

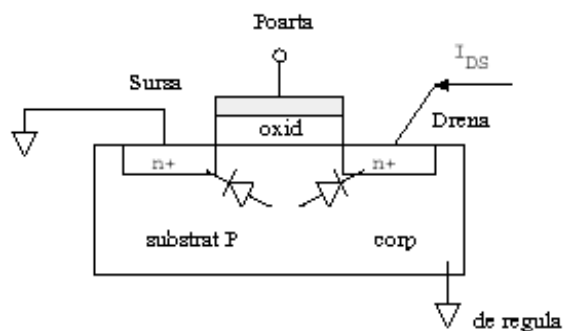
## Capitolul 2. Functionarea tranzistorului MOS.

Circuitele integrate MOS au fost realizate la inceput in tehnologia PMOS, datorita predictibilitatii tensiunii de prag pentru acest tip de tranzistoare. Pe masura perfectionarii tehnologiei, prin recurgerea la implantare ionica, tranzistorul NMOS a devenit tot mai raspandit. Evolutia tehnologiei a condus, in continuare, la aparitia dispozitivelor CMOS. Acest capitol este consacrat tranzistoarelor NMOS si PMOS din punctul de vedere al structurii si operarii.

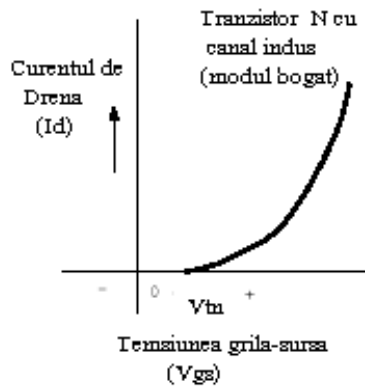
### 2.1. Tranzistorul NMOS in modul bogat (enhancement mode).

Structura de baza a tranzistorului NMOS in modul bogat este aratata mai jos. Ea consta intr-un substrat de tip  $p$ , sursa si drena de tip  $n+$ . Intre sursa si drena se afla canalul acoperit cu  $SiO_2$ . Acest strat de oxid mai poarta numele de oxid de poarta. Peste stratul de oxid al portii se afla un strat de siliciu policristalin, care reprezinta poarta. Atunci cand  $V_{GS} = 0$ , sursa si drena tranzistorului sunt separate de o regiune de tip  $p$ . Curentul de la drena la sursa,  $I_{DS}$ , este foarte mic si limitat de curentul invers de polarizare din diode.

Pe masura ce  $V_{GS}$  creste electronii din zonele sursei si drenei vor fi atrasi de regiunea aflata sub poarta. Aceasta va conduce la cresterea conductibilitatii intre drena si sursa. In momentul in care  $V_{GS}$  depaseste tensiunea de prag  $V_{th}$ , se formeaza/se induce un canal (regiune de tip  $n$ ) intre sursa si drena, canal ce asigura curgerea unui curent de la drena la sursa. O sectiune prin structura tranzistorului NMOS, cat si relatia intre  $V_{GS}$  si  $I_{DS}$  sunt prezentate in figurile (a) si (b), de mai jos.



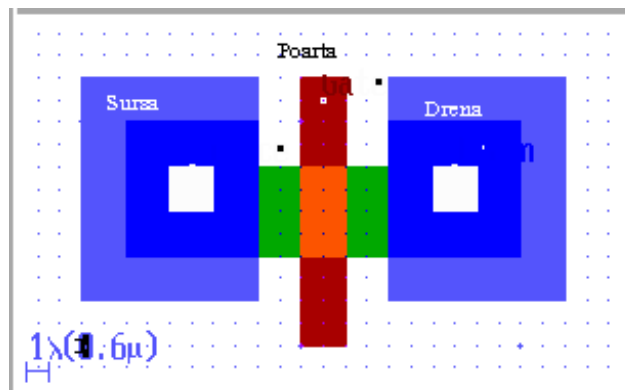
(a)

