

Caractéristiques de transfert de charges des MOS de puissance

Il est possible de calculer les temps de commutation d'un MOSFET et de montrer la remarquable corrélation existant entre ces calculs, dérivés des courbes de transfert de charges au turn ON et au turn OFF, et les temps de commutation effectivement constatés par test. Les effets de la commande de grille sur la capacité de transfert inverse peuvent avoir pour conséquence une dégradation sérieuse des temps de commutation.

Tous les MOSFETS présentent une grande impédance d'entrée. Cependant, lorsqu'ils sont utilisés en commutation très rapide, ils sont le siège de transferts de charges, comme les transistors bipolaires.

Il existe, bien sûr, quelques différences fondamentales qui sont hors du sujet de cet article. Notre but est de résoudre le problème de corrélation apparente existant entre les caractéristiques de transfert de charges et la vitesse de commutation des MOSFETS de puissance.

Depuis le début de 1981, nombre de fabricants de MOSFETS ont ajouté aux feuilles de caractéristiques de leurs produits, des données sur les transferts de charges. Cependant, la plupart ne fournissent pas les informations nécessaires à leur bonne exploitation.

Dans cet article, nous ne nous bornerons pas à l'appréciation de ces courbes mais nous apprendrons à nous en servir, à reconnaître certaines anomalies ayant trait aux MOSFETS et surtout à les considérer comme un outil effectif et indispensable pour déterminer avec précision les temps de commutation.

Caractéristiques de transfert de charges

Définition

Tous les MOSFETS sans zener de protection présentent une résistance d'entrée en continu de plusieurs mégohms (10^{12} ohms typique).

Lorsqu'ils sont utilisés en commutateur, la puissance requise pour les maintenir en état ON ou OFF est négligeable alors que les transistors bipolaires absorbent une certaine puissance.

Cependant, nous retrouvons, couplée à cette résistance, une capacité constituée par une capacité grille-source, C_{gs} , et une capacité grille-drain, C_{gd} .

Comme tous les MOSFETS de puissance du marché sont à enrichissement, nous devons tout d'abord appliquer une polarisation sur la grille pour les rendre passants. Pour un canal N, cela signifie la nécessité d'une polarisation positive de la grille par rapport à la source, alors qu'un canal P requiert une tension négative. La compréhension du mécanisme de charge d'une capacité nous permet de comprendre qu'il faut d'abord charger le condensateur d'entrée équivalente du transistor pour le rendre conducteur alors qu'il tend à être toujours OFF. La connaissance réelle de la capacité équivalente (C_{in}) et le changement de polarisation (V_{gs}) nous permettraient de calculer l'énergie nécessaire :

$$W = \frac{1}{2} C_{in} (\delta V_{gs})^2 \text{ Watt-secondes} \quad (1)$$

Mais comme l'évaluation de cette capacité est malaisée (car elle varie dans le temps), une meilleure méthode consiste à avoir le transfert de charges de grille en fonction de V_{gs} . La différence de charges entre l'état ON et l'état OFF nous donnera l'énergie requise pour la commutation :

$$W = \frac{1}{2} (\delta Q_g) (\delta V_{gs}) \text{ Watt-secondes} \quad (2)$$

C'est la caractéristique indiquée sur les feuilles de données actuelles. La figure 1 montre le transfert de charges typique pour un MOSPOWER VN 4000A, 400 V, 1 ohm, 8 A.

