

LES TRANSISTORS DE PUISSANCE MOSFET

Beaucoup ne possèdent pas encore l'expérience nécessaire pour bien utiliser les transistors MOSFET. La compréhension des mécanismes de drain et de grille est vitale. Les progrès faits par l'industrie des semiconducteurs, la chute des prix ainsi que l'expansion de la gamme de produits ont augmenté l'attrait des transistors de puissance MOSFET. Les transistors bipolaires continuent cependant à dominer les circuits de puissance. Les transistors MOSFET se comportent pourtant à beaucoup d'égards mieux que leurs homologues bipolaires. Ils commutent plus rapidement, se contentent d'un circuit de commande de grille plus simple, ne sont pas sensibles au mécanisme de destruction par second claquage et peuvent être mis en parallèle facilement; enfin ils offrent un gain et un temps de réponse pratiquement indépendant de la température.

Pourquoi, malgré tous leurs avantages les transistors MOSFET ne sont-ils pas plus utilisés? Il est vrai qu'ils présentent une plus grande résistance directe et que peu de produits sont caractérisés au-dessus de cinq cents volts, mais ceci ne constitue pas un handicap suffisant; de même que leur coût plus élevé car, dans beaucoup d'applications, leur circuit de commande plus simple les rend concurrentiels. La barrière la plus importante à leur emploi semble plutôt être leur différence de comportement avec les transistors bipolaires aujourd'hui si familiers, dans leur principe de fonctionnement, leur caractérisation et leurs performances. Comme avec toute nouvelle technologie, l'utilisateur doit acquérir une nouvelle formation de base avant de pouvoir s'y sentir plus à l'aise. Concevoir un circuit avec des transistors MOSFET exige une parfaite compréhension des relations fondamentales qui existent entre les régions drain-source et grille-source. Une fois comprises ces relations, l'ingénieur pourra apprécier non seulement les avantages de la technologie MOSFET mais aussi en percevoir les limites.

Le transistor bipolaire NPN conventionnel est un composant commandé en courant qui comporte une jonction émetteur-base PN comme source de courant et une jonction base-collecteur PN comme collecteur de courant. Les transistors bipolaires sont des composants à porteurs minoritaires, le courant de collecteur étant contrôlé par une injection de porteurs minoritaires (électrons) dans la base. Les transistors bipolaires sont ainsi pénalisés en commutation, leur vitesse étant limitée par un mécanisme d'accumulation de charges associé à

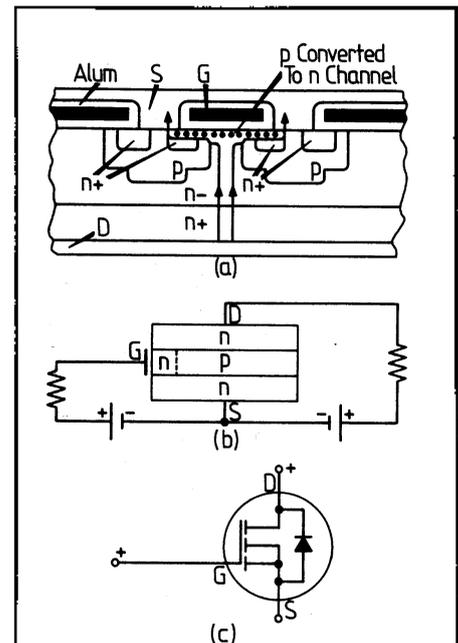
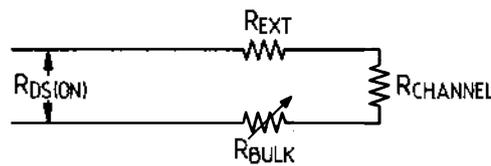
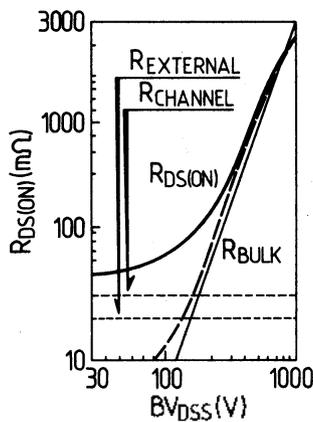