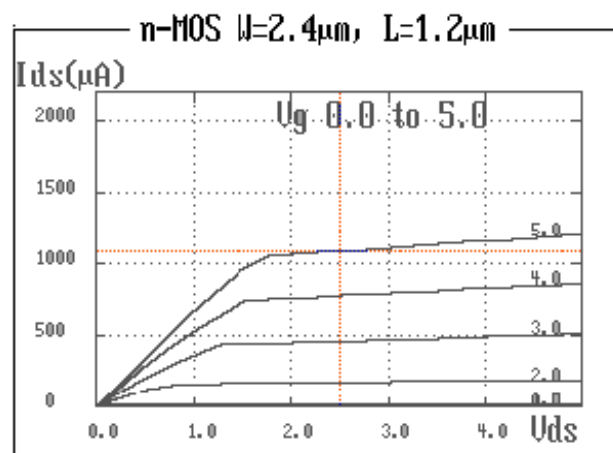
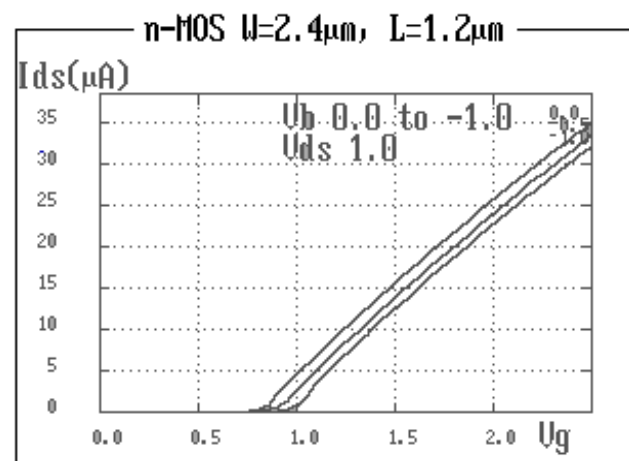
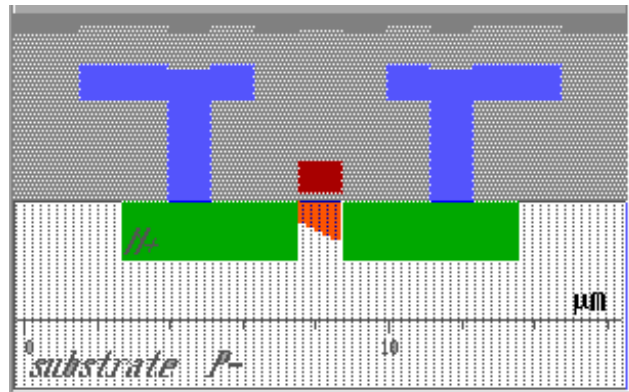


(b)

Intrucat pe poarta tranzistorului NMOS nu se constata prezenta unui curent sau a unei tensiuni, acesta in mod normal este blocat. Se spune ca tranzistorul este in modul bogat deoarece se impune o tensiune pe poarta pentru a imbogati canalul in vederea realizarii acestuia.

In figura de mai jos se prezinta: mastile pentru un tranzistor NMOS, o sectiune transversala prin structura tranzistorului si familiile de caracteristici  $I_{DS} = f(V_{DS}, V_{GS})$ ,  $I_{DS} = f(V_{GS}, V_B)$ , pentru  $V_{DS} = \text{const.}$  Tensiune  $V_B$  este tensiunea de polarizare a substratului. Modificarea acestei tensiuni de polarizare conduce la modificarea tensiunii de prag.





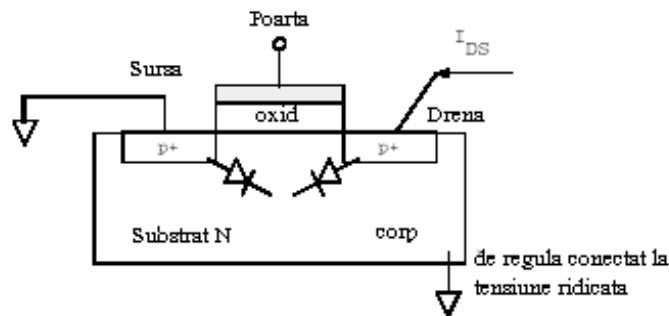
## 2.2. Tranzistorul NMOS in modul sarac (depletion mode).