Transferts de charges dans les MOS

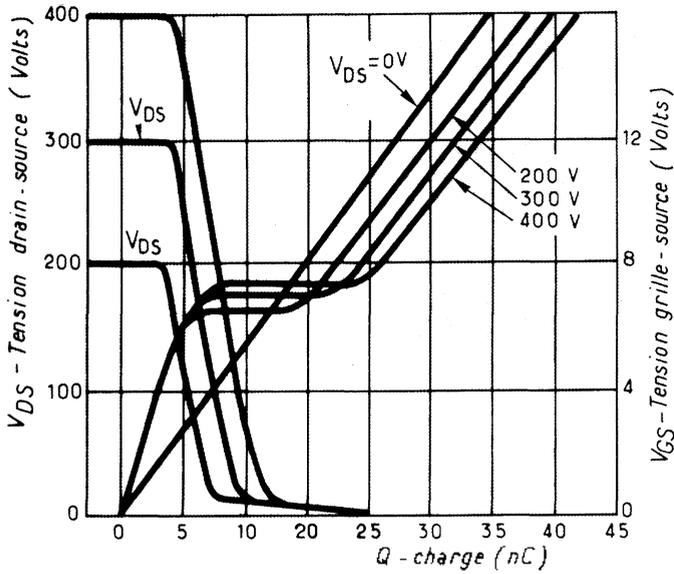


Figure 1. Transfert de charge au turn-on

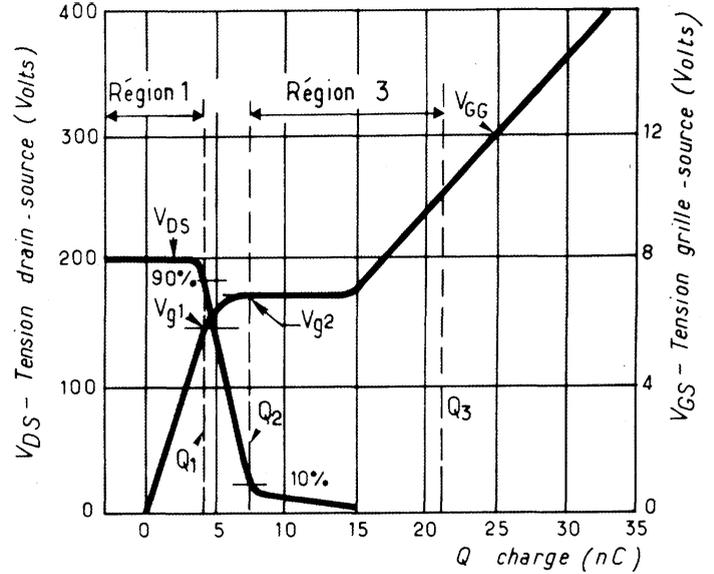


Figure 2. Transfert de charge au turn-on

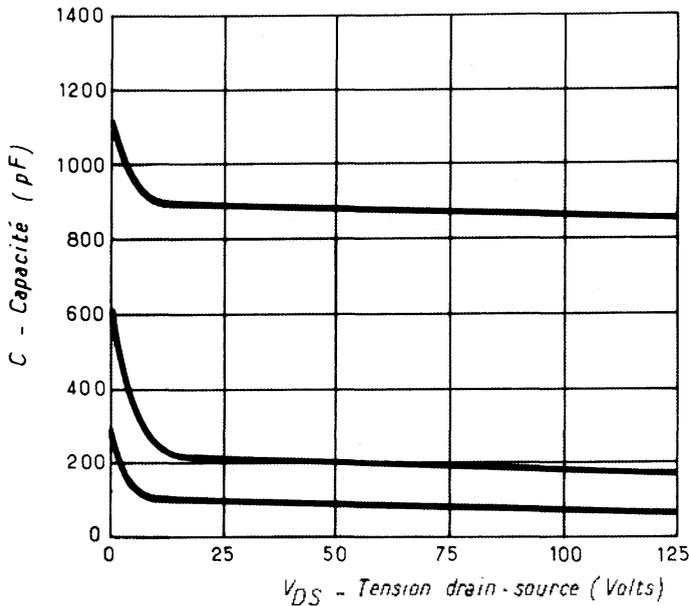


Figure 3. Capacité d'un VN4000A.

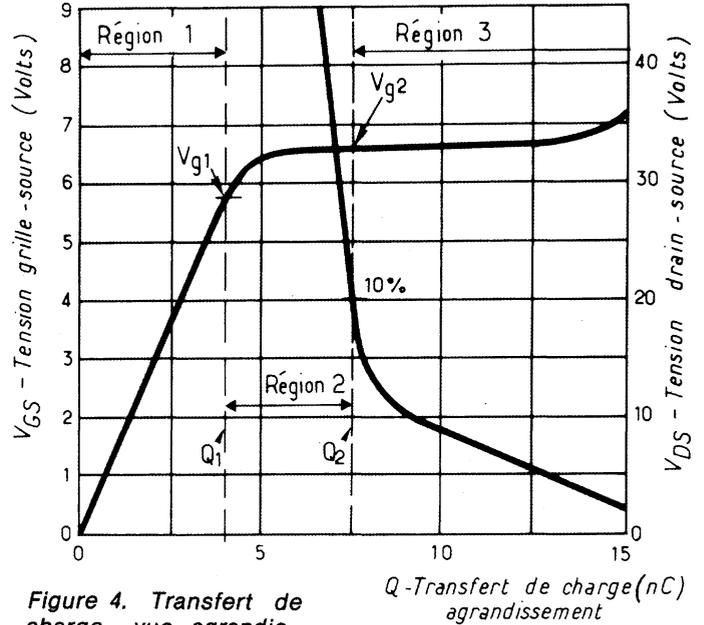


Figure 4. Transfert de charge, vue agrandie.