Fig. 1 : Le transistor MOSFET, contrôlé en tension par une grille isolée galvaniquement, utilise des porteurs majoritaires pour déplacer le courant de la source au drain (a). Le secret du fonctionnement du MOSFET réside dans la création d'une couche d'inversion dans le canal au droit de la grille lorsque une charge électrique est appliquée sur la grille (b). De par la construction même du MOSFET, il y a formation d'une diode en parallèle sur le composant (c), diode que l'utilisateur peut employer dans bon nombre de circuits.

ces porteurs minoritaires. Qui plus est, de par leur entrée base-émetteur commandée en courant, ils présentent une charge de faible impédance à leur circuit de commande qui, dans la plupart des circuits de puissance, nécessitera un étage pilote plus complexe pour obtenir une commande adéquate.

Le transistor de puissance MOSFET au contraire est un composant commandé en tension par l'intermédiaire



Percentage Résistance Components for a typical chip

BV _{DSS}	40V	150V	500V
R _{CHANNEL}	50 %	23 %	24 %
R _{BULK}	35 %	70 %	97 %
R _{EXTERNAL}	15 %	7 %	<1 %

Fig. 2: La résistance entre drain et source $R_{DS(on)}$ d'un MOSFET est composée de trois résistances séparées.

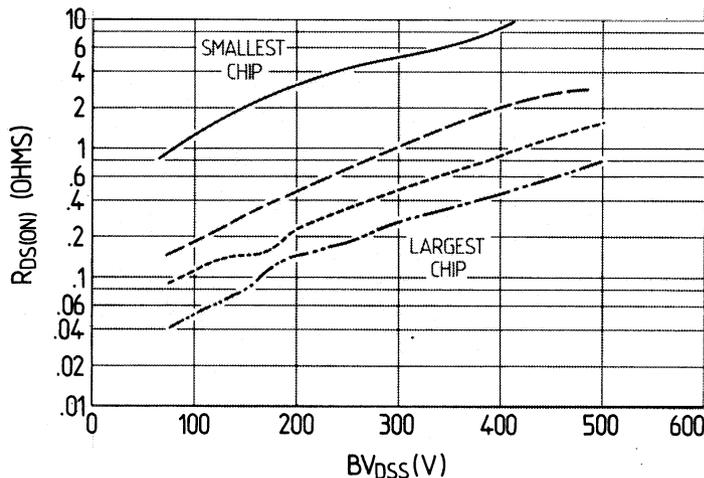


Fig. 3: La $R_{DS(on)}$ diminue et la tension de blocage augmente avec la taille de la puce.

d'une électrode de grille (Figure 1a) galvaniquement isolée du reste du composant (silicium) par une fine couche de dioxyde de silicium (SiO₂). La structure à porteurs majoritaires confère au MOSFET des vitesses de travail beaucoup plus grandes que celles de son homologue bipolaire car il n'y a pas de mécanisme d'emmagasinage de charges. Une tension positive appliquée à la grille d'un MOSFET à canal N, repousse les charges positives de la surface du silicium, convertissant ainsi en type N la région du canal directement sous la grille (Figure 1b). Cet effet appelé inversion de surface permet au courant de circuler entre drain et source au travers d'un matériau entièrement N. En fait le MOSFET cesse d'être une structure NPN à ce moment et la région située entre le drain et la source peut être représentée par une

résistance, bien que non linéaire à l'opposé des résistances conventionnelles. L'inversion de surface rend inopérante les jonctions PN qui limitent le canal et l'injection de porteurs minoritaires qui se produit dans les transistors bipolaires, leur conservant leur caractère NPN, n'a pas lieu.

