

Les MOSFETs de puissance verticaux dans la commutation de puissance à grande vitesse

par K. H. TIEFERT, DAN WEN TSANG, R.L. MEYERS et V. LI*

Un dispositif à semiconducteur à structure verticale peut constituer un MOSFET de puissance capable de commuter à cadence très rapide des courants et tensions de fortes valeurs. Il est de ce fait fort intéressant sur les alimentations à découpage, les circuits de commande d'impulsion et les amplificateurs de commutation.

En électronique, puissance et fréquence sont antinomiques. La vitesse de fonctionnement d'un dispositif, en théorie comme en technique, est limitée par sa puissance. Au fur et à mesure que de nouvelles technologies se développent, les anciennes barrières vitesse-puissance sont repoussées vers de nouvelles limites comme le montre la figure 1.

Le développement par *Hewlett Packard* d'un MOSFET de puissance vertical permet une amélioration notable des performances puissance-fréquence. Dans ce dispositif de conception entièrement nouvelle, on a conservé le meilleur des technologies existantes et on l'a associé à des techniques de fabrication de la tranche MOS très élaborées ce qui a permis d'atteindre des performances qui, dans certaines applications, sont de loin supérieures à ce qui était obtenu précédemment.

Commutation de puissance à semiconducteur

Les chercheurs et les fabricants de systèmes de commande ou de convertisseurs de puissance sont constamment à la recherche de commutateurs de meilleur rende-

ment. Cela vient du fait que l'efficacité de la commande ou de la conversion d'une puissance électrique au moyen des techniques modernes de modulation par impulsion (fig. 2) est en relation directe avec le rendement du commutateur. Une source de puissance à courant continu (en général la tension secteur redressée) est modulée par un commutateur pour régler la puissance fournie à une charge. La tension de sortie est détectée aux bornes de la charge par un circuit de contrôle qui à son tour fournit le si-

gnal de commande au modulateur par impulsion. Ce dernier maintient la puissance fournie à la charge dans les limites voulues, en faisant varier le rapport cyclique en modulant soit la largeur soit la fréquence de répétition des impulsions. Une analyse du rendement énergétique du système permet d'obtenir la définition du commutateur parfait auquel le dispositif est comparé. Pour que la consommation soit nulle, le commutateur parfait doit avoir une résistance nulle à l'état passant, et un courant de fuite nul à

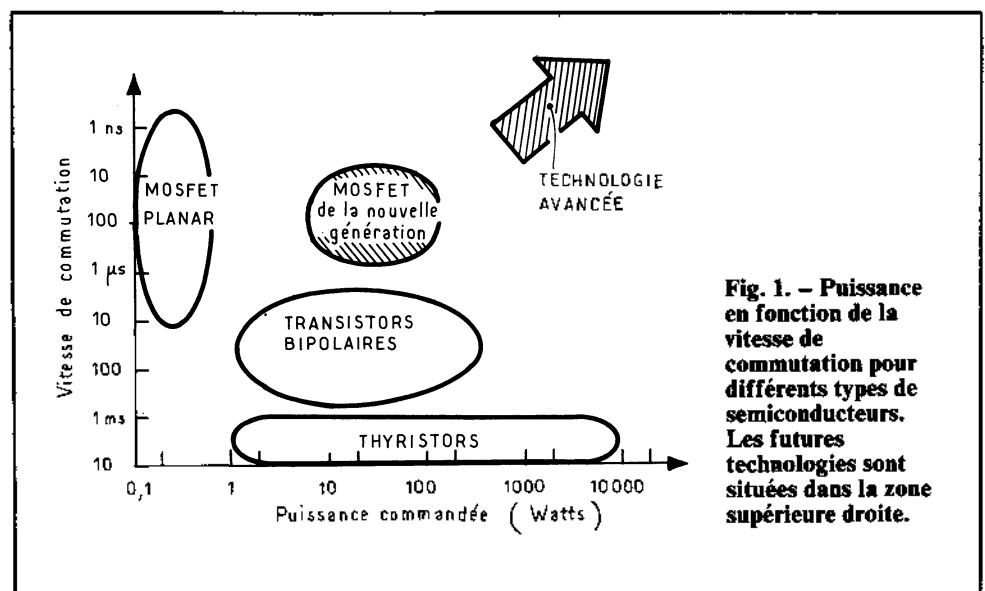


Fig. 1. - Puissance en fonction de la vitesse de commutation pour différents types de semiconducteurs. Les futures technologies sont situées dans la zone supérieure droite.

* Article traduit de l'anglais extrait de *Hewlett-Packard Journal*.

