS così



Per far scorrere corrente da D a S,
applico + a D e - a S

Ma se volessi farla scorrere nel senso
opposto (da S a D) non basta che applico
- al D, e + al S? Vediamo

Prendiamo struttura MOS



applico D a terra
Voglio che la
corrente scorra da S a D

ho giustamente PN
se lo attacco così lui
è un diodo polarizzato
DIRETTAMENTE,
gli elettroni non possono
nel canale, corrente va
da Source al Drain

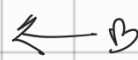
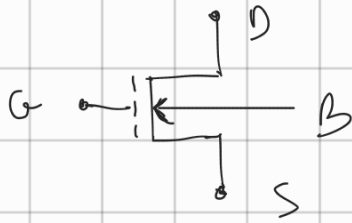
• Se applico potenziale positivo a S, ma come in un diodo

→ NON HO NESSUN TIPO di controllo con il
gate, va come AMPLIFICAZIONE
mi basta che $V_S > 0,6 + V_D$, ho corrente
che mi scorre, è un diodo semplice

• RISOLOVENDO SCOMMETTENDO SOURCE del BODY

ora però ho un dispositivo a 4 terminali.

=>



Freccia indica che Cu^+ e⁻ a canale N, tensione B più bassa



Freccia uscente, canale P, tensione B più alta

Problema: a che potenziale devo mettere B per far scorrere una corrente in un senso o nell'altro?

1) Voglio far scorrere corrente normalmente da Drain a Source V_B ? devo controllare polarizzare entrambi le giunzioni, devo essere più basso del più basso dei due potenziali.

→ Così ho controllato a tensione più alta rispetto all'altro, sempre controllando a canale N

=> $V_B \leq \min(V_{\text{Drain}}, V_{\text{Source}})$
NON DISTINGUO più tra DRAIN e SOURCE
e V_{GS} mi serve per avere elettroni sotto

=> Facciamo anche al contrario, non distinguo più tra Drain e Source



a canale P

$V_B \geq \max(V_{\text{Drain}}, V_{\text{Source}})$

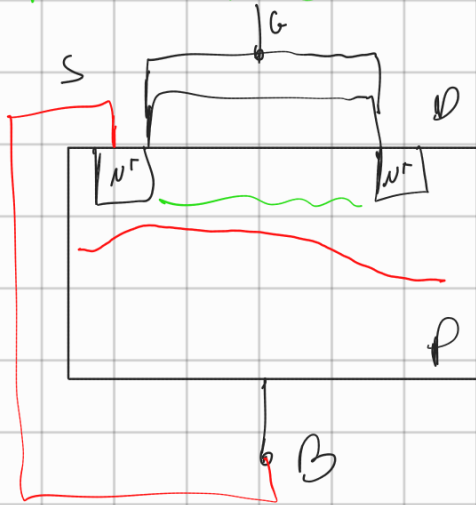
la giunzione è quindi al contrario, il controllo è sul BULK, per controllare polarizzarlo V_B

es. $\rightarrow$
 $S = 5V, D = 0, B = 5$
 $\leftarrow$
 $S = 0, D = 5, B = 5$

Perché faccio questo? Per servire invertire il senso della corrente, e se ho 3 Terminali, non posso
=> Se invece ho un MOS a 4 Terminali, con tensione

che posso variare su B, a seconda del potenziale del metallo, posso decidere il verso della corrente scambiando drain e source

EFFETTO BODY: nei mos a 4 Terminali, l'effetto body non è fino ma dipende da V_{DS} e V_{GS} e V_{BS}
 mi mette nella condizione classica, a 3 porte



• Poiché gli elettroni si muovono da S a D, si crea un problema di SBILANCIAMENTO della regione annotata (con sbilanciamento)

• Quando MOS entra in conduzione sono in SATURAZIONE, ma in saturazione

ho un canale STROZZATO, io cioè

si forma vicino al source. Man mano che aumento V_{GS} ci spostiamo verso la zona lineare, cresce con V_{GS} la V_{DS} diminuisce, il canale si allarga perché V_{DS} diminuisce

• La tensione di soglia cambia perché il pannello di corrente la cambia, infatti era

La tensione di soglia in un

MOS era ricavata da

$$V_{TH} = 2\psi_F + \psi_{ox} \quad , \quad \psi_{ox} = \frac{qN_A W d}{\epsilon} \quad \text{da def.}$$

$$\Rightarrow W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_A} 2\psi_F} \quad \text{e valore Regola Hurst del MOS}$$

ma siccome nel canale scorrono elettroni, ho anche una Tensione proporzionale al pannello degli elettroni e da influenza il potenziale SOURCE-BODY, ho tensione source e body V_{SB} , la regione di inversione di allora

=> Regione
svuotata
VERA

$$W' = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_A} [2\psi_F + V_{SB}]}$$

c'è una tensione
tra source e Body
che allarga la regione
svuotata

la regione svuotata rimane la
normale vicino al source, ma allargandosi,
Tende ad allargarsi.