L'isolation galvanique de leur grille confère aux transistors MOSFET une entrée à haute impédance, ils se commandent en tension, alors que les transistors bipolaires à faible impédance d'entrée se commandent en courant. Un transistor MOSFET en tant que structure à porteurs majoritaires ne nécessite aucune accumulation de charges, il commute donc plus rapidement qu'un transistor bipolaire. Un autre avantage des porteurs majoritaires réside dans le comportement en température de leur mobilité (vélocité moyenne du por-

teur en fonction du champ électrique qui lui est appliqué). Celle-ci a tendance à diminuer avec la température. Le MOSFET est plus résistif aux températures élevées et donc beaucoup moins sensible au phénomène d'emballage thermique des transistors bipolaires.

Le transistor MOSFET présente la particularité intéressante d'avoir incorporé, sur la même puce, une diode formée entre drain et source (Figure 1c). Il n'y a aucun équivalent à cette diode dans un transistor bipolaire bien qu'on la trouve dans les transistors Darlington. Ses caractéristiques en font une bonne diode pour limiter les pointes de tensions apparaissant en commutation sous charge inductive (il se peut cependant que dans certaines applications la diode abaisse la vitesse de fonctionnement du circuit).

Les fabricants de presque tous les transistors de puissance MOSFET utilisent une structure verticale à double diffusion (DMOS). Un transistor MOSFET DMOS est constitué d'une multitude de cellules hexagonales placées à côté les unes des autres sur un substrat unique. La quantité de cellules varie en fonction de la grandeur de la puce (appelée aussi pastille). Par exemple, une puce de taille 120 mils, carré comporte environ 5000 cellules tandis qu'une puce de 240 mils, carré en contiendra plus de 25000.

Un des buts de la structure multicellulaire est de diminuer la valeur du paramètre $R_{DS(on)}$ bien connu, résistance drain-source. Avec cette $R_{DS(on)}$ minimale, le composant présente d'excellentes caractéristiques en commutation de puissance la chute de tension entre drain et source étant elle-même réduite.

Les cellules dans un MOSFET sont toutes en parallèle. Plus leur nombre est grand, plus la $R_{DS(on)}$ est faible. On a :

$$R_{DS(on)} = R/N/N,$$

où N est le nombre de cellules.

Cette caractérisation de la $R_{DS(on)}$ est précise, mais simpliste.

La $R_{DS(on)}$ n'est pas en réalité une simple résistance comme on pourrait le penser en considérant la relation ci-dessus. En réalité, la $R_{DS(on)}$ est constituée de trois composantes séparées, R corps, R canal et R externe. La figure 2 indique comment varie la résistance totale $R_{DS(on)}$ et

ses trois composantes en fonction de la caractéristique en tension V_{DS} du composant. La valeur de la $R_{DS(on)}$ en n'importe quel point de la courbe est déterminé simplement par la somme des valeurs des trois composantes en ce point :

$$R_{DS(on)} = R_{corps} + R_{canal} + R_{externe}$$

Dans cette équation, R_{canal} représente la résistance du canal sous la grille, $R_{externe}$ comprend toutes les résistances provenant du substrat, des connexions de soudure, des raccordements et du boîtier, R_{corps} représente la résistance due à la partie « étranglée » du matériau N entre les deux couches P (Figure 1a) ainsi que la résistance rencontrée par le courant sous cette partie et celle rencontrée au travers du corps de la pièce en direction du drain.

Les courbes de la figure 2 font ressortir deux caractéristiques importantes : R_{canal} et $R_{externe}$ sont complètement indépendantes de la tension, tandis que R_{corps} en dépend fortement. Les courbes montrent aussi quelles sont les résistances qui contribuent principalement à la $R_{DS(on)}$. En-dessous de 150 volts, $R_{DS(on)}$ est dominée par la combinaison de $R_{canal} + R_{externe}$. Au-dessus de 150 volts, R_{corps} en constitue la composante principale. Le tableau de la figure 2 donne la répartition en pourcentage des différentes résistances pour trois valeurs de tension. Remarquons le poids de plus en plus grand de R_{corps} lorsque la tension augmente les autres résistances perdant leur influence.