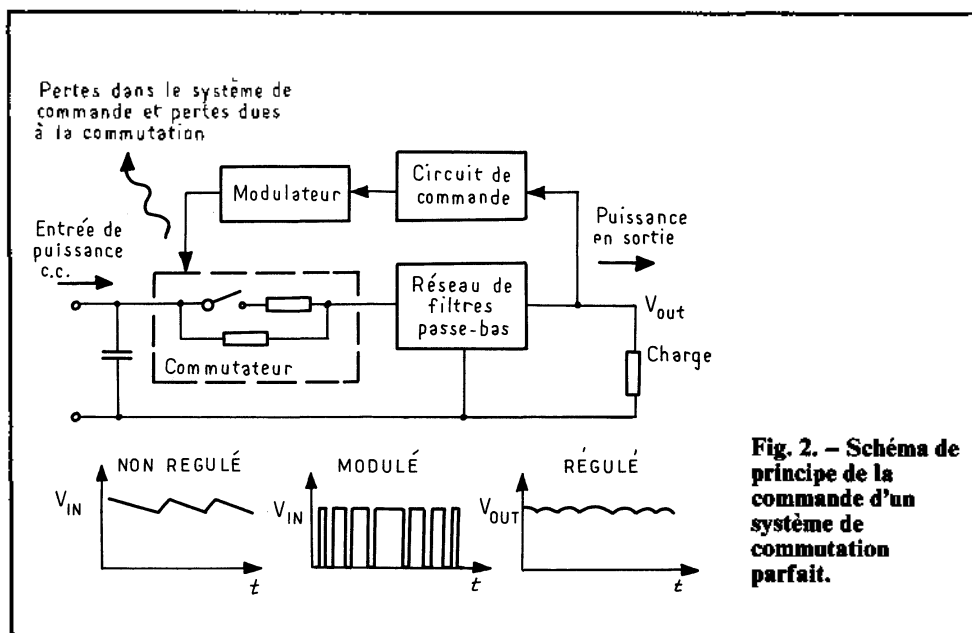


Fig. 2. - Schéma de principe de la commande d'un système de commutation parfait.

l'état bloqué, la transition entre ces deux états se produisant à un instant zéro. Le commutateur parfait doit enfin pouvoir être commandé par une puissance nulle et une fréquence de répétition infinie, cette dernière caractéristique permettant de réduire le volume des circuits magnétiques et des filtres. Dans la mesure où les caractéristiques du commutateur s'approchent de valeurs idéales, le système de commande de puissance ou de conversion devient plus efficace, moins volumineux et généralement moins cher.

Jusqu'à une date récente, les solutions conventionnelles du problème du commutateur parfait (ou pratiquement parfait), faisaient appel aux thyristors, aux transistors bipolaires ou aux transistors à effet de champ de type planar, chacun de ces dispositifs ayant ses avantages et ses inconvénients.

Le thyristor :

Le thyristor (SCR, triac, etc.) est un semi-conducteur bistable qui bloque le courant tant qu'il n'est pas rendu passant par un signal faible. Une fois rendu conducteur, il le reste tant que la tension d'alimentation n'est pas coupée ou qu'elle change de polarité. Bien que capables de contrôler de fortes puissances (jusqu'à des centaines de kilowatts), les thyristors ont une fréquence de commutation limitée à quelques kHz. Leur faible vitesse ainsi que l'impossibilité de les bloquer au moyen d'un signal de commande limitent fortement leur emploi dans le contrôle direct d'une puissance appliquée à une charge à partir du secteur. Ce sont les dispositifs les plus couramment utilisés

pour commander la vitesse des moteurs électriques ou l'intensité d'un éclairage.

Transistor bipolaire

Le cheval de bataille de la commande de puissance a été le transistor bipolaire. Ce composant, doué du don d'ubiquité a été utilisé dans toutes les applications concevables, depuis la commande de servo-moteurs jusqu'à celle d'amplificateurs de commutation.

Le transistor bipolaire est un amplificateur de courant dont le gain en continu est faible. Il nécessite en permanence le passage d'un courant de base pour rester passant. La puissance nécessaire à la commande de la base est perdue et réduit le rendement global en commutation. Bien qu'ayant une vitesse de commutation très supérieure à celle d'un thyristor, le temps de propagation associé aux pertes de commutation, à l'injection et la suppression des charges de base limitent pratiquement sa vitesse de commutation à moins de 20 kHz. Le transistor bipolaire souffre d'autres inconvénients tels que l'instabilité thermique de son potentiel et de l'effet de claquage secondaire (condition de destruction de la voie d'écoulement thermique due à la présence simultanée d'un courant fort et d'un champ électrique important). Ceci restreint son aptitude à commander une puissance lorsque la charge est réactive.

