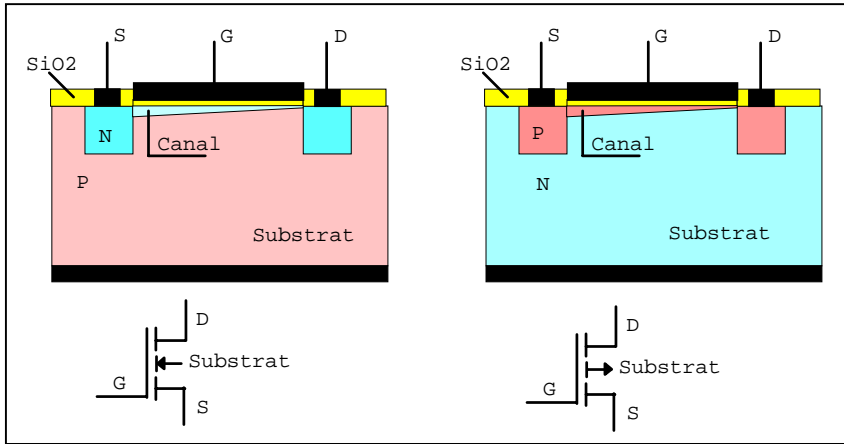
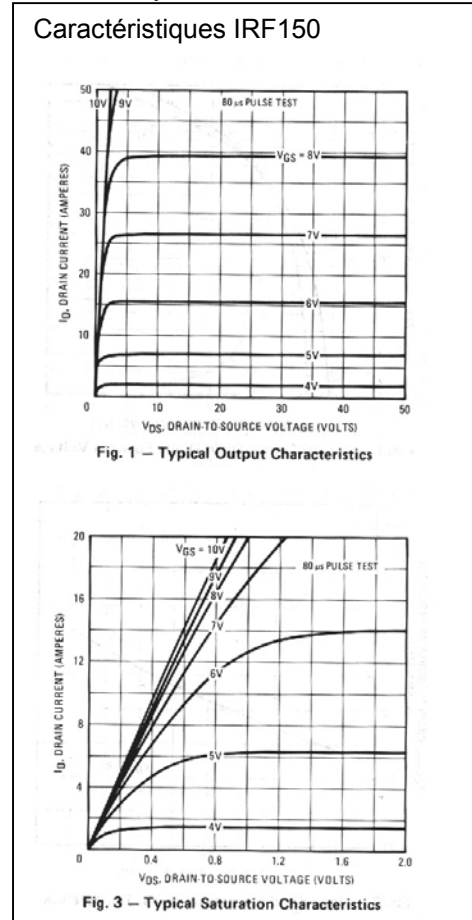


LES TRANSISTORS MOS

Un transistor MOS est constitué d'un substrat semiconducteur recouvert d'une couche d'oxyde sur laquelle est déposée une électrode métallique appelée porte ou grille (gate). Deux inclusions dont le dopage est opposé à celui du substrat sont diffusées aux deux extrémités de cette grille, elles constituent deux bornes du composant appelées source et drain. (Figure ci dessous). Dans le cas le plus courant d'un MOS canal N, le substrat est de type P. et les deux inclusions N. Si une tension positive est appliquée entre grille et substrat, le champ électrique attire les électrons et repousse les trous à la surface du substrat P créant ainsi, si la tension est suffisante, (Tension grille > tension de seuil), par inversion de population, un canal N superficiel qui peut assurer le passage du courant de la source au drain. On notera que le dispositif est symétrique, le drain est l'électrode la plus positive (pour un MOS canal N). Si une tension est appliquée entre drain et source la tension à travers la couche d'oxyde vaut V_{GS} du côté source mais $(V_{GS}-V_{DS})$ du côté drain. Le champ électrique est donc plus faible coté drain, la concentration des porteurs y est donc plus faible. Le phénomène est analogue à celui qui a été constaté pour les JFETs, le canal est pincé à droite, mais il s'agit ici d'un effet de concentration de porteurs et non un effet géométrique.