La tranzistorul NMOS in modul sarac canalul este prezent in absenta unor surse externe. Canalul este natural, tranzistorul fiind in conductie/deschis, ceea ce se manifesta prin  $I_{DS} > 0$  cand  $V_{GS} = 0$ .

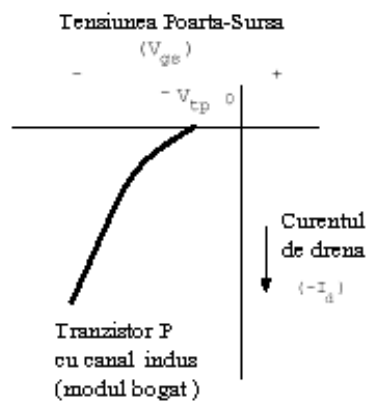
Pentru blocarea canalului trebuie sa se aplice pe poarta o tensiune negativa in raport cu sursa.

## 2.3. Tranzistorul PMOS in modul bogat.

Ca si tranzistorul NMOS in modul bogat, tranzistorul PMOS in modul bogat nu poseda canal natural, canalul fiind indus atunci cand pe poarta se aplica o tensiune. Astfel, in mod normal este blocat. Caracteristica curent-tensiune a tranzistorului PMOS in mod bogat este inversa in raport cu cea a tranzistorului NMOS in modul bogat. Pentru a aduce tranzistorul in stare de conductie trebuie sa se aplice o tensiune negativa intre poarta si sursa. Mai jos se prezinta o sectiune prin structura tranzistorului (a), si caracteristicile  $I_{DS} = f(V_{DS})$  (b).

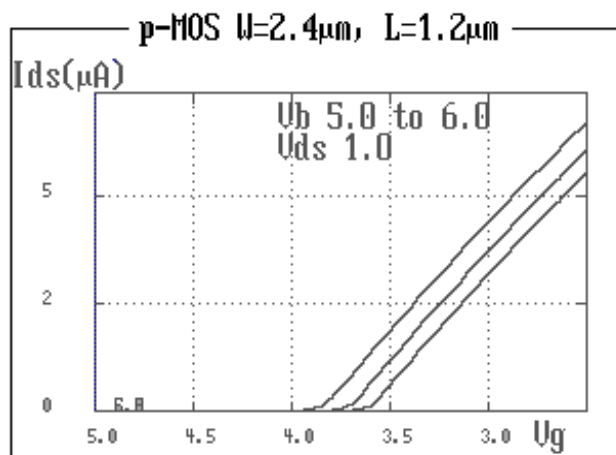
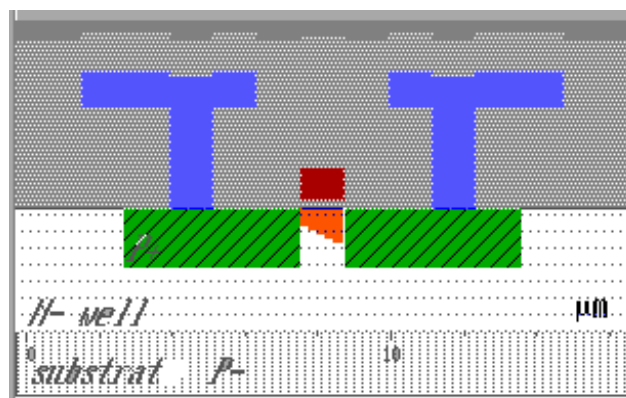
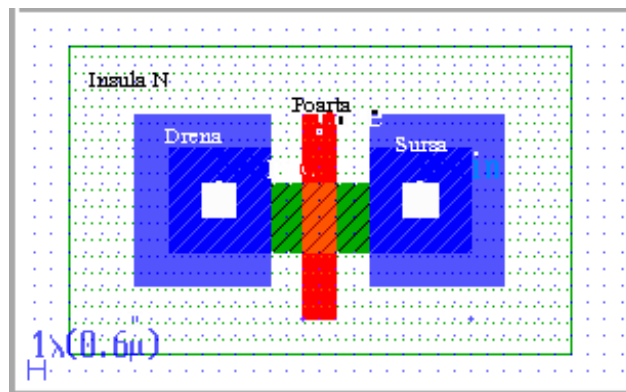