MOSFET planar

Une troisième alternative consiste à utiliser un MOSFET planar. Ce dispositif permet d'approcher d'assez près deux des caractéristiques d'un

commutateur parfait. Dispositif à commande par tension il ne nécessite qu'une très faible puissance de commande. De plus, n'ayant pas de temps de réponse comme le transistor bipolaire, le MOSFET planar peut fonctionner à des fréquences atteignant des centaines de mégahertz. Le fonctionnement d'un MOSFET planar est indiqué figure 3. Le passage du courant dans le canal est déterminé par le champ électrique provoqué par la tension appliquée à la grille. Celle-ci étant isolée du système, aucun courant continu ne passe, la seule perte d'énergie étant due à la charge et à la décharge de la capacité de grille pendant la commutation. Malheureusement le courant commandé se déplace latéralement le long d'un canal relativement long, avec pour corollaire une chute de tension entre source et drain. Il en résulte une résistance à l'état passant, comprise entre 10 et 100 Ω ce qui est loin de notre commutateur parfait. Cette importante résistance produit une déperdition de puissance dans le canal, limitant ainsi le MOSFET planar à la commutation de puissances inférieures ou égales au watt.

MOSFET de puissance vertical

Jusqu'à présent les utilisateurs de semiconducteurs de puissance n'avaient qu'un choix, favoriser la puissance ou la vitesse. Le thyristor, bien que capable de commander des kilowatts est en général limité à la commande de puissance à la fréquence secteur. Le MOSFET planar quoique particulièrement rapide ne peut commander que des puissances de l'ordre du watt. Comme compromis, le transistor bipolaire de puissance a des capacités de puissance modérées à des vitesses de commutation intermédiaires.

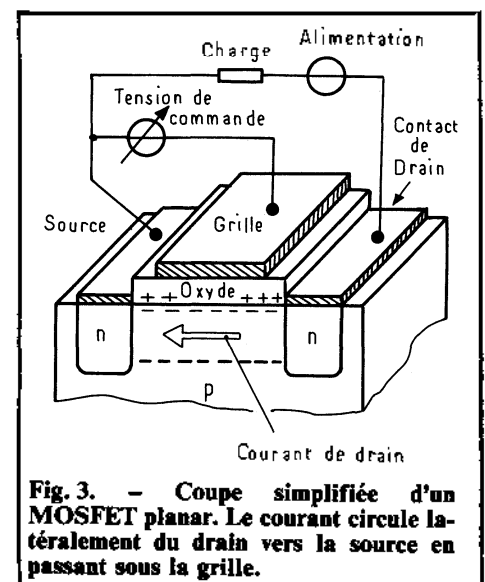


Fig. 3. - Coupe simplifiée d'un MOSFET planar. Le courant circule latéralement du drain vers la source en passant sous la grille.

A l'heure actuelle, cependant, une nouvelle technologie dénommée DMOS (MOS double diffusion) vertical a permis de combiner la puissance d'un transistor bipolaire et la vitesse de commutation d'un MOSFET dans un seul boîtier. Ce dispositif, le MOSFET de puissance de la série HP-6501 (fig. 4) fabriqué par Hewlett-Packard permet de réaliser des alimentations à découpage de coût réduit très fiables et d'excellent rendement. Son fonctionnement théorique est indiqué figure 5. Contrairement à ce qui se passe dans un MOSFET planar, le courant dans le DMOS se déplace verticalement au lieu de latéralement, ce qui permet de collecter le courant de drain sur le substrat du dispositif, de supprimer la zone de contact du drain en surface et de doubler pratiquement la surface active de grille sur la puce. Un tel accroissement de la densité d'intégration réduit le coût et augmente les performances du dispositif. Comme pour le MOSFET planar le débit du courant de drain est commandé par la tension appliquée à la grille, une tension positive amène le canal conducteur à devenir un matériau type p(*) exactement sous la couche d'oxyde de la grille. Le canal permet à un courant déterminé de passer du drain à la source. Le MOSFET vertical est à l'heure actuelle constitué de plusieurs milliers de telles cellules de base raccordées en parallèle sur une seule puce de silicium.

Présentation physique théorique

Le dessin de principe de la coupe du MOSFET de puissance Hewlett-Packard de la figure 6 montre les principaux éléments d'un tel dispositif.

