

3.2. Symboles des MOSFET transistors et conventions

Le symbole de circuit conventionnel pour le MOSFET en mode enrichissement canal n est représenté sur la figure 3.2 (a). La ligne continue verticale désigne l'électrode de grille, la ligne pointillée verticale désigne le canal (la ligne interrompue indique que le dispositif est en mode enrichissement) et la séparation entre la ligne de grille et la ligne de canal désigne l'oxyde qui isole la grille du canal. La polarité de la jonction pn entre le substrat et le canal est indiquée par la pointe de flèche sur le corps ou la borne du substrat. La direction de la pointe de flèche indique le type de transistor, qui dans ce cas est un dispositif à canal n. Ce symbole montre la structure à quatre bornes du transistor MOSFET. Dans la plupart des applications de ce texte, nous supposerons implicitement que la source et les bornes du substrat sont connectées ensemble. Le dessin explicite de la borne de substrat pour chaque transistor d'un circuit devient redondant et rend les circuits plus complexes. Au lieu de cela, nous utiliserons le symbole de circuit pour le MOSFET à canal n illustré à la figure 3.2 (b). Dans ce symbole, la pointe de flèche se trouve sur le terminal source et indique le sens du courant qui, pour le dispositif à canal n, est hors de la source.

En incluant la pointe de flèche dans le symbole, nous n'avons pas besoin d'indiquer explicitement les bornes de source et de drain. Nous utiliserons ce symbole de circuit dans tout le texte, sauf dans des applications spécifiques.

Dans les textes et articles de revues plus avancés, le symbole de circuit du MOSFET à canal n représenté sur la figure 3.2 (c) est généralement utilisé. La borne de grille est évidente et il est implicitement compris que la borne « supérieure » est le drain et la borne « inférieure » est la source. La borne supérieure, dans ce cas le drain, est généralement à une tension plus positive que la borne inférieure. Dans ce texte d'introduction, nous utiliserons le symbole illustré à la Figure 3.2 (b) pour plus de clarté.

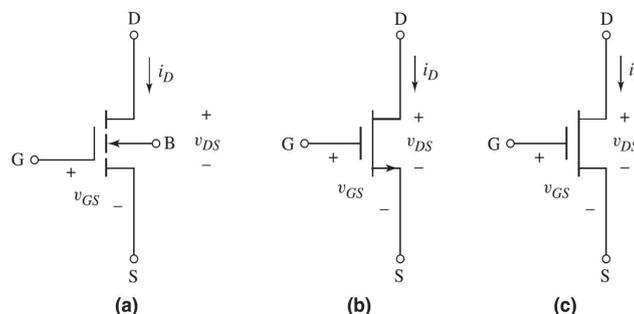


Figure 3.2.1 Le MOSFET en mode enrichissement à canal n: (a) symbole de circuit conventionnel, (b) symbole de circuit qui sera utilisé dans ce cours, et (c) symbole de circuit simplifié utilisé dans des textes plus avancés..

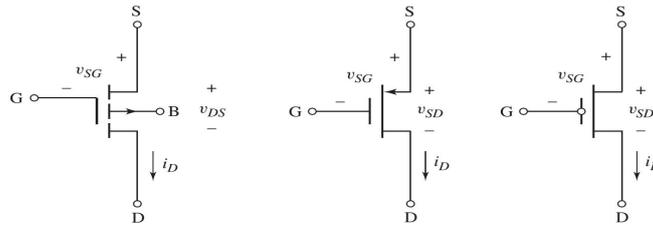


Figure 3.2.2 Le MOSFET en mode enrichissement à canal p: (a) symbole de circuit conventionnel, (b) symbole de circuit qui sera utilisé dans ce cours, et (c) symbole de circuit simplifié utilisé dans des textes plus avancée.

Le symbole de circuit conventionnel pour le MOSFET en mode d'amélioration de canal p apparaît sur la Figure 3.2.2 (a). Notez que la direction de la tête de flèche sur la borne de substrat est inversée par rapport à celle du dispositif en mode d'amélioration de canal n. Ce symbole de circuit montre à nouveau la structure à quatre bornes du dispositif MOSFET. Le symbole de circuit pour le dispositif en mode d'amélioration du canal p illustré à la Figure 3.2.2 (b) sera utilisé dans ce texte. La pointe de flèche se trouve sur le terminal source indiquant la direction du courant, qui pour le dispositif à canal p est dans le terminal source. Dans des textes plus avancés et des articles de revues, le symbole de circuit du MOSFET à canal p représenté sur la figure 3.2.2 (c) est généralement utilisé. Là encore, la borne de porte est évidente mais comprend le symbole O pour indiquer qu'il s'agit d'un dispositif PMOS. Il est implicitement compris que la borne « supérieure » est la source et la borne « inférieure » est le drain. La borne supérieure, dans ce cas la source, est normalement à un potentiel plus élevé que la borne inférieure. Encore une fois, dans ce texte, nous utiliserons le symbole illustré à la figure 3.2.2 (b) pour plus de clarté.

