

Chapitre VI. Le transistor MOS

- 6.1. Présentation du transistor MOS
- 6.2. Condensateur MOS
- 6.3. Phénomènes physiques en TECMOS; paramètre V_T
- 6.4. Caractéristiques statiques du T. MOS
- 6.5. Le régime dynamique du T. MOS
- 6.6. Une probleme avec T MOS.

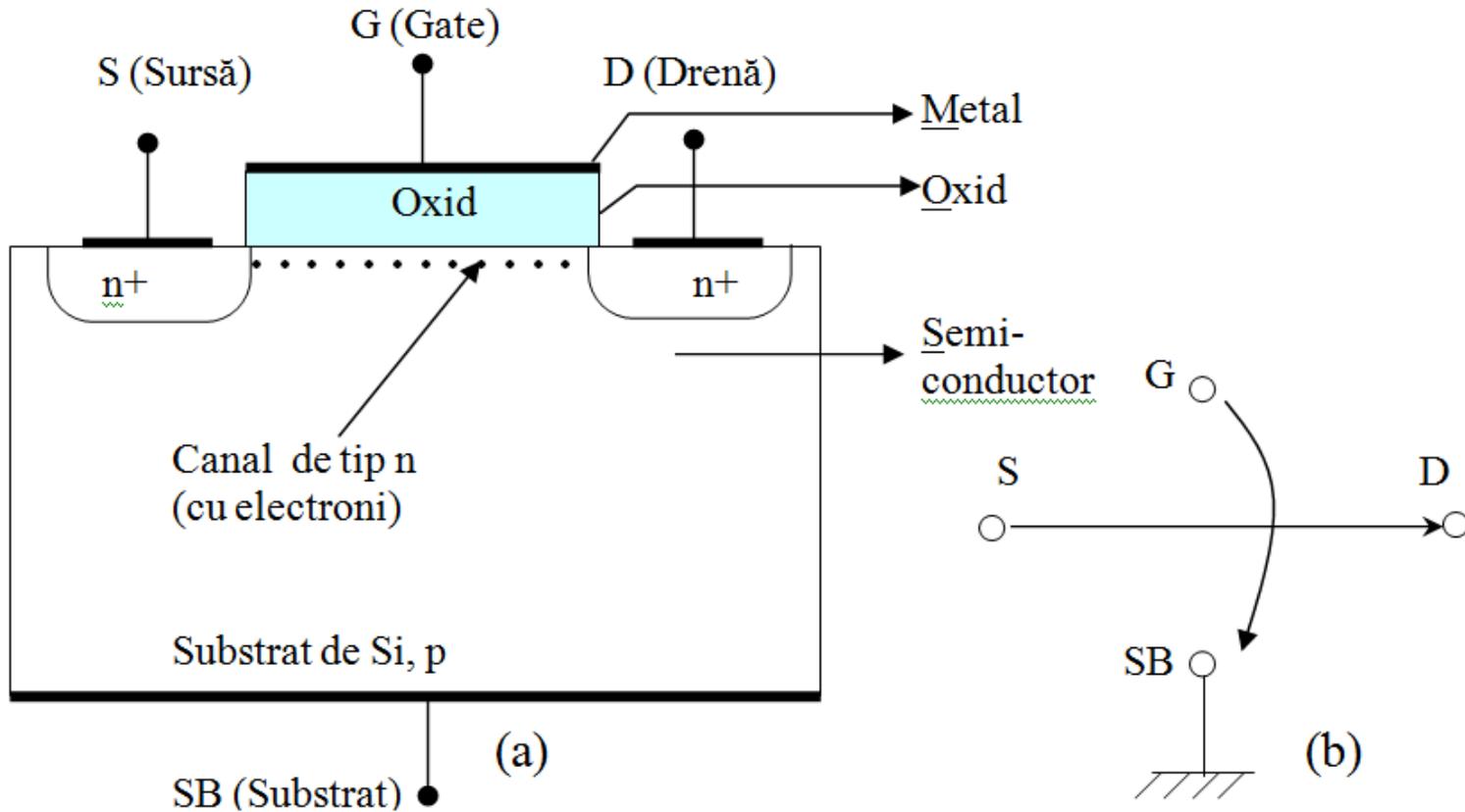
6.1. Présentation du transistor MOS

- Définition:
- Transistor MOS (*Metal Oxid Semiconductor*) en classe TEC (*Transistors à Effet de Champ*), ou FET (Field Effect Transistor) → nom = MOSFET.