Les canaux commutés sont situés à gauche, la tranche du dispositif se trouve à droite. Dans la région active on utilise une structure DMOS du canal n. Le canal est réalisé au moyen de deux processus de diffusion thermique préférés à la photolithographie, car permettant d'obtenir un canal très court, de longueur très bien déterminée. Le canal diffusé a

(*) Tout au long de ce texte, il est fait référence à des concentrations variées d'impureté (dopage) notées p^- , p^+ , n^- , n^+ . Les impuretés des accepteurs sont indiquées par la lettre p, celles des donneurs par la lettre n. Les régions peu dopées sont repérées par le signe - et celles fortement dopées par le signe + (concentration supérieure à 10^{19} atomes par cm^3).

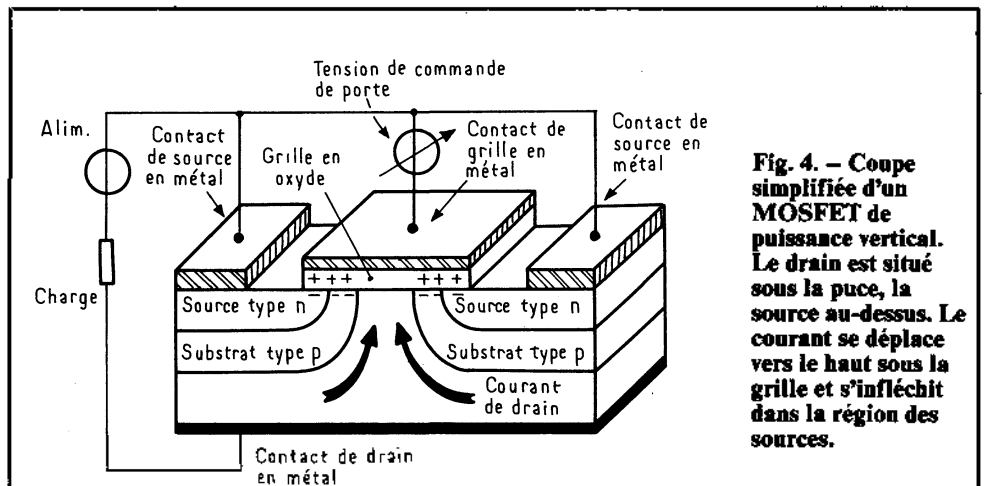


Fig. 4. - Coupe simplifiée d'un MOSFET de puissance vertical. Le drain est situé sous la puce, la source au-dessus. Le courant se déplace vers le haut sous la grille et s'infléchit dans la région des sources.

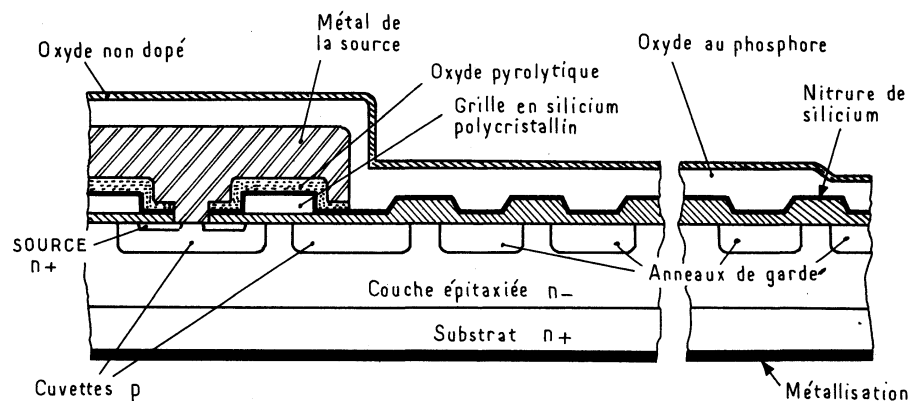


Fig. 5. - Coupe du MOSFET de puissance vertical H.P., montrant la structure des anneaux de garde sur la droite. Cette structure permet une distribution des champs électriques aux abords de la surface supérieure pour maintenir les caractéristiques de claquage sous haute-tension.

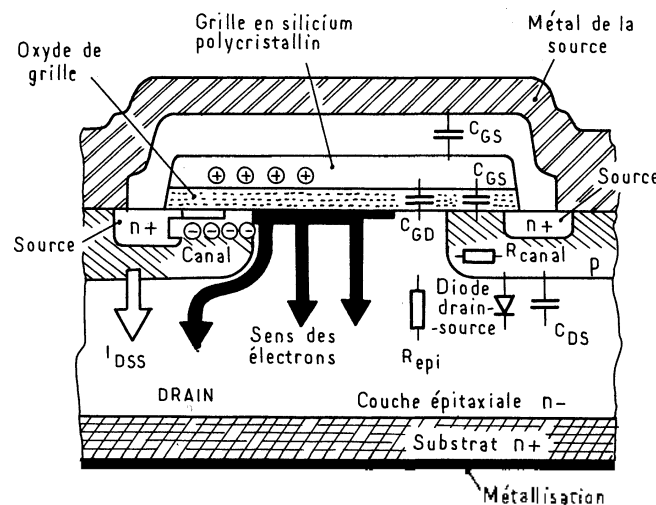


Fig. 6. - Coupe d'une cellule constitutive du MOSFET de puissance vertical montrant le sens de déplacement des électrons et des éléments parasites.

