

Le SiC pour réduire taille, bruit et défaillance des groupes de puissance utilisés dans le transport

Les concepteurs sont désormais en mesure de tirer profit des circuits électroniques fabriqués en technologie SiC (carbure de silicium) au niveau système, notamment pour réduire la taille, le bruit et les défaillances sur le terrain dans la conception des groupes auxiliaires de puissance (APU, Auxiliary Power Unit) utilisés dans le domaine des transports en général et des véhicules électriques en particulier. Microchip montre ici qu'ils offrent des avantages décisifs par rapport aux IGBT classiques

A lors que l'électrification des véhicules se développe avec l'avènement des véhicules électriques grand public, d'autres formes de transports suivent également cette macro-tendance, à l'instar des chemins de fer, des avions, des camions de livraison, des véhicules tout-terrain, etc. Deux systèmes d'électrification sont présents sur tous ces véhicules électrifiés : le groupe motopropulseur principal qui assure la propulsion du véhicule, et le groupe auxiliaire de puissance, l'APU (Auxiliary Power Unit), qui alimente toutes les autres charges embarquées, de l'éclairage aux portes, en passant par

AUTEUR



Kevin Speer,
Senior Manager,
SiC Power
Solutions,
avec Nitesh
Satheesh
et Marc
Rommerswinkel,
Microchip
Technology.

la climatisation et les prises de courant.

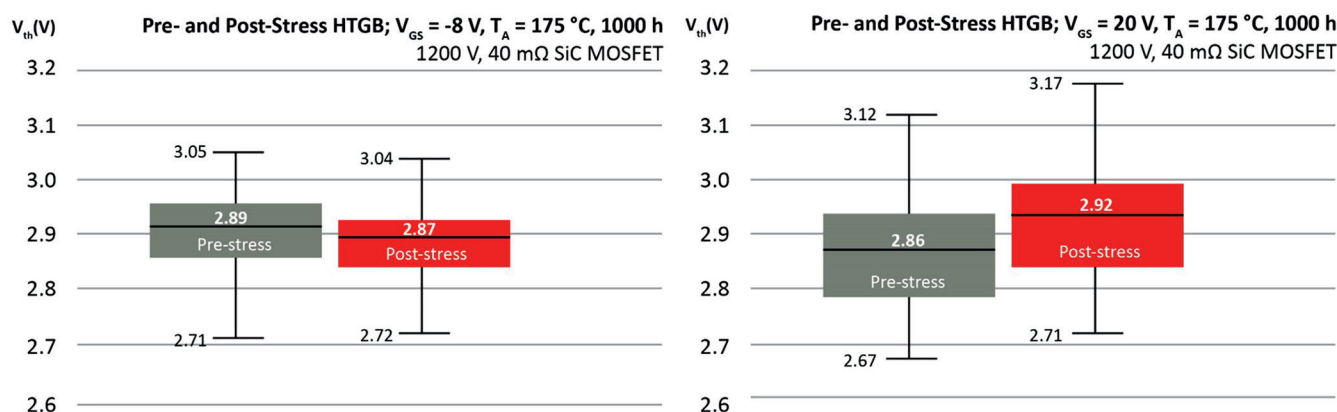
Contrairement aux véhicules électriques grand public qui privilégient l'autonomie obtenue à chaque charge, les améliorations apportées à l'APU peuvent aussi répondre à des priorités différentes : espace disponible, fiabilité sur le terrain... avec dans tous les cas le confort des utilisateurs (conducteurs) ou des passagers en ligne de mire.

A ce niveau, les pertes de commutation élevées des circuits IGBT (transistors bipolaires à grille isolée) en silicium ont par le passé bloqué l'amélioration des performances des APU de transport. En limitant la fré-

quence de commutation, les IGBT déterminent en effet une taille minimale pour les plus gros composants de l'APU, à savoir le transformateur d'isolement et le dissipateur thermique. Alors qu'avec des circuits SiC, il est désormais possible de réduire considérablement la taille du transformateur d'isolement en commutant à des fréquences plus élevées. Et, avec des pertes de commutation réduites de 80%, voire plus, les dissipateurs thermiques rétrécissent à leur tour. En outre, les fréquences de commutation de l'APU peuvent s'étendre au-delà de la gamme audible, éliminant ainsi le ronronnement aigu des APU, pénible