L'électrode de commande (Porte) est isolée diélectrique de dispositif, par SiO_2 et/ou Si_3N_4 , ~ 100 - 1nm d'épaisseur.

6.1. Présentation du transistor MOS

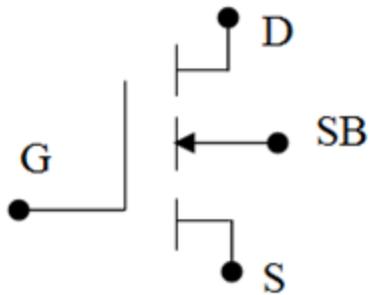
T. MOS a 4 terminaux: S, D, G, Sb.



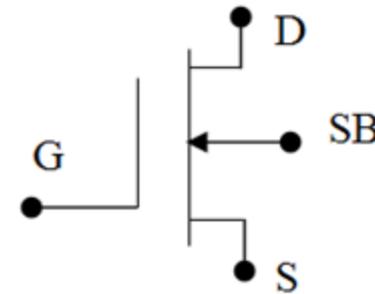
6.1. Présentation T. MOS

Symbole/ str:

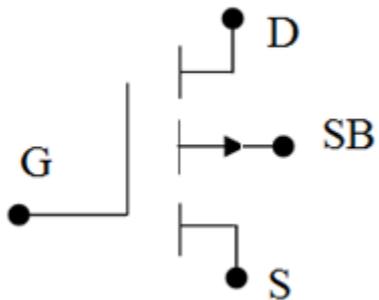
T MOS a canal n induite



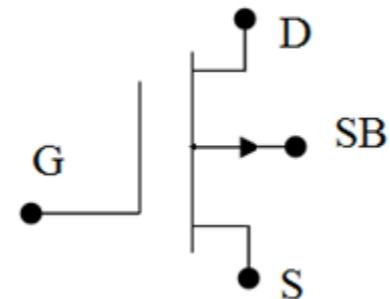
T MOS a canal n initiale



T MOS a canal p induite

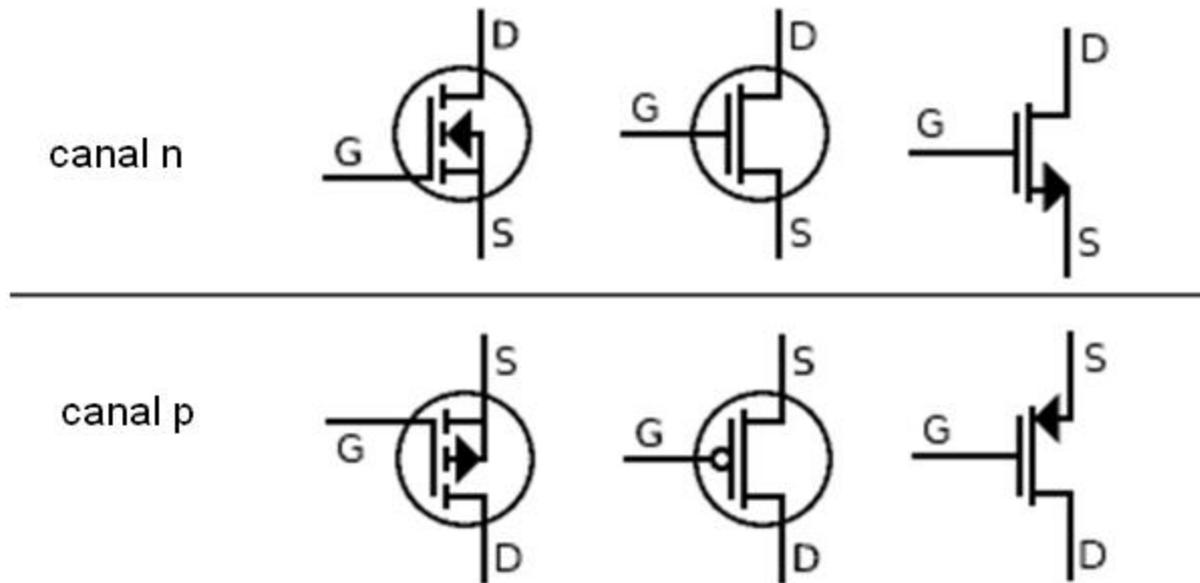


T MOS a canal p initiale



6.1. Présentation T. MOS

- Symboles alternatifs :



6.1. Présentation T. MOS

- On va définir 3(4) crt et 3 tens.
- ($I_{Sb} = 0$); $I_G = 0$; $I_D = I_S$
- V_{GS} , V_{DS} , V_{GD} . Mais: $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$
- PSF est: I_D , V_{GS} , V_{DS} .
- Connexions: SC, DC, GC.
- Connexion C-MOS.

6.1. Présentation T. MOS

- Principes de polarisation:
- Le substrat est relié au le plus bas potentiel, pour le transistor à canal n, et au le plus grand potentiel, pour le transistor à canal p.
- Exemples:
- Tension $V_{DS} > 0$ pour can. n,
- Tension $V_{DS} < 0$ pour can. p,
- Tension $V_{GS} > 0$ pour can. n,
- Tension $V_{GS} < 0$ pour can. p.