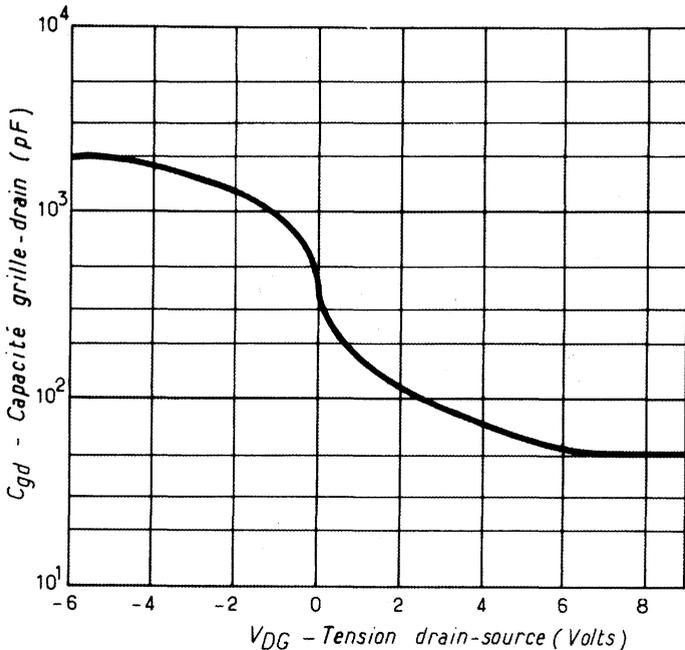


Figure 5. Effets de la commande de grille sur la capacité.

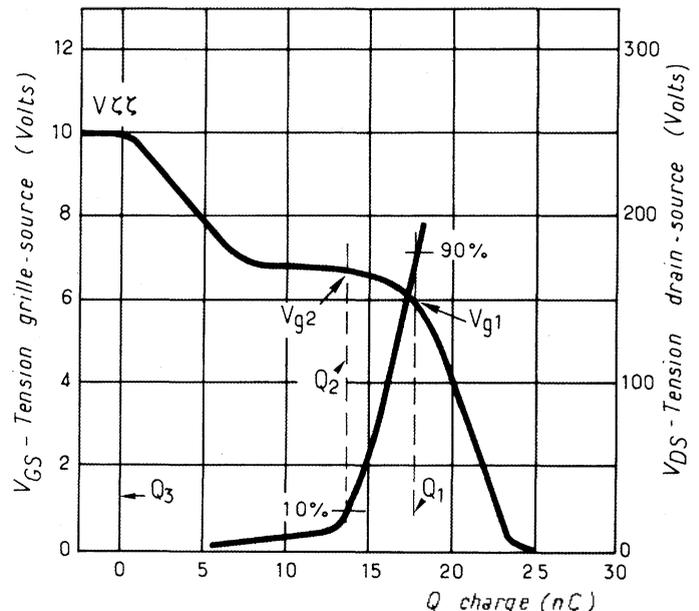


Figure 6. Décroissance des charges au turn-off.

Transferts de charges dans les MOS

Explications

Bien que cette figure 1 nous propose des courbes pour trois valeurs de tension d'alimentation, en fait un seul jeu de courbes est suffisant pour mener notre étude. La figure 2, par exemple, reproduit le scénario correspondant à un fonctionnement sous 200 V. Nous y trouvons trois régions distinctes.

Dans la région 1, la tension de grille, V_{gs} , a atteint le niveau à partir duquel la conduction de drain commence. Le début du cycle de turn-on commence à $0,9 V_{DS}$, soit 180 V dans notre exemple. Dans la région 2, la commutation est terminée et le potentiel de drain a atteint $0,1 V_{DS}$. Dans la région 3, nous continuons à appliquer un potentiel croissant sur la grille, alors que le drain reste en saturation. Le cycle est terminé.