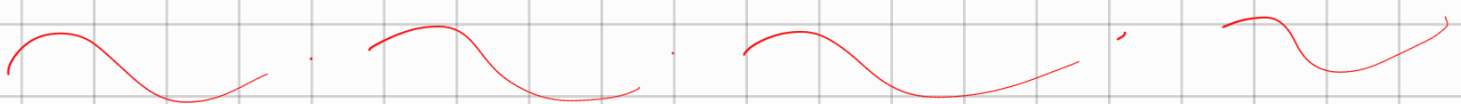
→ Motivo: il percorso degli elettroni è più lungo, la
caduta ohmica è più grande, la ddp V_{SB} è più grande

• **EFFETTO BODY**: poiché il channel source e BODY
contiguità, non porta ad una simmetria
della regione svuotata, e ha senso solo
tra S e B allineare un potenziale Nullo ma
tra D e B è non NULO, tende ad aumentare.

ma $V_{SB} \neq 0$ poiché Body non è più C.C. ha massimo nella reg. svuotata

• Contrario se canale di Tipo P, dove il canale
si forma vicino a D e si sposta verso il source

• Effetto body aumenta tensione di soglia



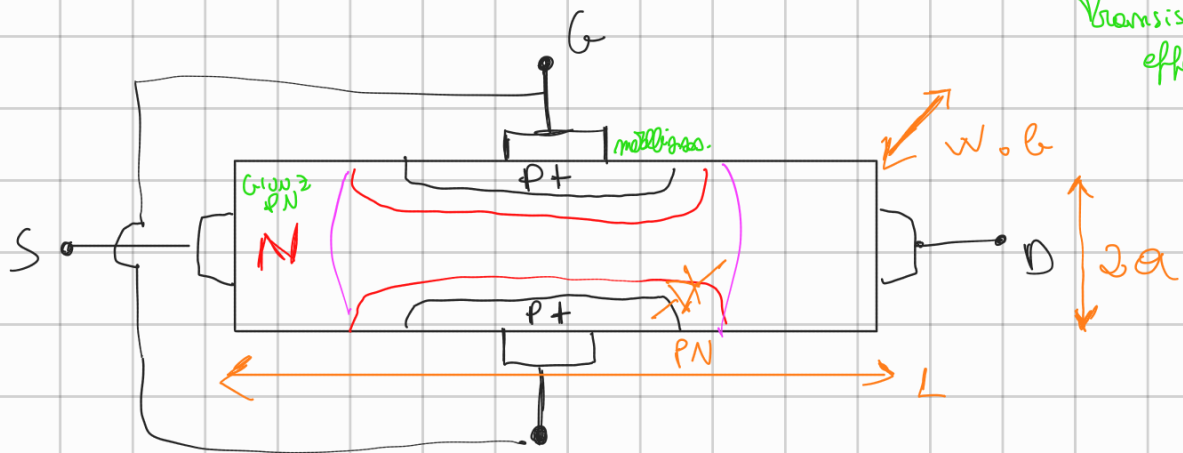
JFET

vuole un dispositivo a 3 terminali che si
faccia scorrere corrente in entrambe le direz.

JUNCTION Field effect Transistor

Transistore ad
effetto campo

• solo tipo N,
3 terminali.



• **FUNZIONAMENTO** : applico un potenziale di GATE (rispetto ad un M.F.)

molto negativo, mi si crea una REGIONE SVUOTATA (come un DIODO), ma etero drogato P^+ , la reg. svuotata mi sta nel dispositivo N (lacune) (cio' succede anche sotto per simetria)

Reg. svuotata, più
centroplasma,
più diventa
grande, verso N

• allora se applico potenziale positivo a Drain e negativo a Source, faccio scorrere gli elettroni da Source a Drain, finché la "porta" rimane aperta, cioè V_G non centroplasma

• Quando la porta si chiude (ho tutta regione svuotata di cariche fisse positive) non ci passa più niente, le cariche mobili negative non passano

V_p = Tensione di PINCH-OFF, ed è NEGATIVA

Se $V_G < -V_p$, il dispositivo è in INTERRUZIONE

Se $-V_p < V_G$, allora il dispositivo conduce

• Problema della dimensionalità RESOLTA. • GATE, porta, si chiude

GLI ELETTRONI POSSONO ANDARE da UNA parte all'altra. non c'è NESSUN DIODO NEL MEZZO