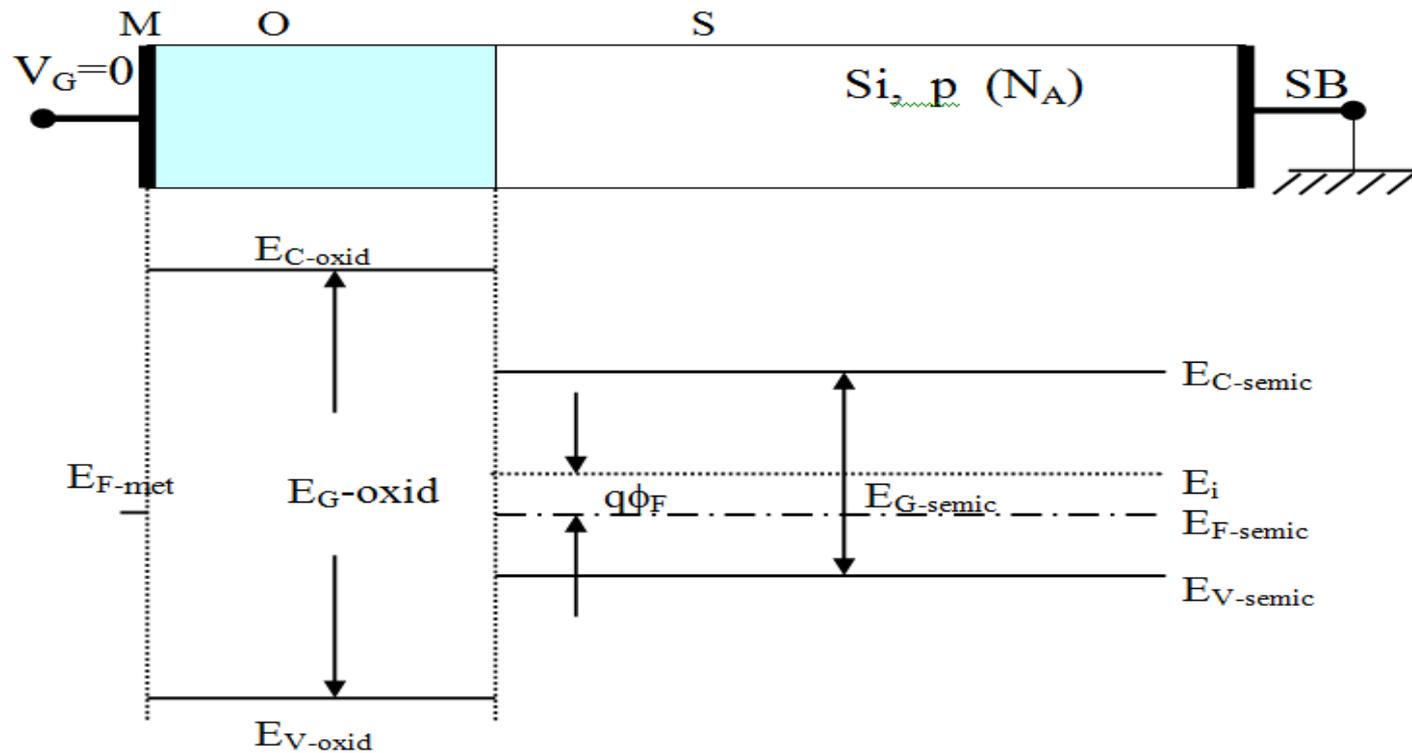
6.2. Le condensateur MOS

6.2.1. Le condensateur MOS idéal

- Condensateur MOS idéal suppose que:
 - a) pas de charge électrique volumique ou surfacique.
 - b) il permette une approche 1D.
 - c) travaille d'extraction d'électrons métal-semiconducteur, $\Phi_{MS} = 0$.
- Condensateur MOS à substrat semiconducteur de type p est dopée avec des impuretés Accepteurs(N_A).