Le réseau de courbes caractéristiques d'un MOS est semblable à celui d'un JFET, avec zone ohmique et zone de pincement mais :



-Il n'y a pas de jonction, le courant de grille est vraiment nul (de l'ordre du pA au plus à cause des courants parasites superficiels)

-La tension de polarisation de grille est de même signe que la tension drain, ce qui facilite la polarisation.

Le réseau ci contre est celui d'un MOS de puissance IRF 150 dont la tension de seuil est d'environ 3V. On notera que les caractéristiques sont bien horizontales même à fort courant ce qui traduit une impédance interne élevée.

Dans la zone ohmique le courant drain obéit à l'équation suivante:

$$I_{DS} = K \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_S) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

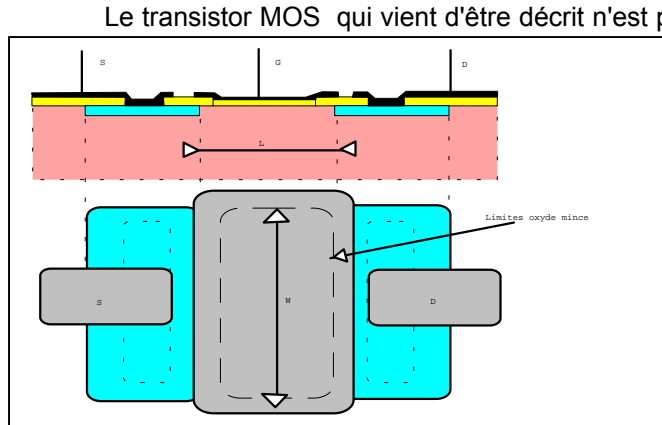
L est la longueur du canal, W sa largeur perpendiculairement au plan de dessin. Cette largeur W est toujours plus grande que la longueur du canal, (c'est cette longueur L qui est actuellement de plus en plus faible, une fraction de micron pour les MOS dans les circuits intégrés de dernière génération.)

Dans la zone de pincement on retrouve une expression semblable à celle du JFET :

$$I_{DS} = \frac{KW}{2L} (V_{GS} - V_S)^2$$

La figure suivante représente la structure réelle d'un MOS canal N .

Au niveau de la grille la couche d'oxyde est amincie par attaque chimique, l'épaisseur résiduelle est très inférieure au micron, typiquement quelques dizaines de nanomètres.



Le transistor MOS qui vient d'être décrit n'est pas la seule structure possible, on peut d'abord changer la polarité du substrat pour construire des MOS canal P qui sont pilotés par des tensions inversées par rapport aux précédentes. Il est encore possible de diffuser lors de la fabrication un mince canal entre source et drain.(canal préalable) Dans ce cas un courant passe en présence d'une tension nulle sur la grille (le I_{DSS} n'est plus nul), et pour annuler le courant drain il faut appliquer sur la grille une tension qui repousse les porteurs du canal c'est à dire négative pour un canal N. La caractéristique

Courant drain en fonction de la tension grille ressemble alors à celle d'un JFET avec une tension de seuil négative (Pour un canal N) mais pas de limitation pour $V_{GS} > 0$.(absence de jonction)

La figure ci contre représente les 4 configurations possibles.

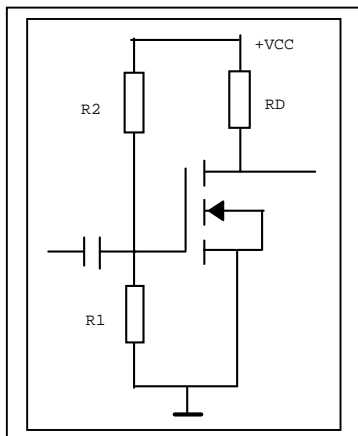
MOS à canal induit (ou enrichissement) canal N ou P (en bleu)

MOS à canal préalable (ou appauvrissement) canal N ou P (rares) (en rouge)