Finché lascio regione svuotata aperta, passano cariche, se invece polarizzo reg. Taurus, lei si interdice, si chiude

V_G piccolo

Se $-V_p < V_G < 0$

Per piccole correnti, V_G piccolo
MOSFET come conduttore

posso applicare la legge di ohm per piccole Tensioni e correnti; vale la legge d'ohm, è come se

come un conduttore. ohmico

Relazione tra I_{DS} e V_{DS} nel MOS era $1/R = k_m [V_{GS} - V_{TH}]^2$
dove $\frac{1}{R} = \frac{k_m}{2} [V_{GS} - V_{TH}]^2$.

Qui non ho k_m (c'è un condensatore) ma c'è un rapporto tra drogaggi dipende dalla geometria

$$\Rightarrow I_{DS} = V_{DS} \frac{2a \cdot b \cdot \mu_m \cdot N_d q}{L}$$

a = spessore
 L = lunghezza dispositivo
 W = profondità (o q)

$\rightarrow$ portatori
 $\rightarrow$ lunghezza
 $\rightarrow$ concentrazione
 $\rightarrow$ vero quanto
 $V_G > \text{poco a } -V_p$
 Sono da poco in cond.

Resistenza $R = \frac{\rho l}{S} = \frac{L}{2a b \cdot \mu_m \cdot N_d q}$

$\rho = \frac{1}{\sigma}$
 $G = \frac{\sigma S}{l}$
 $\leftarrow$ lunghezza
 $\leftarrow$ sezione
 $\leftarrow$ resistenza

$dove \quad q \mu_m N_d = \frac{1}{\rho} = \sigma$
 $\# V_G \text{ mai } > 0, \text{ se } V_G = 0 \text{ ho corrente max}$

$\Rightarrow$ Per V_G piccolo, comportamento simile al MOS con V_G piccolo

• infatti nel MOS ho un comportamento lineare quando V_{DS} piccola, dopo diventa non lineare. Cio' è simile per un JFET.

V_{DS} piccola, V_{GS} fissato, corrente pratica. parabolico
 $V_{GS} = 0$

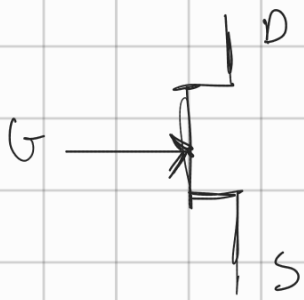
$$I_{SATUR. JFET} = I_{DS} = I_{DSS} \cdot \left[1 + \frac{V_{GS}}{V_p} \right]^2$$

I_{DSS} = corrente max. possibile
 V_p = tensione pinch-off
 V_{GS} = tensione di gate

$I_{DS} = \frac{2 I_{DSS}}{V_p^2} \cdot \left[(V_G + V_p) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$
 Come in quella del MOS

$V_{DS} > V_{GS} + V_p$
 $V_{GS} = 0$

SIMBOLO FET a canale N



Freccia non mporta su D e S perché il diodo è bidirezionale (è anche costruito simmetrico)
D e S sono intercambiabili



JFET canale P

$$-V_P < V_{GS} < 0$$

$$V_{DS} > V_{SG} + V_{TP}, \text{ in}$$

$$I_{DS} = I_{SD} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{DS}}{V_P}\right)^2$$

$$V_{DS} = V_G + V_{pinch-off}$$

non forma ... si verifica fenomeno simile allo strisciamento

infatti quando $V_{DS} = V_G + V_P$,

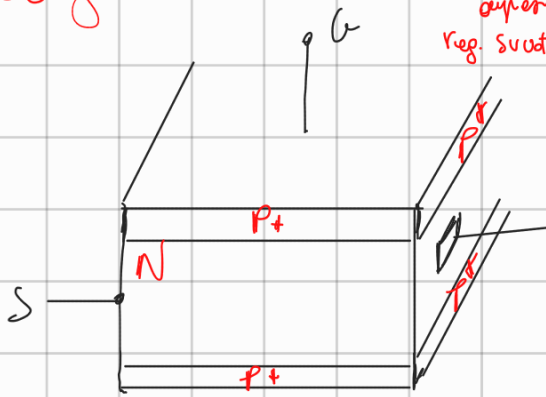
$$\text{Formula } I_{LIM} \text{ di FET } (V_G + V_P) = I_{SD}$$

Derivazione caratteristica

JFET, con canale P-type, dove la corrente per D e S non è trascurabile

regione di canale ad ampiezza massima di canale

pot. de lu si appiave avvicino al drain



apertura della reg. svuotamento

$$W(x) = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left[\psi + V_{SG} + V(x) \right] \frac{1}{N_D}}$$