3.2.1. Structures supplémentaires des MOSFET et leurs symboles

Avant de commencer à analyser les circuits à MOSFET, il y a deux autres structures MOSFET en plus du dispositif de mode enrichissement canal n et du dispositif de mode enrichissement canal p qui doivent être pris en compte.

3.2.2. MOSFET en mode appauvrissement canal n

La figure 3.2.3 (a) montre la coupe transversale d'un MOSFET en mode appauvrissement canal n. Lorsque zéro volt est appliqué à la grille, une région à canal n ou couche d'inversion existe sous l'oxyde à la suite, par exemple, d'impuretés introduites lors de la fabrication du dispositif. Puisqu'une région n relie la source n et le drain n, un courant drain-source peut être généré dans le canal même avec une tension de grille nulle. Le terme modem d'épuisement signifie qu'un canal existe même à une tension de grille nulle. Une tension de grille négative doit être appliquée au MOSFET en mode appauvrissement canal n pour que le courant qui passe du drain vers la source soit nul.

La figure 3.2.3 (b) montre le MOSFET en mode appauvrissement à canal n avec une tension grille-source appliquée négative. Une tension de grille négative induit une région de charge d'espace sous l'oxyde, réduisant ainsi l'épaisseur de la région de canal n. L'épaisseur réduite diminue la conductance du canal, ce qui réduit à son tour le courant de drain. Lorsque la tension de grille est égale à la tension de seuil, qui est négatif pour ce dispositif, la région de charge d'espace induite s'étend complètement à travers la région de canal n, et le courant passe à zéro. Une tension de grille positive crée une couche d'accumulation d'électrons, comme le montre la figure 3.2.3 (c) qui augmente le courant de drain.

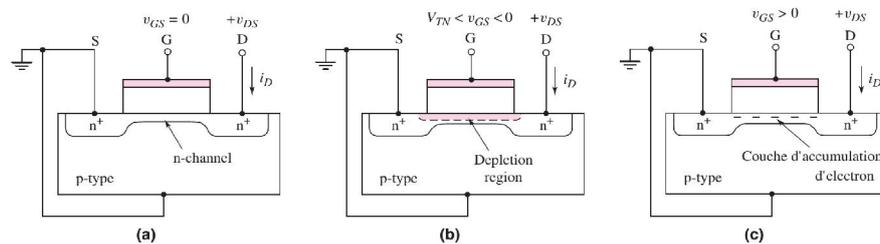


Figure 3.2.3 Coupe transversale d'un MOSFET mode appauvrissement à canal n pour: $v_{GS} = 0$, (b) $v_{GS} < 0$, et (c) $v_{GS} > 0$.

La famille de courbes générale i_D versus v_{DS} pour le MOSFET en mode appauvrissement canal n est illustrée à la figure 3.2.4.