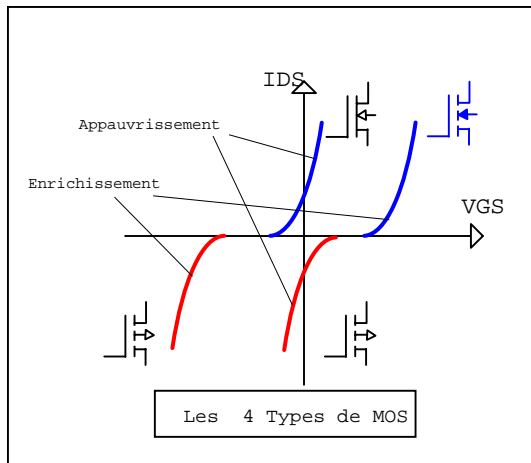
Pour de petits signaux le schéma équivalent est, du moins si on cherche par une grande précision, le même que celui des JFET .

Mise en œuvre

Il n'y a sur le marché qu'un choix limité de MOS de faible puissance N ou P toujours à canal induit. Ces composants peuvent être utilisés pour réaliser des amplificateurs, ou des étages suiveurs. La polarisation est facile à réaliser avec un simple pont de résistances qui peuvent être aussi grandes que l'on veut puisque le courant de grille est nul.

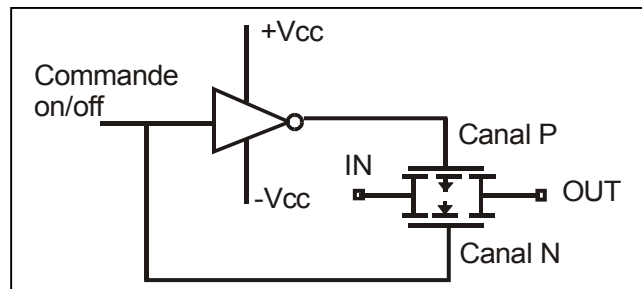


Une autre application des petits MOS est la réalisation de portes analogiques, ce sont des circuits qui se comportent comme des interrupteurs mécaniques mais commandés par une tension. Le CD4016 dont la structure est représentée ci dessous est une porte analogique très utilisée. Elle est constituée



Les MOS de faible puissance sont l'un des constituants essentiels des circuits logiques, dans ce domaine ils représentent la presque totalité des composants actifs .La série logique CD 4000 est construite par association de MOS P et N (Famille CMOS qui sera décrite plus loin), Les premiers circuits de la famille sont constitués de MOS P et N appairés utilisables individuellement

Une autre application des petits MOS est la réalisation de portes analogiques, ce sont des circuits qui se comportent comme des interrupteurs mécaniques mais commandés par une tension. Le CD4016 dont la structure est représentée ci dessous est une porte analogique très utilisée. Elle est constituée



de 2 MOS complémentaires de façon à symétriser la caractéristique de transfert. La tension d'entrée V_{in} doit bien sûr être comprise entre $+V_{cc}$ et $-V_{cc}$. Pour travailler avec des signaux centrés sur zéro on alimente souvent le circuit entre $+$ et $-7,5V$.

Dans cette application le paramètre essentiel du MOS est sa résistance équivalente, c'est la pente de la caractéristique $I_{DS}=f(V_{DS})$ pour $V_{DS}=0$.

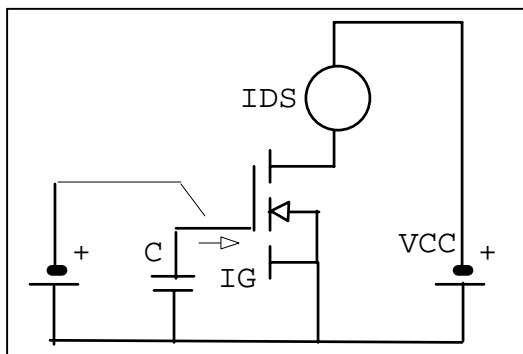
En utilisant l'équation des caractéristiques dans la zone ohmique cette résistance a pour expression :

$$r = \frac{KW}{L} (V_{GS} - V_S)$$

Elle est d'autant plus faible que la tension de polarisation de grille est grande, en réalité dès que V_{GS} dépasse 7 ou 8 volts elle prend une valeur limite, c'est le r_{on} du MOS.