(più scarro canale, più potenziale si aggiunge al potenziale GATE)

potenziale di giunzione

=> Regione svuotata analoga vicino al DRAIN e diminuisce al SOURCE

se $V_{GS} = -V_P$, $V(x) = 0$, reg. svuotata zero width e spazio disponibile

Semi-conduzione del canale

$$V_G < V_P, I_{DS} = 0, V(x) = 0$$

$$V(x) = 0$$

libro, questo quando il MOSFET è in interdizione e la reg. di svuotamento prende tutto lo spazio disponibile

$$\Rightarrow a = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} (\psi + V_{SG}) \frac{1}{N_D}}$$

V_P , sono

cariche, se sono poco in conduzione.

giunea in conduzione

$$dQ = -2(a - W(x)) q \cdot N_D \cdot dx$$

devo tenere conto del canale

2a - zona svuotata

da è la carica mobile contenuta in una fetta verticale di spessore dx

Voglio la corrente, dunque $\frac{dQ}{dt}$, variazione carica

$$\frac{dQ}{dt} = -2(a - w(x))q \cdot N_D \cdot \frac{dx}{dt} \quad \text{velocità } v = -\frac{dx}{dt} = -\mu_n E(x) = \mu_n \frac{dV(x)}{dt}$$

$\Rightarrow i_{DS} = 2N_D \mu_n q (a - w(x)) \frac{dV}{dx}$

per avere I_{DS} , devo integrare su tutta la lunghezza

sostituire variabile

$$I_{DS} = \frac{1}{L} \int_0^L i_{DS}(x) dx$$

$$\Rightarrow I_{DS} = \frac{1}{L} \int_0^{V_{DS}} 2(a - w(x))q \cdot N_D + \mu_n dV$$

$w(x)$ la ho, sostituisco

dove $\frac{dx}{dt} = \mu_n \frac{dV(x)}{dx}$

$a - w(x) =$

raccolgo $a(1 - \sqrt{\frac{2\epsilon}{q N_D} [\psi + V_{GS} + V(x)]})$

$$a - \sqrt{\frac{2\epsilon}{q N_D} [\psi + V_{GS} + V(x)]} = a(1 - \sqrt{\frac{\psi + V_{GS} + V(x)}{\psi + V_P}})$$

ho anche a

e lavoro dove $\psi + V_{GS} + V(x) < \psi + V_P$
cioè supponiamo che iFET lavori vicino al pinch-off, cioè
deci sia una piccola apertura del canale

$V_{GS} > V_P$ in negativo, di poco

$\Rightarrow a(1 - x^\alpha)$ con $\alpha < 1$ ($\alpha = \frac{1}{2}$) e $x \rightarrow 0$

da Taylor
 $1 - \alpha x$

$\Rightarrow \frac{a}{2} \left[\frac{\psi + V_{GS} + V(x)}{\psi + V_P} \right] \rightarrow$ lo sostituisco nell'integrale

$\Rightarrow I_{DS} = \frac{1}{L} \int_0^{V_{DS}} 2 \cdot \frac{a}{2} \left[\frac{\psi + V_{GS} + V(x)}{\psi + V_P} \right] \cdot q \cdot N_D \cdot \mu_n dV$

a sinistra $\psi + V_P$

quasi tutta costante TRAMITE

$$I_{DS} = \frac{\mu_n a N_D}{L(\eta + V_p)} \int_0^{V_{DS}} (\eta + V_{SG} + V(x)) dV$$

$$= \frac{\mu_n a b N_D}{L(\eta + V_p)} \left[(\eta + V_{SG}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

questa è in zona LINEARE
 e dato che $V_{DS} = V_p - V_{GS}$ cioè quando sei in saturazione.
 $V_{GS} = V_{GS} \dots$ uguale

$$I_{DS} = I_{DSS} \cdot \left[1 + \frac{V_{GS}}{V_p} \right]^2 \quad \text{quando } V_{DS} \geq V_p + V_{GS} \quad ?$$

Se $\eta = V_p$, raccogliamo $V_p^2 \dots$

$$I_{DSS} = \frac{\mu_n a b N_D}{2L} \frac{V_p^2}{V_p + \eta}$$

raccolgo $\frac{1}{2} V_p^2 \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2$

- la corrente aumenta all'aumentare della tensione del gate e diminuisce all'aumentare della lunghezza

era $I_{DS} = \frac{2 I_{DSS}}{V_p^2} \left((V_{GS} + V_p) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right)$

Passo in saturazione quando $V_{DS} \geq V_G + V_p$.