L'importance de R_{corps} dans les pièces à haute tension est due au fait qu'une épaisse couche épitaxiée faiblement dopée est nécessaire pour former la région de drain et éviter que le champ électrique dans la pièce ne devienne prohibitif entraînant un claquage prématuré. Plus la couche épitaxiée est épaisse, donc plus résistive, pour pouvoir supporter les hautes tensions, plus la contribution de R_{corps} à la résistance totale augmente (figure 3) et finit par dominer les résistances de canal et externe.

La $R_{DS(on)}$ varie dès lors avec les performances en tension de blocage du transistor. Il y aura donc un compromis à faire entre une faible $R_{DS(on)}$ et une grande tension de blocage.

On peut cependant contourner cette

impasse en jouant sur la taille de la puce. La $R_{DS(on)}$ de la figure 2 est donnée pour des puces de petite taille. Une plus grande puce aura une meilleure $R_{DS(on)}$ car constituée de beaucoup plus de cellules. Une grande taille de puce augmente donc les caractéristiques en tension des transistors MOSFET. Malheureusement une puce plus grande augmente le coût de la pièce, la taille de la puce étant le facteur majeur dans le prix de revient.

La relation taille/tension de blocage n'est malheureusement pas linéaire mais exponentielle, c'est dire si l'impact sur le coût de production peut être important. Pour obtenir, par exemple, une résistance $R_{DS(on)}$ donnée à une tension de blocage double de la valeur originelle, la nouvelle puce demande une taille quatre fois plus grande que la taille initiale. Bien que l'augmentation du coût ne soit pas exponentielle, il est nettement au-dessus du coût original.

Les MOSFET maintiennent leur fraîcheur

Les ingénieurs savent bien que les hautes températures de fonctionnement sont une cause fréquente de panne dans les transistors bipolaires. Le courant y a tendance à se concentrer dans les zones d'émetteur créant des points chauds entraînant un risque d'emballement thermique et de destruction de la pièce.

Les transistors MOSFET au contraire, dès lors que le courant circule sous la forme de porteurs majoritaires, fonctionnent d'une toute autre ma-

nière. La mobilité des porteurs majoritaires dans le silicium est fonction de la température; quand la température augmente, la mobilité décroît la puce s'échauffant et les porteurs se meuvent plus lentement.

Ce ralentissement augmente la résistance du chemin parcouru dans le silicium et empêche toute concentration de courant qui conduirait à la formation de points chauds. En fait, si un point chaud commence à se former, la résistivité locale augmente, déviant le courant vers des régions de la puce plus froides. Le MOSFET possède ainsi un coefficient de température positif (voir figure 4). La courbe de la figure montre l'augmentation de la résistance $R_{DS(on)}$ avec la température. Dans le langage de l'utilisateur ceci se traduit par une grande stabilité thermique, le transistor MOSFET en quelque sorte se protège lui-même contre l'emballement thermique et le second claquage. Cette propriété confère au transistor MOSFET l'avantage sur les transistors bipolaires de pouvoir se mettre en parallèle sans provoquer de déséquilibre de courant. Si un quelconque des transistors venait à s'échauffer, sa résistance augmenterait et le courant serait détourné vers les transistors les plus froids.

Un regard sur les paramètres de grille

Dans un MOSFET à canal N pour permettre le passage du courant du drain vers la source, il faut appliquer entre grille et source une différence de potentiel positive.

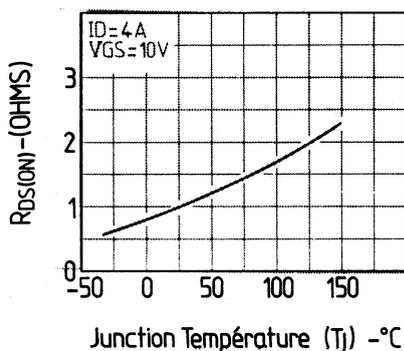


Fig. 4: Les MOSFET présentent une résistance à coefficient de température positif ce qui réduit considérablement les risques d'emballement thermiques lorsque la température augmente.