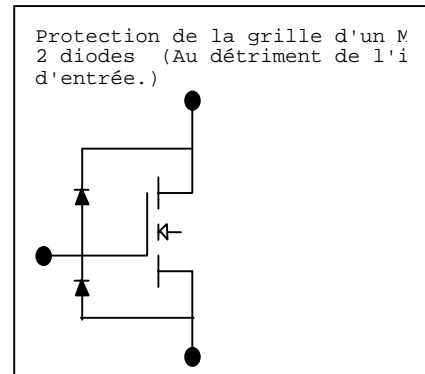
Pour le 4016 cette résistance est de l'ordre de 400Ω c'est à dire que lorsque les deux MOS sont conducteurs (niveau logique haut à l'entrée de commande) l'interrupteur se comporte comme une résistance de 200Ω entre les deux accès V_{in} et V_{out} .

Note: Mesure du courant de fuite de grille d'un MOS



Les MOS de faible puissance sont très facilement détruits par une surtension sur la grille et donc sensibles aux parasites électrostatiques. Un MOS dont la grille n'est pas protégée par des diodes est détruit si on touche sa grille. Le courant de grille n'est pas rigoureusement nul mais très faible, ce n'est pas le courant qui traverse la silice mais un courant de surface, sur le silicium et le boîtier. Pour un boîtier bien propre ce courant est souvent inférieur à $10^{-15}A$. Il est impossible de mesurer directement de tels courants, le plus simple est d'utiliser le MOS lui même comme voltmètre.

Lors d'une expérience préliminaire on trace d'abord la caractéristique $I_{DS}=f(V_{GS})$. Puis on place entre grille et masse un condensateur très bien isolé (c'est le point délicat) que l'on charge en touchant son armature supérieure avec un fil relié à une source convenable. Il suffit de suivre ensuite l'évolution du courant drain, qui grâce à la courbe précédente permet de remonter à la valeur de la tension grille. Pour un condensateur de $10pF$ et un courant de fuite de $10^{-15}A$ la tension grille varie de 1 volt en 3 heures.



Les MOS de puissance

Si l'on exclut les circuits logiques la majorité des MOS commercialisés sont des MOS de puissance. En diminuant le quotient W/L il est possible de réaliser des éléments capables de piloter des courants importants. Ces composants remplacent de plus en plus les transistors bipolaires de puissance car:

Ils existent pour des courants plus importants. Plusieurs dizaines d'ampères en continu, des centaines en impulsions.

Ils ne sont pas sujets au phénomène de second claquage ni à l'emballement thermique. Contrairement aux bipolaires, le courant drain à tension grille fixe diminue lorsque la température augmente.

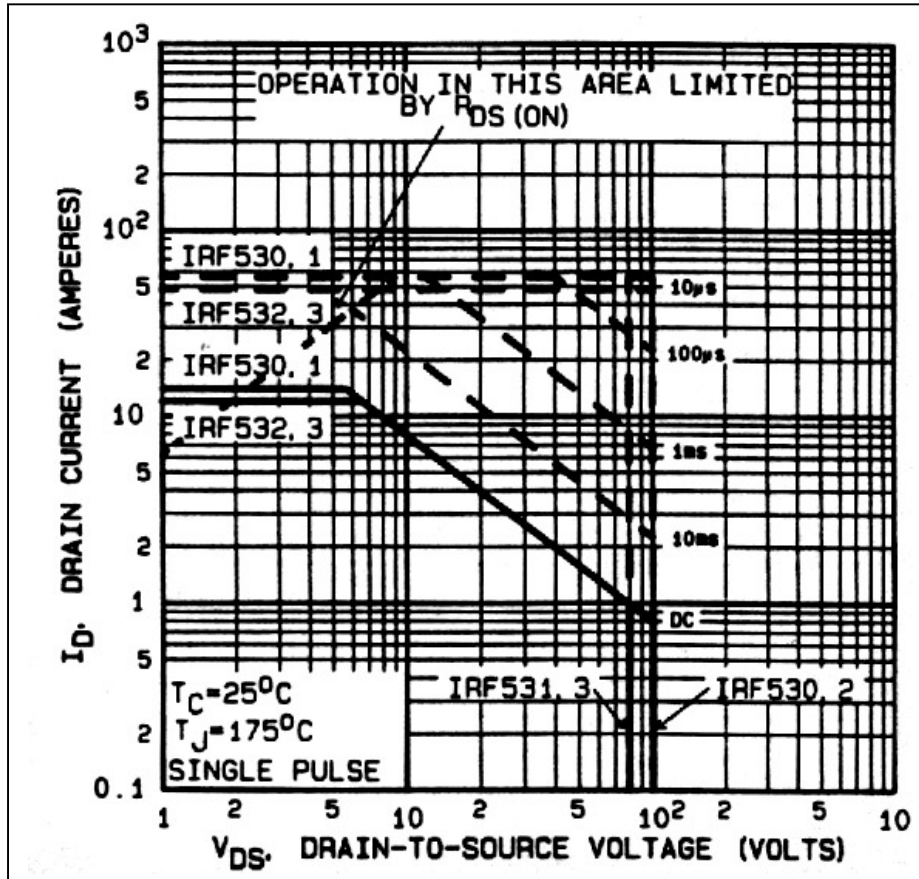
Leur résistance r_{on} (voir plus haut) peut être très faible, quelques milliohms, ce qui les rend aptes à traiter des courants forts sans chute de tension importante. Pour 10A un 2N3055 à une tension aux bornes de plusieurs volts alors qu'un BUZ11 se contente de 0,4V ($r_{on}=40m\Omega$)