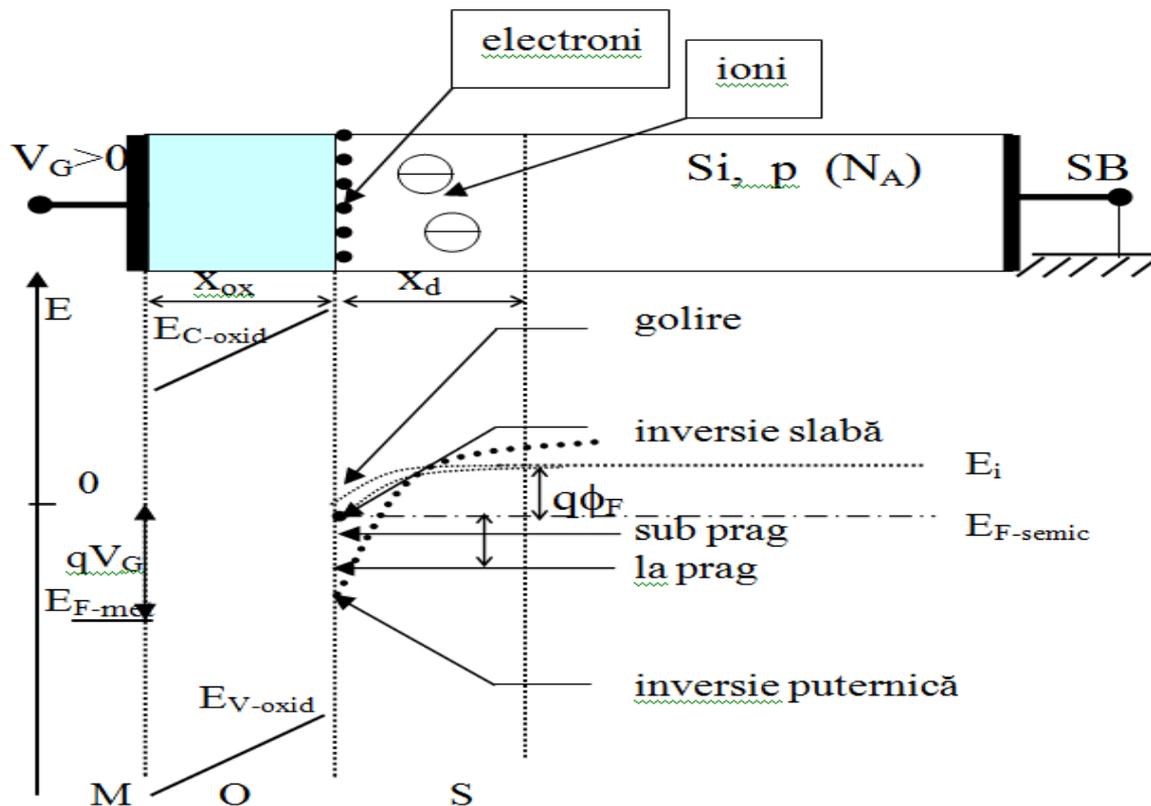
6.2.1. Le condensateur MOS idéal

C. MOS non-polarisée ($j_n=0, j_p=0$), ainsi $E_F=\text{const.}$



6.2.1. Le condensateur MOS idéal

- Si $V_G > 0$ petite \rightarrow apparaît régime de déplétion
- Si $V_G > V_{seuil} \rightarrow$ l'inversion ($Q_n > Q_{BO}$).



6.2.2. Distribution du potentiel dans le condensateur MOS idéal

Dans l'oxyde : $E(x) = \frac{qN_A}{\epsilon_{ox}} x_d$

Mais: $x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}}{qN_A}} \phi_S$

- Il résulte que tension sur oxide:

$$V_{ox} = \frac{qN_A x_d x_{ox}}{\epsilon_{ox}} = \frac{qN_A}{C_{ox}} \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}}{qN_A}} \phi_S$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_A \epsilon_{Si}}}{C_{ox}}$$

6.2.3. Tension de seuil du condensateur MOS idéal

- Définition de la tension de seuil ("Threshold"), V_T : V_T est la tension appliquée sur porte, qui attire **la même concentration des porteurs minoritaires à surface du semiconducteur que les porteurs majoritaires en volume.**

$$x_{d \max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}}{qN_A} 2|\phi_F|}$$