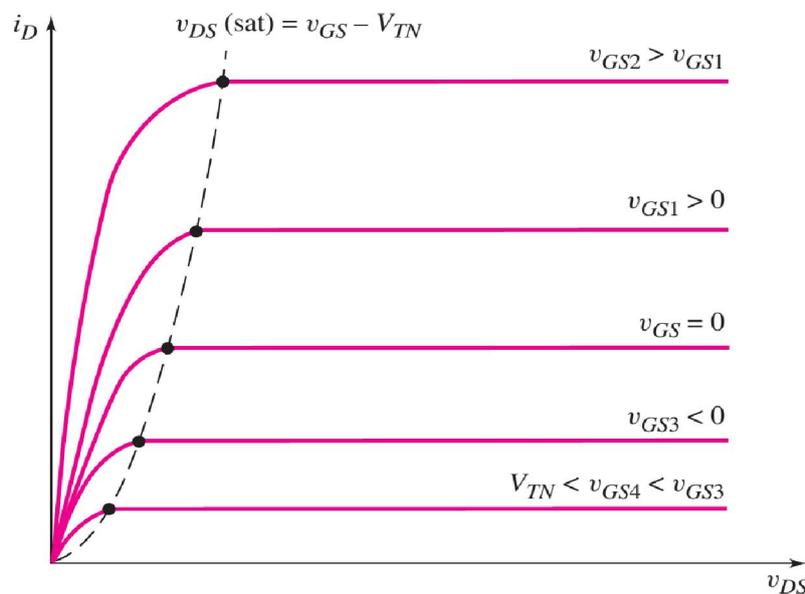


Figure 3.2.4 Famille de courbes $i_D = f(v_{DS})$ pour un MOSFET en mode d'appauvrissement à canal n. Notez à nouveau que la tension ($v_{DS(sat)}$) est un point unique sur chaque courbe.

Les caractéristiques courant-tension définies par les équations (3.2 (a)) et (3.2 (b)) s'appliquent à la fois aux dispositifs à canal n en mode enrichissement et en mode appauvrissement. La seule

différence est que la tension de seuil V_{TN} est positive pour le MOSFET en mode enrichissement et négative pour le MOSFET en mode d'appauvrissement. Même si les caractéristiques courant-tension des dispositifs en mode enrichissement et d'appauvrissement sont décrites par les mêmes équations, différents symboles de circuit sont utilisés, simplement à des fins de clarté. Le symbole de circuit conventionnel pour le MOSFET en mode appauvrissement à canal n est représenté sur la figure 3.2.6 (a). La ligne continue verticale indiquant le canal indique que l'appareil est en mode d'appauvrissement. Une comparaison des figures 3.12 (a) et 3.16 (a) montre que la seule différence entre les symboles de mode enrichissement et appauvrissement est la ligne discontinue par rapport à la ligne pleine représentant le canal.

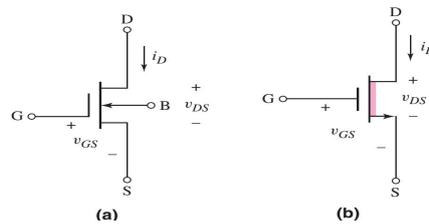


Figure 3.2.6 Le mode d'épuisement du canal n MOSFET: (a) symbole de circuit conventionnel et (b) symbole de circuit simplifié.

Un symbole simplifié pour le MOSFET en mode appauvrissement à canal n est représenté sur la Figure 3.2.6 (b). La pointe de flèche se trouve à nouveau sur le terminal source et indique la direction du courant, qui pour le dispositif à canal n est hors de la source. Le trait plein épais représente la région du canal en mode appauvrissement. Là encore, l'utilisation d'un symbole de circuit différent pour le dispositif en mode appauvrissement par rapport au dispositif en mode enrichissement est simplement pour plus de clarté dans un schéma de circuit.

3.2.3. MOSFET en mode déplétion canal p

La figure 3.2.7 montre la coupe transversale d'un MOSFET en mode appauvrissement canal p, ainsi que la configuration de polarisation et la direction du courant. Dans le dispositif en mode appauvrissement, une région de canal de trous existe déjà sous l'oxyde, même avec une tension de grille nulle. Une tension de grille positive est nécessaire pour éteindre l'appareil. Par conséquent, la tension de seuil d'un MOSFET en mode appauvrissement canal p est positive ($V_{TP} > 0$).

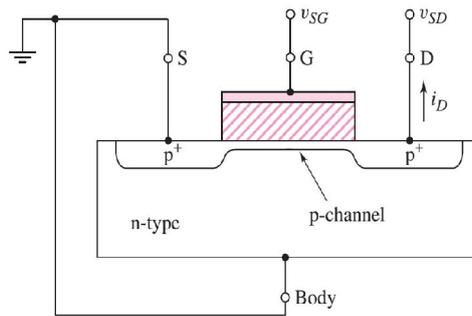


Figure 3.2.7 Coupe transversale du MOSFET en mode d'appauvrissement du canal p montrant le canal p sous l'oxyde à une tension de grille nulle

Les symboles de circuit conventionnels et simplifiés pour le dispositif en mode appauvrissement du canal p sont représentés sur la figure 3.2.8. Le trait plein épais dans le symbole simplifié représente la région du canal et désigne le dispositif en mode appauvrissement. La pointe de flèche se trouve à nouveau sur la source et indique la direction actuelle.