une concentration d'impureté (dopage) progressive évitant le claquage dû à la charge disruptive lorsque l'on y applique une très forte tension drain-source. La faible longueur du canal réduit le temps de transit et donne au dispositif DMOS la grande vitesse nécessaire à une commutation rapide. Une surface entièrement métallisée à la partie supérieure assure la liaison entre la région du drain est constituée par une couche épitaxiée type n- dévelop-

cuvette de type p. L'électrode de grille constituée de silicium polycristallin est isolée du métal de la source par une structure en sandwich de bioxyde de silicium pyrogénique, de nitrure de silicium, de bioxyde de silicium pyrolytique. Les différentes électrodes de grille sont retirées de place en place par le métal d'interconnexion de grille. La région du drain est constituée par une couche épitaxiée type n- dévelop-

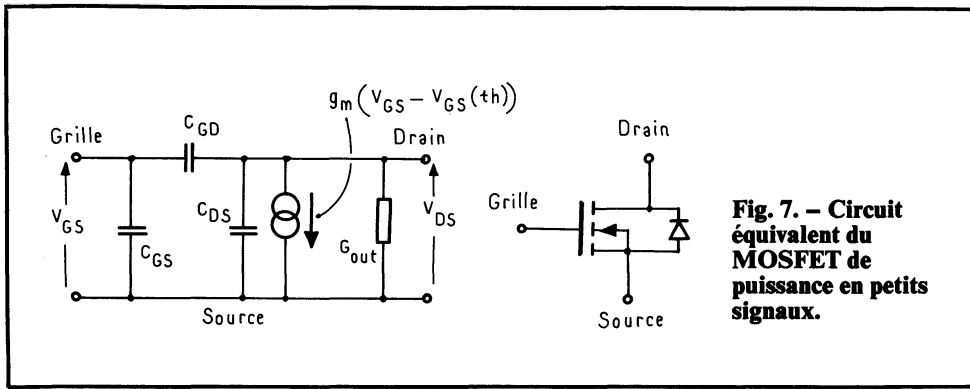


Fig. 7. - Circuit équivalent du MOSFET de puissance en petits signaux.

pée sur un substrat n^+ . Le plan inférieur métallique est en contact avec le substrat pour constituer le contact ohmique. Le courant dans le dispositif circule latéralement dans la région du canal puis verticalement à travers la couche épitaxiée.

De par la présence de champs électriques aux abords et en surface, la périphérie du dispositif doit être protégée contre les claquages prématurés : cette protection est assurée par des anneaux de garde spécialement conçus dans ce but, comme le montre la figure 6. Ces anneaux servent de diviseur de tension et répartissent la haute tension qui sans cela apparaîtrait uniquement sur la jonction p.n principale. Ceci réduit l'intensité du champ maximal à la surface et sur les jonctions cylindriques p.n diffusées.

La conduction étant due à des porteurs majoritaires la durée de stockage des charges est insignifiante comparée à celle des transistors bipolaires. A température de fonctionnement normale des surdensités de courant et des points de surchauffe ne peuvent se produire du fait que la résistivité a un coefficient de température positif, le phénomène de claquage secondaire se trouvant ainsi éliminé.

Le FET DMOS vertical améliore dans de notables proportions la densité de courant par unité de surface ce qui procure d'autres avantages, tels que la possibilité de supporter de forts courants et d'avoir une grande transconductance.

Principe de fonctionnement

Le courant dans les MOSFET est commandé par un champ électrique. Considérons la figure 7 qui est l'agrandissement d'une des cellules du schéma de la figure 6. Noter que dans la disposition verticale, une grille au silicium polycristallin possède deux régions de canal. La largeur de la grille et l'espace entre les deux cuvettes p correspondantes sont choisis pour maximaliser la densité des éléments et réduire la

résistance. Ceci est très différent de la structure latérale qui non seulement utilise un des côtés de la grille pour le contact de drain mais encore nécessite une porte en silicium beaucoup plus large pour supporter la pleine tension drain-source. En plus de l'économie de zones actives, la grande surface de la partie supérieure, qui sans cela serait occupée par la soudure de la connexion de drain et les interconnexions métalliques, permet de réaliser un plus grand nombre de canaux lorsque l'électrode du drain est déplacée à la partie inférieure du dispositif. En définitive, on obtient ainsi une structure extrêmement efficace qui, comparée à une structure latérale de mêmes dimensions, fait plus que doubler la transconductance et la densité de courant tout en réduisant la résistance de la coupe épitaxiée de près de la moitié.