$$V_G = \phi_S + V_{ox}$$

$$V_G = \phi_S + \frac{\sqrt{2\epsilon_{Si}qN_A}}{C_{ox}} \sqrt{\phi_S}$$

$$V_{T0} = 2|\phi_F| + \gamma\sqrt{2|\phi_F|}$$

6.2.4. Le condensateur MOS réel

- Oxyde de porte contient des **charges électriques positives** (Na^+ , K^+ , SiO_x^+) et $\Phi_{MS} \neq 0$. Cela peut causer des transistors MOS à canal initial.
- Tous ces effets produisent la flexion des bande d'énergie réelle, à $V_G=0$.
- Définition: **tension de bande plate**, V_{FB} , ("Flat-Band") est la tension appliquée à la grille d'un condensateur MOS réel, qui compense les effets reel.

6.2.4. Le condensateur MOS réel

- Expression de tension de bande plate :

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{SS}}{C_{ox}}$$

$$V_{T,reele} = V_{T,ideale} + V_{FB}$$

$$V_T = V_{T0} + V_{FB}$$

6.3. Phénomènes physiques dans MOSFET

Nous discutons les TMOS à canal n induite.

1. Dans accumulation le transistor MOS est verrouillé (**OFF**).
2. Le transistor MOS en depletion. Porteurs majoritaires sont repoussés de la surface de semi-conducteurs et laisse derrière lui une ZCE.