Ce que nous avons vu est donc un retard initial (région 1) suivi d'une commutation (région 2). Avant d'atteindre la région 2, nous voyons la tension de grille charger la capacité d'entrée équivalente qui, dans cette zone de pré-seuil est pratiquement C_{gs} . On peut alors en déduire la valeur de cette dernière :

$$C_{in} = \frac{Q_{g1}}{V_{g1}} \quad (3)$$

La région 3 présente deux phénomènes intéressants : premièrement l'entrée du drain en saturation (que nous verrons plus en détail ultérieurement), et deuxièmement un accroissement brusque du cycle de charge lorsqu'on surcharge la grille.

Mais revenons à la région 2 qui montre le turn-on. L'événement le plus important et le plus visible séparant les régions 1 et 2 est le brusque accroissement de la capacité d'entrée (identifié par la faible pente de la courbe de transfert).

Lorsque le MOSFET commute, l'effet MILLER se fait sentir et la capacité d'entrée évolue selon la relation :

$$C_{in} = C_{gs} + C_{gd}(1 - A_v) \quad (4)$$

Nous pouvons aussi calculer cette capacité en utilisant les données de la figure 2 :

$$C_{in} = \frac{Q_{g2} - Q_{g1}}{V_{g2} - V_{g1}} \quad (5)$$

Nous pourrions, au premier abord, nous tromper sur le début effectif de la région 3 si nous ne nous posons des questions sur l'amplitude de l'effet MILLER à partir des équations (4) et (5) ou de la région de charge plate, excessivement longue, des figures 1 et 2. Puisque l'équation (4) semble contenir toutes les réponses à nos questions, il nous faut d'abord expliquer chaque élément !

C_{gs} qui peut être obtenue à partir de l'équation (3), consiste en une capacité de champ, combinée à une capacité dépendante de la déplétion.

Le gain en tension A_v peut être dérivé :

$$A_v = \frac{d V_{DS}}{d V_{gs}} \quad (6)$$

Ce qui reste peut être expliqué par la capacité drain-grille, C_{gd} .

Effets de la commande de grille sur la capacité de contre-réaction

Sur toutes les feuilles de caractéristiques de MOSFET, nous trouvons des tableaux de valeurs mini ou maxi ainsi que des courbes de valeurs typiques sur trois capacités C_{iss} , C_{rss} , C_{oss} .

Parce qu'elles sont toutes trois dépendantes de la déplétion de la partie diffusée, elles sont dépendantes de la tension (voir figure 3 pour le VN 4000 A).

Notre but étant l'étude et la compréhension de l'effet MILLER nous limiterons notre propos à C_{rss} , connue aussi sous l'appellation de capacité de réaction grille-drain, C_{gd} .

Mais avant de continuer plus avant, il nous faut revenir sur la figure 2 et examiner attentivement ce qui se produit au niveau du drain lors de l'entrée en saturation avec cet effet de décroissance lente de V_{DS} jusqu'à V_{sat} .

Pourquoi ne voyons-nous pas une saturation immédiate et franche ? En grossissant la région 3 de la figure 2, nous observons qu'un coude se produit à environ 10 V, suivi d'une lente décroissance à V_{sat} . Dans le même temps, sur la courbe de transfert de charges, on s'aperçoit que celui-ci dure pendant toute la décroissance lente avec la même intensité et ce jusqu'à saturation complète où la capacité de MILLER disparaît ($dV_{ds}/V_{gs} = 0$) et la grille atteint V_{GG} .

Ce n'est pas une coïncidence si l'effet de coude se produit à $V_{gs} = 10$ V. En effet, il est apparu au niveau du MOSFET une chute brusque de la tension du drain inférieure à la tension de grille avec, pour conséquence, une tension drain-grille négative. Si l'on se reporte à la figure 5, on comprend ce qui s'est passé au niveau de la capacité de déplétion C_{gd} .

L'équation (4) résume l'effet global. A mesure que la tension de drain atteint V_{GG} , C_{gd} commence à croître pour atteindre en saturation environ 1800 pF. A mesure que C_{gd} croît avec V_{gd} décroissant, l'effet MILLER s'accroît. Une substitution pure et simple de valeur dans l'équation (4) serait difficile puisque dV_{DS}/dV_{gs} est en changement continu et rapide tout comme C_{gd} (ce que l'on peut voir figure 5). Cependant, nous devrions être en mesure d'apprécier l'effet à partir de la partie plate de la caractéristique de transfert de charges.