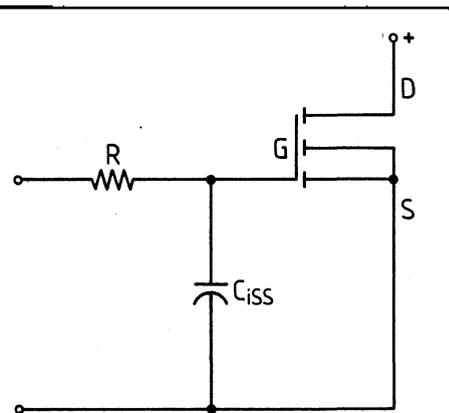


Fig. 5: La vitesse de commutation d'un transistor MOSFET est déterminée par sa résistance d'entrée R et sa capacité d'entrée C_{iss}.

Comme la grille est galvaniquement isolée, aucun courant, du moins en théorie, ne peut circuler entre la source de commande et le corps de la pièce. En réalité, un très petit courant de l'ordre de grandeur de quelques dizaines de nanoampères circule, c'est le courant de fuite I_{GSS} des feuilles de caractéristiques.

Un courant de grille si petit signifie une impédance d'entrée extrêmement grande — dans la gamme des mégohms — qui est en fait beaucoup plus capacitive que résistive en raison de la construction de l'électrode de grille. L'impédance d'entrée d'un MOSFET est constituée d'une résistance et d'une capacité (voir figure 5).

La capacité est appelée C_{iss} dans les feuilles de caractéristiques, elle résulte de la combinaison des capacités internes grille-source et grille-drain.

La résistance R représente la résistance du matériau de grille. Les deux composants équivalents R et C fixent pratiquement la limite supérieure de la fréquence de travail. La partie résistive est due à la résistance de la feuille de silicium polycristallin de la structure « overlay ». Cette valeur est approximativement égale à $20 \Omega/\square$ mais n'est jamais définie dans les feuilles de caractéristiques. Au contraire, C (C_{iss}) apparaît pratiquement dans toutes les feuilles de caractéristiques. Cette valeur est étroitement liée à la taille de la puce, elle est d'autant plus élevée que la puce est grande. Le circuit de contrôle devant charger et décharger le circuit équivalent R/C nettement capacitif, les grandes puces vont avoir des temps de commutation plus longs que les petites puces et monteront par conséquent moins haut en fréquence. Généralement la fréquence maximale d'utilisation d'un transistor MOSFET varie de 1 à 10 MHz selon la taille de la puce.

La caractéristique du transistor MOSFET qui est probablement la plus utilisée est celle de sortie dans un diagramme tension drain-source (V_{DS}) courant drain-source (I_D). Le graphique de la figure 6 donne le courant de drain qui circule pour différentes tensions V_{DS} en fonction de la tension de polarisation grille-source (V_{GS}) (en valeur typique).

La courbe est partagée en deux régions, une partie linéaire dans laquelle V_{DS} est petite et où le cou-