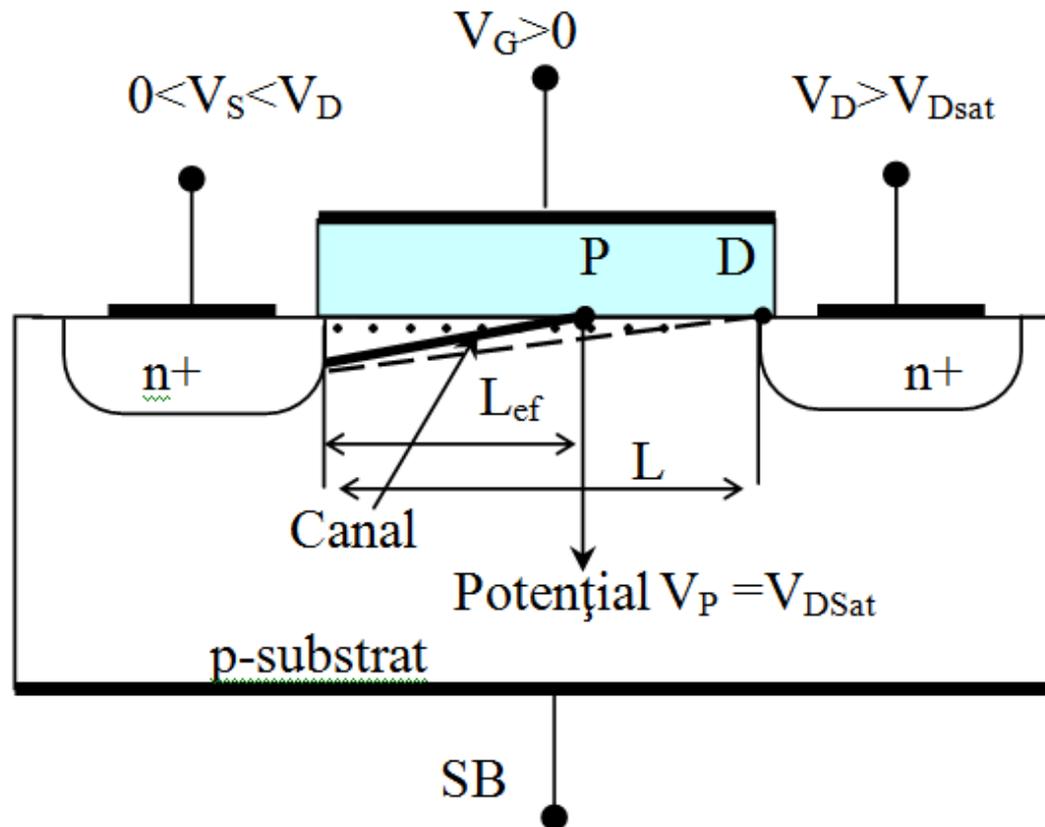
Si E_i baisse sous E_F avec $q\phi_F$, on entre dans régime d'inversion forte: $n=N_A$ et $\Phi_S = 2\Phi_F$.

6.3. Phénomènes physiques dans MOSFET

- Conduction dans T. MOS survient après l'inversion de canal , ainsi pour $V_{GS} > V_T$ lorsque nous sommes en conduction **ON** et $I_D \neq 0$.
- Rétrécissement (**ingustarea**) du canal de Source à Drain et l'élargissement (**largirea**) de ZCE de Source à Drain. (reg. quasi-linéaire).

6.3. Phénomènes physiques dans MOSFET

Effet de raccourcissement (**scurtarea**) du canal dans le régime de saturation.



6.3. Phénomènes physiques dans MOSFET

- Paramètre V_{Dsat} .
- les courbes $I_D - V_{DS}$: $V_{DS} > V_{Dsat} \rightarrow$ régime de saturation.

$$V_{Dsat} = V_{GS} - V_T$$

- Tension de seuil sur porte, pour Transistor MOS V_T :

$$V_T = 2\phi_F + V_S + V_{FB} + k\sqrt{2\phi_F + V_S}$$

6.4. Caractéristiques statiques du T. MOS

Connexion Source-Commune.

Caractéristique d'entrée : $I_G = I_G(V_{GS}) = 0$

Caractéristique de sortie: $I_D = I_D(V_{DS})$ a $V_{GS} = \text{const.}$

Caractéristique de transfert: $I_D = I_D(V_{GS})$ a $V_{DS} = \text{const.}$

- Leurs expressions sont décrites par le modèle Ithantola-Moll.