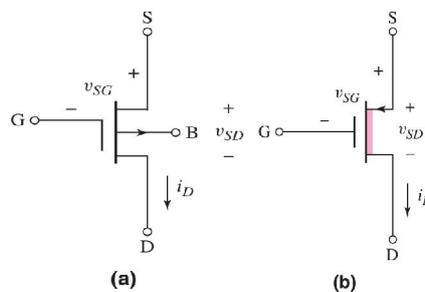


Figure 3.2.8 Le MOSFET en mode appauvrissement canal p: (a) symbole du transistor conventionnel et (b) symbole du transistor simplifié.

3.2.5. MOSFET complémentaires (CMOS)

La technologie MOS complémentaire ou (CMOS) utilise à la fois des transistor MOSFET canal n et canal p dans le même circuit. La figure 3.2.9 montre la coupe transversale des dispositifs à canal n et à canal p fabriqués sur la même puce. Les circuits CMOS, en général, sont plus compliqués à fabriquer que les circuits utilisant entièrement des dispositifs NMOS ou PMOS. Pourtant, comme nous le verrons dans les chapitres suivants, les circuits CMOS présentent de grands avantages par rapport aux circuits NMOS ou PMOS.

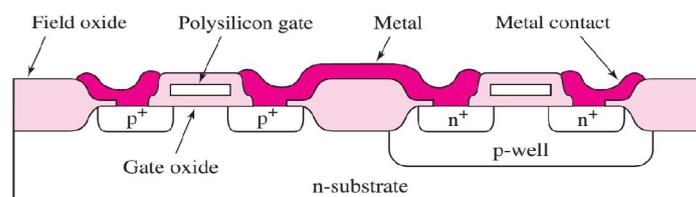


Figure 3.2.9 Coupes transversales de transistors à canal n et à canal p fabriqués avec une technologie CMOS à puits p

Afin de fabriquer des dispositifs à canal n et à canal p qui sont électriquement équivalents, l'amplitude des tensions de seuil doit être égale et les paramètres de conduction à canal n et à canal p doivent être égaux. Puisque, en général, μ_n et μ_p ne sont pas égaux, la conception de transistors équivalents implique d'ajuster les rapports largeur/longueur des transistors.

3.2.5. Résumé du fonctionnement du transistor

Nous avons présenté un modèle du premier ordre du fonctionnement du transistor MOS. Pour un MOSFET en mode d'amélioration à canal n, une tension grille-source positive, supérieure à la tension de seuil V_{TN} , doit être appliquée pour induire une couche d'inversion d'électrons.

Pour $v_{GS} > V_{TN}$, l'appareil est allumé. Pour un périphérique en mode de déplétion à n canaux, un canal entre la source et le drain existe même pour $v_{GS} = 0$. La tension de seuil est négative, de sorte qu'une valeur négative de v_{GS} est nécessaire pour éteindre l'appareil. Pour un dispositif à canal p, toutes les polarités de tension et les directions de courant sont inversées par rapport au dispositif NMOS. Pour le transistor en mode d'amélioration du canal p, $V_{TP} < 0$ et pour le transistor PMOS en mode d'appauvrissement, $V_{TP} > 0$.

Le tableau ci-dessous répertorie les équations de premier ordre qui décrivent les relations $i = f(v)$ dans les périphériques MOS. On note que K_n et K_p sont des valeurs positives et que le courant de drain i_D est positif dans le drain pour le dispositif NMOS et positif hors du drain pour le dispositif PMOS.

Résumé des relations courant-tension du MOSFET	
NMOS	PMOS
Région de non saturation ($v_{DS} < v_{DS(sat)}$)	Région de non saturation ($v_{SD} < v_{SD(sat)}$)
$i_D = K_n[2(v_{GS} - V_{TN})v_{DS} - v_{DS}^2]$	$i_D = K_p[2(v_{SG} + V_{TP})v_{SD} - v_{SD}^2]$
Saturation region ($v_{DS} > v_{DS(sat)}$)	Saturation region ($v_{SD} > v_{SD(sat)}$)
$i_D = K_n(v_{GS} - V_{TN})^2$	$i_D = K_p(v_{SG} + V_{TP})^2$
Transition point	Transition point
$v_{DS(sat)} = v_{GS} - V_{TN}$	$v_{SD(sat)} = v_{SG} + V_{TP}$
Enrichissement mode	Enrichissement mode
$V_{TN} > 0$	$V_{TP} < 0$
Déplétion mode (Appauvrissement)	Déplétion mode (Appauvrissement)
$V_{TN} < 0$	$V_{TP} > 0$

Exercices

Voir série des travaux dirigés