La formation du canal conducteur et le débit d'électrons sont indiqués sur la partie gauche de la figure 7 alors que la représentation schématique des éléments du circuit fait l'objet de la partie droite. En fonctionnement normal la tension drain-source est positive, ce qui polarise en inverse la diode drain-source pour ne permettre qu'un très faible courant de fuite inverse. Pourant, si un canal conducteur se crée le long de la surface de silicium sous l'oxyde de la grille un courant important peut se déplacer dans la direction indiquée.

Lorsque la tension drain-source est négative, la jonction p.n du drain se trouve polarisée dans le sens passant à travers la couche diffusée p et le contact de source. Dans ces conditions le courant drain-source correspond à celui de la jonction de grande dimension de la diode, la grille restant sans action. Cette caractéristique permet dans certaines applications de limiter l'excursion de la tension négative.

Dans les conditions normales, le canal conducteur est obtenu en appliquant la tension de polarisation voulue sur la grille. Une polarisation négative de la grille attire les charges

positives vers la surface du silicium. Avec une polarisation nulle ou négative lorsque l'on se déplace de la source vers le drain sous la grille, on rencontre deux jonctions p.n. En polarisant positivement l'espace drain-source ces deux jonctions sont polarisées en inverse et aucun courant ne peut passer, le dispositif se trouve ainsi bloqué.

Par contre, si on applique une tension positive à la grille, les charges négatives vont se rassembler sous la grille. Entre la source et le drain il se produit une concentration d'électrons libres qui constituent un cheminement par où circulent les charges. Les jonctions p.n qui servaient de barrière en polarisation négative de la grille n'existent plus car la région p sous la grille s'est transformée en une fine couche de type n. L'application d'un champ (ou une tension) entre drain et source produit un courant drain-source et le dispositif est passant.

La valeur du courant dépend du potentiel de source et de la force avec laquelle les électrons sont attirés vers la surface. Lorsque le potentiel drain-source est faible, l'électrode de grille a une influence prépondérante dans la région du canal située sous elle, le courant est alors une fonction linéaire de la tension drain-source, et plus le potentiel de grille est grand, plus est faible la résistance du canal. Dans la terminologie des MOSFET, ce mode de fonctionnement est défini comme « la région linéaire ». L'interaction de ces différents potentiels et le courant net qui en résulte sont résumés dans la formule suivante :

$$I_{DS} = \frac{W_{\mu\epsilon}}{L t_{ox}} \left[V_{DS} (V_{GS} - V_{GS(th)} - \frac{V_{DS}^2}{2}) \right]$$

dans laquelle W représente la largeur du canal, L la distance drain-source, μ la mobilité des électrons de surface, ϵ la constante diélectrique du matériau semiconducteur et t_{ox} l'épaisseur de l'oxyde de grille. V_{DS} et V_{GS} représentent les tensions de drain et de grille par rapport à la source. La quantité $V_{GS(th)}$ (désignée sous le terme de tension de seuil, est une valeur complexe tenant compte du dopage du substrat, de la nature de l'oxyde, et de l'interface en oxyde du semiconducteur) permet de mesurer le potentiel de grille nécessaire, l'attraction d'un nombre suffisant d'électrons en surface pour provoquer la conduction. Cette quantité peut être adaptée aux besoins de l'utilisateur.

Cette expression, qui semble complexe est toutefois facile à calculer. Le moyen d'y parvenir consiste à te-

nir compte du nombre d'électrons attirés à la surface de la cuvette p par le potentiel effectif de grille en assimilant l'ensemble grille-oxyde-canal à un condensateur. Il est alors possible d'estimer la conductivité du canal. Le débit des charges résultant de la polarisation drain-source se calcule de façon classique comme le courant de conduction dans un semiconducteur.

En faisant varier le potentiel drain-source, tout en conservant une valeur fixe de tension de grille, la région du canal proche de la fonction p.n métallique verra une polarisation de grille moindre et de croissance plus faible que l'extrémité de la source n+.