6.4. Caractéristiques statiques du T. MOS

- Modèle Ithantola Moll simplifiée:

- régime quasi-linéaire ($V_G > V_T$ et $V_D < V_{Dsat}$):

$$I_D = \beta \left[(V_G - V_T)(V_D - V_S) - \frac{1}{2}(V_D - V_S)^2 \right]$$

- régime de saturation (ON):

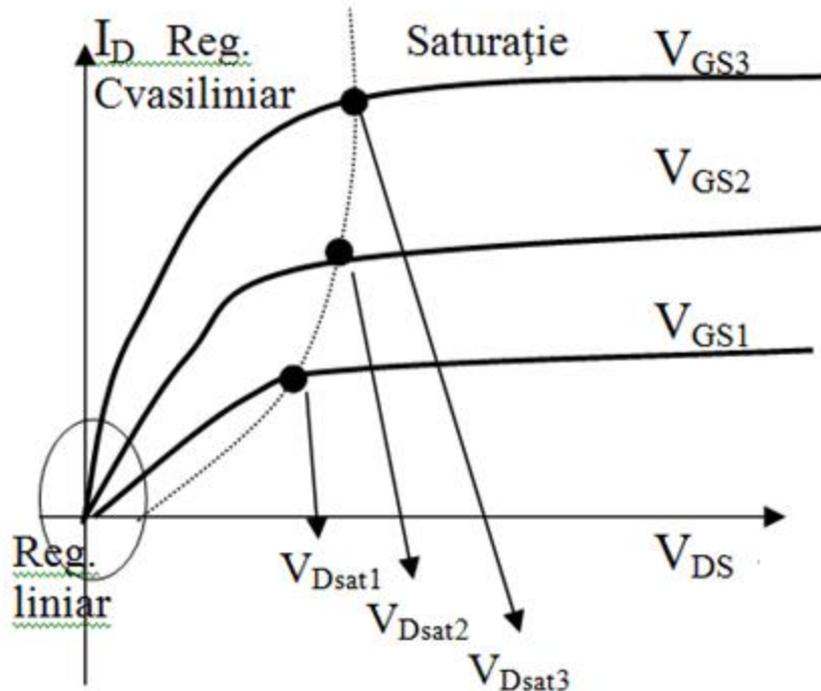
$$I_D = I_{Dsat} = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

- régime de blocage (verrouillage) (OFF)

$$I_D \cong 0$$

6.4. Caractéristiques statiques du T. MOS

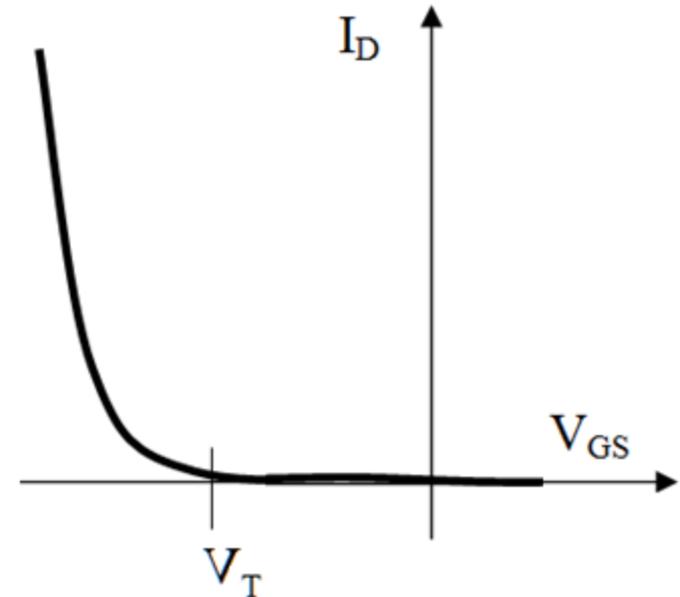
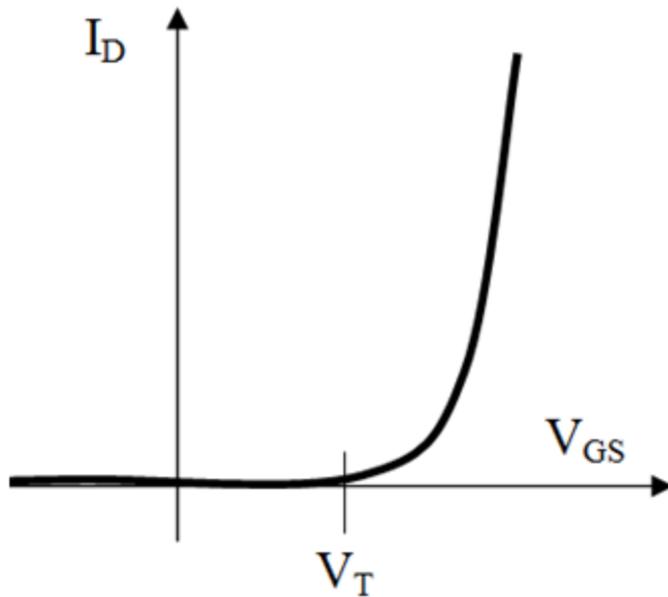
- Caractéristiques de sortie;