(a)



(b)

În figura de mai jos se prezintă: mastile pentru un tranzistor PMOS, o secțiune transversală prin structura tranzistorului și familiile de caracteristici  $I_{DS} = f(V_{DS}, V_{GS})$ ,  $I_{DS} = f(V_{GS}, V_B)$ , pentru  $V_{DS} = \text{const.}$  Tensiunea  $V_B$  este tensiunea de polarizare a substratului. Modificarea acestei tensiuni de polarizare conduce la modificarea tensiunii de prag

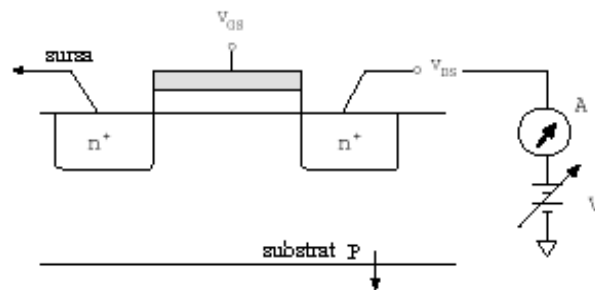


## 2.4. Operarea tranzistorului.

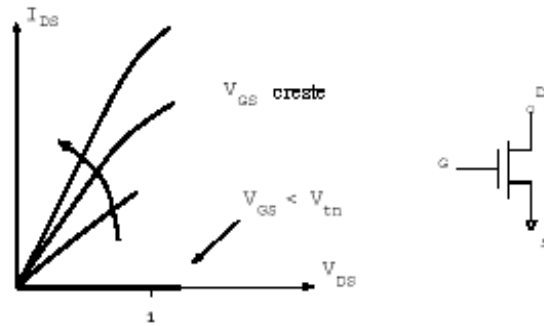
Operarea tranzistorului poate fi examinata in cadrul a doua regiuni: regiunea liniara si regiunea de saturatie (pinch-off). In cele ce urmeaza va fi examinata functionarea tranzistorului in cele doua regiuni.

### 2.4.1. Regiunea liniara.

Considerand dispozitivul NMOS, cu canal indus, tensiunile de drena si poarta au ca referinta tensiunea sursei. In cazul in care  $V_{GS}$  este mai mare decat tensiunea de prag se va forma canalul  $n$ .



Pentru valori mici (sub 1V) ale tensiunii  $V_{DS}$ , caracteristica  $I_{DS} - V_{DS}$  este liniara, ca in figura de mai jos, si ramane liniara pentru valori ale lui  $V_{DS}$  mai mici decat  $V_{GS}$ . Rezistenta intre sursa si drena este controlata de catre tensiunea pe poarta. Aceasta este regiunea liniara. O tensiune pozitiva mica aplicata intre poarta si sursa va induce o sarcina negativa in zona de sub poarta. Aceasta sarcina indusa este formata din acceptori ionizati, care asigura o regiune saraca, ca urmare a repulsiei golurilor. Cresterea in continuare a tensiunii face ca purtatorii minoritari (electronii) sa fie atrasi catre canal de la sursa si de la drena. La o valoare data a tensiunii pe poarta, concentratia, la suprafata, a purtatorilor minoritari (electronii) poate sa depaseasca densitatea golurilor in material, ceea ce corespunde unei inversii de suprafata. Pentru valori mici ale lui  $V_{DS}$ , stratul de inversie se intinde de la sursa la drena.