Il est même possible d'atteindre dans certains cas une tension drain-source (que l'on appellera V_{SAT}) pour laquelle la polarisation de grille n'attirera plus aucune électron sur la surface et une région dépourvue à la fois d'électrons et de trous apparaîtra à l'extrémité drain du canal. A partir de ce moment toute augmentation de la tension drain-source apparaîtra plus aux bornes de la couche appauvrie de grande résis-

tance qu'aux bornes du canal résistif. Le courant de canal se trouve alors déterminé par la tension V_{SAT} maximale et cesse d'augmenter avec la tension drain-source, la zone de fonctionnement à saturation est alors atteinte. Le courant de canal maximal sous une tension de grille déterminée est donné par l'équation suivante :

$$J_{DS} = \frac{W\mu\epsilon}{2 L t_{ox}} (V_{SAT})^2 \text{ dans laquelle } V_{SAT} = V_{GS} - V_{GS(th)}$$

La fonction du second degré qui relie le courant drain-source et la tension de polarisation de grille est la caractéristique la plus remarquable de ce mode de fonctionnement.

Il existe ainsi trois zones principales dans le fonctionnement d'une MOSFET : zone de non-conduction, la zone de fonctionnement linéaire (ohmique), la zone de saturation, bien qu'il faille noter que ces deux dernières appellations quoique identiques se rapportent à des phénomènes physiques très différents de ceux que l'on trouve dans les dispositifs bipolaires. La modélisation conventionnelle et les circuits équi-

valents en petits signaux d'un MOSFET s'appliquent en grande partie aux MOSFETs verticaux, ils sont illustrés figure 8 avec quelques modifications.

Fabrication du MOSFET vertical

Le processus de fabrication MOS à double diffusion (DMOS) du MOSFET vertical utilise la technologie de la grille en silicium polycristallin associée aux techniques d'implantation d'ions et de diffusion qui permettent l'auto-centrage des zones de grille. Ce procédé permet d'obtenir une très grande densité de grilles qui associée à la grande surface du dispositif engendre la faible résistance drain-source R_{DS} .

Les dispositifs sont construits sur des tranches de substrat type n de faible résistivité et fortement dopées. La première étape du processus consiste à déposer une couche de silicium épitaxié faiblement dopée. De l'épaisseur et du dopage de cette couche dépend la tension de claquage désirée. Ce dépôt est suivi de la formation d'une couche en bioxyde de silicium (SiO_2) par photomasquage et gravure chimique qui détermine la surface du dispositif et forme des anneaux de garde.

Après un nettoyage approfondi la grille en oxyde est développée et suivie immédiatement du dépôt chimique en phase vapeur sous très faible pression d'une couche de silicium polycristallin. Par photomasquage et gravure par plasma on définit ensuite les conducteurs de grille. Utilisés avec une résine photosensible, ils servent de masque dans la phase suivante à l'implantation d'ions de bore. L'implantation de bore et la diffusion interne qui s'ensuit déterminent les zones de p et les anneaux de garde.

L'opération de masquage qui suit élimine le SiO_2 sur toute la surface excepté à l'aplomb des anneaux de garde et aux endroits où doivent être réalisés les contacts de source. Le dépôt et la diffusion de phosphore sur la source qui suivent ont deux doper les conducteurs de grille en silicium polycristallin pour leur donner une meilleure conduction et réaliser les zones de source n+.

La surface entière du dispositif est alors passivée au nitrure de silicium (Si_3Na_4). Pour permettre l'attaque chimique de la couche de Si_3Na_4 , il est nécessaire de déposer un masque chimique de SiO_2 en phase vapeur sous faible pression. A l'aide de ce masque, les ouvertures nécessaires aux contacts sont gravées

Applications des MOSFETs verticaux

Les MOSFETs de puissance verticaux aillent les avantages des FET planar à ceux d'une grande densité d'éléments par unité de surface propre à leur structure verticale pour contrôler de façon efficace de forts courants et de fortes tensions. Grâce à leur vitesse de commutation exceptionnelle du fait que ce sont des dispositifs à porteurs majoritaires, ils peuvent fonctionner à des fréquences de commutation très supérieures à celles des dispositifs pouvant commander des puissances équivalentes. Les applications qui peuvent profiter de ces performances améliorées sont les suivantes :

● Alimentations à découpage

La vitesse de commutation des MOSFETs de puissance HP permettent de réduire les pertes de commutation sur les alimentations à découpage en réduisant la durée de la période pendant laquelle apparaissent simultanément courant et tension aux bornes du dispositif. Cette vitesse permet d'utiliser des cadences de répétition permettant de réduire le volume des transformateurs et des filtres, donc de réduire les dimensions et par là même le poids et le coût des composants de puissance des circuits de l'alimentation. La simplification des circuits de commande (une capacité contre un stockage de charge sur la base

pour un transistor bipolaire par exemple) permet d'utiliser des circuits moins complexes donc moins chers. En plus le MOSFET est un dispositif à porteurs majoritaires ce qui élimine les résistances à coefficients de température négatifs donc l'emballement thermique, le claquage secondaire et autres effets dangereux, tout en permettant sa mise en parallèle sans problème. Ces modes de fonctionnement simples conduisent à une très grande robustesse.