Ils sont beaucoup plus rapides, pour 10A un 2N3055 commute en 15 ou $20\mu S$ alors qu'un BUZ11 le fait en 20nS, c'est 1000 fois mieux. **Mais attention** il faut que le temps de montée du signal de grille soit assez court or **la capacité grille source peut être très**

grande , plusieurs nF pour un gros MOS. Le circuit d'attaque doit être capable de délivrer un courant important, pour monter le potentiel grille de 0 à 5V en 1nS le courant nécessaire est de 5A si la capacité d'entrée est de 1000pF.

Les MOS de puissance sont cependant plus fragiles que les bipolaires, la grille est sensible aux champs électrostatiques (c'est moins vrai pour les gros MOS qui ont une grosse capacité d'entrée) ,ils sont également facilement détruits par une sur-intensité brève. (ils sont rapides et leur r_{on} faible)

Tous les fabricants de semiconducteurs commercialisent des MOS de puissance, parmi ceux dont le catalogue est le plus volumineux nous citerons INTERNATIONAL RECTIFIER (transistors IRF...) MOTOROLA SIEMENS (BU...) THOMSON PHILIPS etc... Les tensions de drain maximum admissibles atteignent 1500V et les r_{on} peuvent être inférieures à $8m\Omega$



La figure ci contre représente les limites de dissipation thermique d'un MOS de puissance type IRF530 de International Rectifier. En régime continu pour une tension drain de 10V le courant maximal admissible est de 8A , soit une puissance de 80W (à 25° boîtier) .Pour 100V ce courant est de 0,8V ce qui correspond à la même puissance . Les MOS ne sont pas sujets au second claquage . Ces courbes montrent que pour une impulsion de 1ms le courant avec 100V de drain peut atteindre 7A .

Les MOS double grille

Il existe sur le marché un nombre très limité de ces composants . Ce sont des MOS possédant deux grilles de commande , le courant drain est alors une fonction complexe des deux potentiels appliqués à ces grilles. Ils sont utilisés comme mélangeurs en UHF (voir plus loin) car pour de petits signaux on peut écrire $i = u_1.u_2$, le courant contient un terme qui est le produit des signaux sur les deux grilles. Ces MOS sont de type canal préalable ce qui permet de travailler avec l'une des grilles au potentiel moyen nul.

Les caractéristiques ci contre sont celles d'un BRF84 de PHILIPS . On notera que pour une tension de grille 2 de +4V la tension de grille 1 peut varier de 0 à -2V , alors que pour $V_{G2}=0$ V_{G1} varier de -2 à +3V environ. (pour un courant de drain compris entre 0 et 16mA)