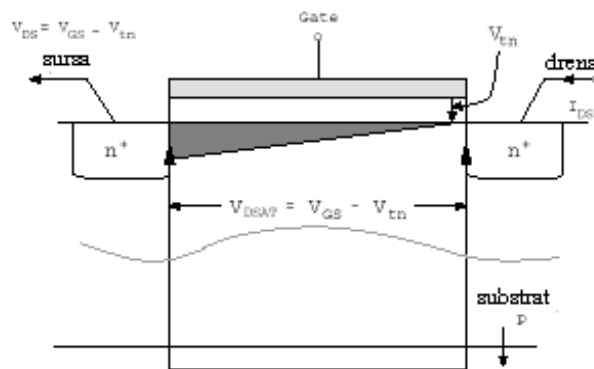


## 2.4. Regiunea de saturatie.

Se considera situatia in care tensiunea de grila depaseste tensiunea de prag, dispozitivul fiind in conductie, cu canalul format. Pentru valori mici ale lui  $V_{DS}$ , atunci cand  $V_{DS} < V_{GS} - V_{tn}$ , stratul de inversie se intinde de la sursa la drena. Dispozitivul lucreaza ca un rezistor variabil controlat de o tensiune.

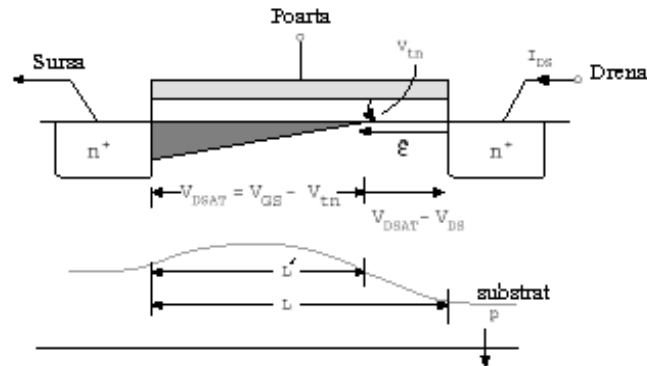
Pe masura ce  $V_{DS}$  creste, tensiunea intre poarta si drena scade, dar  $I_{DS}$  inca are o crestere.

Cand  $V_{DS} = V_{GS} - V_{tn}$ , campul electric  $E$  prezent la capatul dinspre drena si dielectricul portii se reduce la o asemenea valoare incat stratul de inversie nu mai este asigurat. In aceasta situatie se spune ca a avut loc taierea (pinch-off) canalului. Aceasta situatie este prezentata in figura de mai jos. Curentul de la drena la sursa este saturat si notat cu  $I_{DSAT}$ .

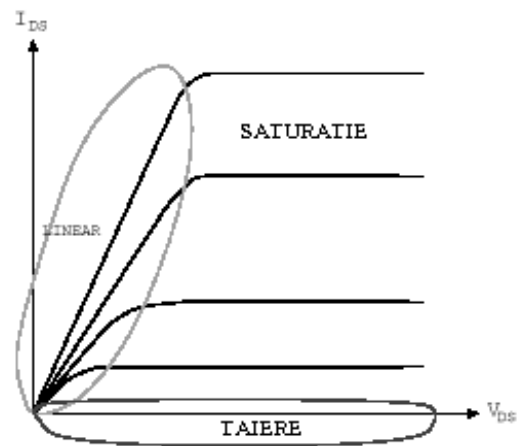


O crestere in continuare a tensiunii  $V_{DS}$  fata de  $V_{DSAT}$  conduce la crearea unei zone fara inversie, ca in figura de mai jos. Datorita proprietatii de continuitate  $I_{DS}$  este egal cu  $I_{DSAT}$ . Zona formata, dispunand de un camp puternic, accelereaza electronii, care ajung la punctul de taiere, pentru a trece spre drena. Curentul ramane constant si egal cu cel de saturatie. Se poate insa constata ca

lungimea canalului s-a micșorat de la  $L$  la  $L'$ . Acest fenomen poartă numele de modulare a canalului și are ca rezultat o ușoară creștere a curentului în regiunea de saturatie.