6.4. Caractéristiques statiques du T. MOS

- Caractéristiques de transfert.
- Canal n.

Canal p



6.4. Caractéristiques statiques du T. MOS en regime de claquage

∃ 2 mécanismes de claquage:

1. Multiplication des porteurs a j D-Sb. I_D croît, même si I_{sb} .
2. Tunnele d'oxyde. Le courant I_G peut augmenter de $10^{-15}A$ a $10^{-9}...10^{-6}A$.

6.5. Le régime dynamique du T. MOS

6.5.1. Circuit équivalent de petit signal et basse fréquence

- Les tensions appliquées ont une composante continue (notation a majuscules) et une composante variable (notation a minuscules):

$$v_{GS} = V_{GS} + v_{gs} = V_{GS} + V_{gs} \cdot \sin \omega t \quad v_{DS} = V_{DS} + v_{ds} = V_{DS} + V_{ds} \cdot \sin \omega t$$

- A basse fréquence i_D suivre les tensions v_{GS} , v_{DS} :

$$i_D = i_D(v_{GS}, v_{DS})$$

6.5.1.

- Par différenciation :

$$i_d = g_m v_{gs} + \frac{1}{r_d} v_{ds}$$

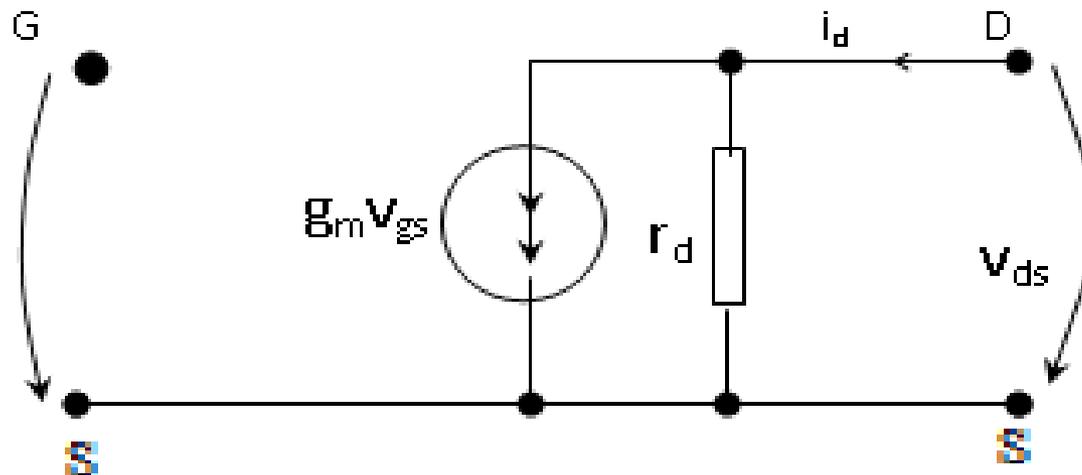
- ou

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{V_{DS} \text{ dat}} \quad g_m = \beta (V_{GS} - V_T)$$

$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right|_{V_{GS} \text{ dat}} = \lambda \cdot I_{Dsat0}$$

6.5.1.

Relation i_d , suggère le circuit équivalent de petit signal et basse fréquence.



6.5.2. Circuit équivalent de petit signal et haute fréquence

Circuit inclure supplémentaire les capacités.