● Circuits de commande d'impulsions

La réponse des MOSFETs de puissance en impulsions est excellente. La durée des transitions peut atteindre la nanoseconde avec des niveaux de puissance commandés de l'ordre du kilowatt. L'absence de temps de stockage et d'autres effets dus aux porteurs minoritaires permettent d'obtenir à la fois une grande fidélité des impulsions et une grande robustesse. L'entrée directe et l'impédance de sortie permettent de réaliser facilement l'adaptation des circuits impulsionsnels.

● Amplificateur à découpage

Les amplificateurs à découpage permettent d'obtenir un gain analogique en convertissant l'amplitude d'un signal d'entrée en impulsions

modulées en largeur, en amplifiant ces impulsions à l'aide d'un commutateur efficace, puis en les reconvertissant en signal analogique par une démodulation adéquate. Les amplificateurs classe D fonctionnent sur ce principe. Cette application utilise à fond les caractéristiques de commutation des MOSFETs de puissance : ici l'efficacité de la commutation contribue directement aux performances normales de l'amplificateur (gain, linéarité, faibles distorsions, rendement, puissance fournie en fonction de la température). En particulier la vitesse de commutation et la cadence de répétition des MOSFETs contribuent directement à la largeur de la bande passante donc à l'amélioration notable des performances.

● Amplificateur de puissance linéaire

Les facteurs de mérite d'un amplificateur de puissance sont constitués par le produit gain-bande passante, le produit quadratique puissance-fréquence, la faible distorsion et la gamme dynamique. Les performances fondamentales en fréquences du MOSFET de puissance et ses caractéristiques de transfert quadratiques permettent d'améliorer tous les paramètres de puissance à haute fréquence mentionnés.

chimiquement dans le Si_3Na_4 et les couches sous-jacentes de SiO_2 . Une couche de silicium-aluminium (Al-Si) est déposée sur la surface supérieure de la tranche, puis masquée et gravée de telle façon que tous les contacts de source soient reliés par l'intermédiaire de deux conducteurs métalliques et que tous les contacts de grille soient reliés par des bandes de métal. Après dépôt chimique en phase vapeur sous faible pression et à faible température d'une couche de protection de SiO_2 la dernière opération de photomasquage et de gravure détermine les emplacements des soudures. La métallisation au titane-argent (Ti-Ag) du verso de la plaquette est alors déposée par pulvérisation planaire magnétique.

Après des essais à 100 % en continu, les plaquettes sont découpées en puces. Chaque puce est ensuite fixée à son support, ses fils de connexion sont soudés, puis enfermée hermétiquement dans un boîtier TO-3. Le processus terminé tous les MOSFETs sont vérifiés un par un. Un certain nombre d'exemplaires de chaque production sont prélevés pour subir des essais plus poussés de fiabilité avant livraison.

Des essais de contrainte sous polarisation positive et négative à 200° permettent de vérifier la stabilité de $V_{GS(th)}$ à haute température sous des tensions de polarisation inverses égales à 80 % de BV_{DSS} (tension de claquage drain-source avec source et grille court-circuitées). Des essais de contrainte à 175 °C permettent de surveiller les changements possibles de la valeur de I_{DSS} et de $V_{GS(th)}$. Ces tests très sensi-

bles permettent de détecter une contamination possible par des ions mobiles.

La solidité de la fixation par soudure de la puce est vérifiée en faisant subir au produit des cycles de puissance entre 30 et 130 °C et en surveillant les changements possibles de la résistance thermique.

K.H.T., D.W.T., R.L.M. et V.L.

Toute l'Electronique

Une grande variété
de rubriques :

Pour les produits nouveaux : **Sélection du mois et Nouveautés de l'industrie.**

Pour les informations générales : le **Panorama.**

MULTIMÈTRE NUMÉRIQUE

651M

**Mesures jusqu'à 150 A_~
sans débrancher le circuit
par transformateur-pince
fourni avec l'appareil**

- 2000 points
- 6 fonctions :
 Ω , $V_{\bar{}}$, V_{\sim} , $I_{\bar{}}$, I_{\sim} , test diode
- 1500 heures d'autonomie
- Douilles de sécurité