Caracteristica I-V a tranzistorului NMOS, cu canal îndus, este data mai jos.



## 2.5. Ecuația curentului $I_{DS}$ .

În cele ce urmează se vor deduce o serie de ecuații pentru curentul  $I_{DS}$ , pe baza modelului simplificat al controlului prin sarcină. Pentru regiunea liniară, unde  $V_{GS} > V_{th}$  și  $V_D < V_G - V_{th}$ , se poate presupune o distribuție uniformă a sarcinii, ceea ce face ca următoarea ecuație să fie validă:

$$Q_c \sim -C_{ox}(V_{GS} - V_{th})$$



unde  $Q_c$  este densitatea de sarcina in canal (coulombi/unitatea de arie) si  $C_{ox}$  este capacitatea portii pe unitatea de arie. Se poate observa ca semnul este negativ datorita faptului ca sarcina este constituita din electroni.

Timpul de tranzit al sarcinii prin canal este egal cu lungimea canalului  $L$  impartita la viteza:

$$\tau \sim L/\text{viteza}$$

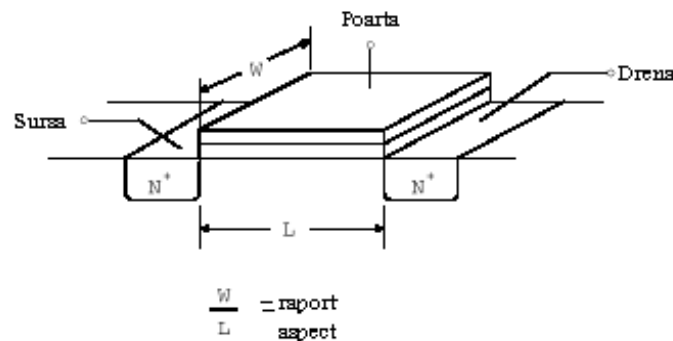
Viteza electronilor este proportionala cu mobilitatea  $\mu_n$  inmultita cu intensitatea campului electric  $E$ , ceea ce face ca

$$\tau \sim L/(\mu_n \cdot E)$$

Pe de alta parte, intensitatea campului electric este egala cu  $V_{DS}/L$ , ceea ce va conduce la:

$$\tau \sim L^2/(\mu_n \cdot V_{DS})$$

Elementele geometrice ce caracterizeaza canalul  $L$  – lungime,  $W$ - latime sunt prezentate in figura urmatoare:



Raportul  $W/L$  poarta numele de *raport- aspect*.

Pe baza celor de mai sus se poate scrie:

$I_{SD} \sim$  sarcina totala in canal/timpul de tranzit sau

$$I_{SD} \sim - C_{ox} (V_{GS} - V_{th}) \cdot W \cdot L / (L^2 / (\mu_n \cdot V_{DS}))$$

Dar,  $I_{DS} = - I_{SD}$ , astfel, ecuatia curentului  $I_{DS}$  devine:

$$I_{DS} \sim \mu_n \cdot C_{ox} \cdot (W/L) \cdot (V_{GS} - V_{th}) \cdot V_{DS}$$

Parametrul  $W/L$  poate fi controlat de catre proiectant.

Observatii:

- $\mu_n.Cox. (W/L)$  reprezinta factorul de amplificare al tranzistorului ( $\beta$ );
- $\mu_n.Cox.$  este tipic  $(20-30) \times 10^{-6} A/V^2$
- $\mu_n$  este tipic  $(6-9) \times 10^{-2} m^2/V.s$
- $Cox.$  este tipic  $(3-4) \times 10^{-4} F/m^2$

In continuare se face o comparatie intre ecuatia simplificata si o ecuatie mai exacta pentru  $I_{DS}$ , in regiunea liniara:

- ecuatia simplificata:  $I_{DS} \sim \mu_n.Cox. (W/L). (V_{GS} - V_{th}).V_{DS}$
- ecuatia mai exacta:  $I_{DS} \sim \mu_n.Cox. (W/L). [(V_{GS} - V_{th}).V_{DS} - V_{DS}^2/2]$

Cand  $V_{DS}$  este mic, modelul bazat pe controlul prin sarcina asigura o precizie rezonabila. In cazul reducerii dimensiunilor dispozitivului, aceste ecuatii de proiectare devin mai putin precise.