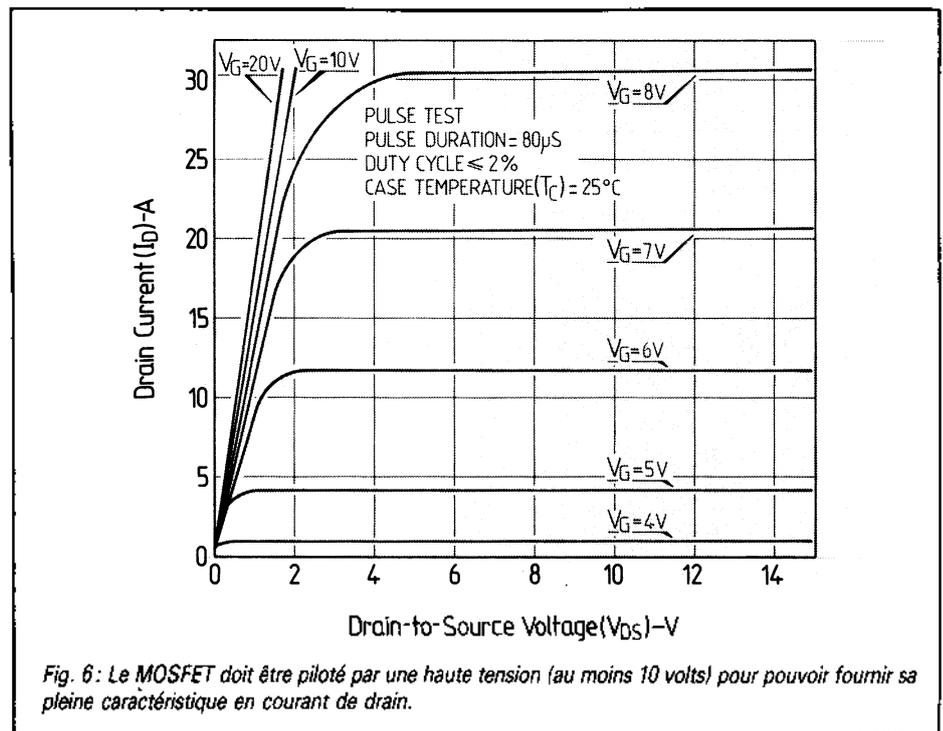


Fig. 6: Le MOSFET doit être piloté par une haute tension (au moins 10 volts) pour pouvoir fournir sa pleine caractéristique en courant de drain.

rant de drain augmente linéairement avec la tension de drain, et une région saturée dans laquelle toute augmentation de la tension de drain n'a plus d'effet sur le courant de drain (le composant réagit en source de courant constant). Là où la portion linéaire de la courbe rejoint la portion saturée, le canal du transistor MOSFET de puissance est dit « pincé »; à cet endroit, la tension entre drain et source est suffisante pour que la couche d'inversion de surface au travers de laquelle les électrons se meuvent se réduise à zéro à une des extrémités du canal.

Une nécessité: 10 volts de commande de grille

Un point important se dégage de l'examen de la tension de grille V_{GS} requise pour faire fonctionner un MOSFET. Selon la figure 6, le composant n'entre en fonctionnement, un courant de drain ne circule que pour autant que la tension de grille V_{GS} soit plus grande qu'un niveau dit de seuil. Ce niveau de seuil doit être dépassé avant qu'un courant de drain appréciable ne puisse passer. Cette tension de grille V_{GS} pour beaucoup de types CMOS est généralement d'au moins 2 volts et représente un paramètre important dans l'étude des composants ou circuits destinés à commander des transistors MOSFET. Ces circuits de contrôle

doivent au moins fournir la tension de seuil et de préférence un niveau beaucoup plus élevé.

Le transistor MOSFET nécessite en réalité une tension de grille relativement importante de l'ordre de 10 volts et plus pour obtenir un fonctionnement en saturation. Ainsi à moins d'avoir recours à une résistance externe de « pullup », les circuits intégrés TTL ne peuvent fournir la tension nécessaire. Même avec un « pullup » à 5 volts, le circuit pilote TTL ne peut saturer complètement un MOSFET. Avec un étage pilote TTL, la commande se fera dans de bonnes conditions lorsque le courant à commander sera de loin inférieur à la caractéristique en courant du MOSFET. Les circuits intégrés CMOS peuvent opérer sur des alimentations 10 volts et ainsi peuvent saturer les transistors MOSFET. Cependant, un étage pilote CMOS ne pourra commuter le circuit de porte du MOSFET aussi rapidement qu'un étage pilote à circuits TTL.

Pour de meilleurs résultats, quel que soit le circuit qui fournisse la commande TTL ou CMOS, l'ingénieur doit prévoir l'insertion d'un circuit tampon entre la sortie circuit intégré et la porte d'entrée du MOSFET.

L. MARÉCHAL
RCA - Solid State - Bruxelles

D'après T.C. Mc NULTY, Manager of Power Marketing RCA Solid State Div. SOMERVILLE NJ.