Calcul des temps de commutation

Retard à la mise en conduction et temps de montée

On trouve, en général, pour tous les MOSFETS, des valeurs de temps de commutation se référant à un schéma de test. Sans information supplé-

Transferts de charges dans les MOS

mentaire, toute corrélation est difficile. Cependant, on arrive à des caractéristiques et des équations du type :

$$t_d(\text{on}) = \frac{Qg1}{Vg1} R_{gen} \ln \frac{V_{GG}}{V_{GG}-Vg1} \quad (7)$$

$$T_r = \frac{Qg2-Qg1}{Vg2-Vg1} R_{gen} \ln \frac{V_{GG}-Vg1}{V_{GG}-Vg2} \quad (8)$$

Où R_{gen} est la résistance de la source de tension en ohms.

En utilisant les équations (7) et (8) avec la figure 2, nous pouvons comparer les données calculées (fig. 2) aux données mesurées sur un lot de 10 échantillons.

TABLEAU A

| nS | calculé | mesuré | calculé | mesuré |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------|--------|
| $t_{d(\text{on})}$ | 29.9 | 26-38 | 61.7 | 55-65 |
| t_r | 52.8 | 46-58 | 105 | 95-115 |
| $V_{DS} = 220 \text{ V}$ | $R_{gen} = 50 \text{ Ohms}$ | $R_{gen} = 100 \text{ Ohms}$ | | |

Il nous faut cependant souligner que les valeurs calculées tombent sur les valeurs moyennes mesurées.

Retard au blocage et temps de descente

C'est ici que commence notre problème. Là où nous avons pu calculer $T_d(\text{on})$ et t_r avec une bonne précision, nous découvrons toutefois qu'au turn off ou au t_r , une erreur appréciable est introduite si l'on part de la figure 2. Nos équations sont :

$$t_d(\text{off}) = \frac{Qg3-Qg2}{Vg3-Vg2} R_{gen} \ln \frac{V_{GG}}{Vg2} \quad (9)$$

$$t_r = \frac{Qg2-Qg1}{Vg2-Vg1} R_{gen} \ln \frac{Vg2}{Vg1} \quad (10)$$

Notre dilemme vient du fait que les phénomènes apparaissant au turn ON sont différents de ceux visibles au turn OFF et, en utilisant la figure 2, nous sommes incapables de voir la différence.

Caractéristiques de décroissances de charges

Une étude attentive des caractéristiques de décroissance de charge pour le VN 4000 A, fi-

gure 6, nous révèle qu'en plus d'une translation évidente des courbes (qui commencent à 0 nC en figure 1 et VGG en figure 6), nous avons le temps de montée (montré figure 2). Encore une fois, nous devons être prudents et noter l'effet d'une tension drain grille négative. Là, en figure 2, où nous observons un temps d'établissement en saturation après le turn on, nous avons maintenant un effet inverse : un apparent retard du cycle de turn off. En plus de ce retard que nous pouvons attribuer à l'effet Miller équation (4), il apparaît que notre calcul est faux en particulier à cause d'un temps de commutation au turn off plus long qu'au turn on car la combinaison de la capacité de sortie C_{oss} et des capacités du boîtier sont déchargées à travers la R_{ON} à la commutation ON, alors qu'à la commutation OFF, elles sont chargées à travers la résistance de charge.

Corrélation du temps de descente

Avec l'équation (10) et les données déduites des figures 2 et 6, nous pouvons faire la comparaison suivante.

TABLEAU B

| nS | mesuré | calculé de (fig. 1) | calculé de (fig. 6) |
|--------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| t_r | 44-53 | 32 | 46 |
| $V_{DS} = 200 \text{ V}$ | $R_{gen} = 50 \text{ Ohms}$ | | |

Conclusion

Bien que nous ne puissions remplacer parfaitement la mesure des temps de commutation par ces valeurs calculées, il s'avère que la relative facilité avec laquelle nous pouvons produire de telles courbes évite au concepteur des efforts longs et fastidieux.

Par ailleurs, cette approche permet l'évaluation des temps de commutation d'une grande variété de MOSFETS de puissance sans perte de temps et investissement en fabrication d'équipement de test.

Il est important de noter que les temps de commutation indiqués dans cet article ont été mesurés, selon la coutume, entre 0,9 et 0,1 V_o .

Si, comme nous l'avons observé, un lent temps de croissance apparaît lorsque la tension drain-grille devient négative, il faut veiller à maintenir V_o suffisamment élevé afin qu'en aucun cas 0,1 V_o ne se trouve sous le coude de la courbe (fig. 4) sans quoi le turn off se situerait bien au-delà des valeurs indiquées dans les feuilles de caractéristiques.

E. OXNER

(Adapté par C. Alemany, Siliconix-France)