Chiar fara termenul la patrat  $I_{DSAT}$  poate fi calculat pe baza modelului controlat prin sarcina prin inlocuirea  $V_{DS} = V_{DSAT} = V_{GS} - V_{th}$ , ceea ce va conduce la:

$$I_{DSAT} \sim \mu_n.Cox. (W/L). (V_{GS} - V_{th})^2$$

Acestei estimari ii lipseste termenul  $V_{DS}^2/2$

Intr-o maniera similara se poate examina tranzistorul PMOS.

## 2.6.Tensiunea de prag ( $V_{th}$ sau $V_{tp}$ ).

Tensiunea de prag poate fi definita ca tensiunea intre poarta si sursa unui dispozitiv MOS sub valoarea careia curentul  $I_{DS}$  devine zero.

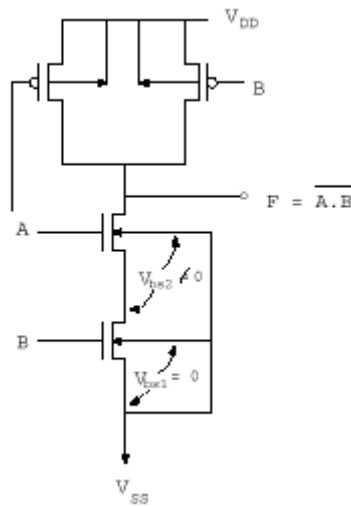
Considerand o valoare mica pentru  $V_{GS}$  se pot face urmatoarele constatar:

- sarcina initiala in canal se datoreaza numai acceptorilor ionizat din regiunea saraca;
- concentratia de purtatori minoritari de la suprafata devina egala cu concentratia purtatorilor majoritari din substrat;
- cresterea in continuare a lui  $V_{GS}$  induce un puternic strat de inversie;
- tensiunea de prag  $V_{th}/ V_{tp}$  poate fi controlata prin modificarea grosimii stratului de dioxid de siliciu  $t_{ox}$ , care nu constituie un parametru de proiectare, fiind controlat de specialistul in procesul de fabricatie.

## 2.7. Efectul de corp

Sursa unui dispozitiv de tip N este de regula conectata la o tensiune coborata, ca si structura de baza/corpul, astfel incat tensiunea intre ele  $V_{BS} = 0$ . In aceste conditii tensiunea de polarizare a substratului/corpului va afecta tensiunea de prag in mod direct.

Dispozitivele MOS sunt construite pe un substrat comun, ceea ce face ca tensiunea de polarizare a substratului sa fie aceeaasi. Exista unele combinatii, dupa cum se vede in figura de mai jos, in care tensiunea intre sursa si substrat sa nu fie egala cu zero ( $V_{BS1} = 0$ ,  $V_{BS2} \neq 0$ ).



Cand creste tensiunea intre sursa si substrat creste, de asemenea, si latimea stratului sarac canal-substrat.

Ca rezultat, creste numarul acceptorilor ionizati din stratul sarac. Acesta trebuie compensat cu o sarcina egala si de semn opus pe poarta inainte de formarea stratului de inversie, ceea ce conduce la cresterea tensiunii de prag. O aproximatie de ordinul 0, pentru tensiunea de prag, este urmatoarea:

$$V_{th} = V_{th(0)} + \gamma \cdot V_{BS}^{1/2}$$

unde  $V_{th(0)}$  este tensiune de prag atunci cand  $V_{BS1}=0$ , iar  $\gamma$  poate lua valori de la:

$$0.1 V^{1/2} \text{ la } 1 V^{1/2}.$$

In relatia de mai sus semnul este pozitiv pentru dispozitivele NMOS.