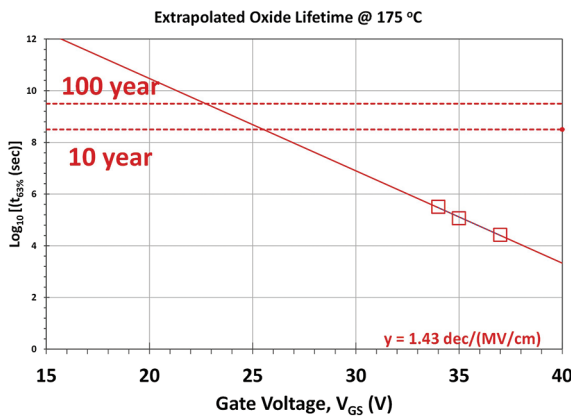
1 TENSION DE SEUIL D'UN MOSFET SiC

On voit ici la tension de seuil d'un Mosfet SiC de qualité production, avant et après une contrainte de polarisation de grille négative à haute température (à gauche) et une polarisation positive (à droite).



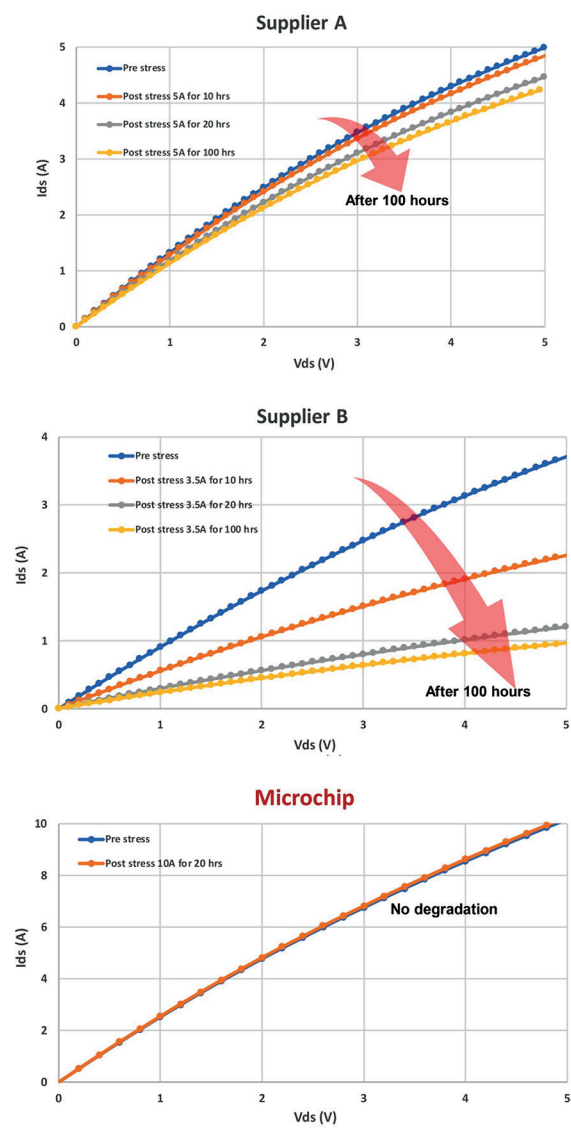
2 DURÉE DE VIE EXTRAPOLÉE DE L'OXYDE DE GRILLE D'UN MOSFET SiC

On peut prédire la durée de vie de l'oxyde de grille en accélérant les échantillons jusqu'à la rupture par l'application d'une température et d'un champ électrique élevés.



3 STABILITÉ DE LA DIODE D'UN MOSFET SiC

Le comportement avant et après stress de plusieurs Mosfet SiC disponibles dans le commerce révèle une qualité variable de la diode intrinsèque chez trois fournisseurs.



pour les passagers. Enfin, le rendement est essentiel puisque l'APU fonctionne en permanence, souvent sous une charge légère. Ici, les pertes par conduction des circuits Mosfet (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) SiC sont inférieures à celles des concurrents dans des conditions de charge légère.

La technologie des circuits SiC à la hauteur des tâches demandées ?

La robustesse des Mosfet en SiC dans des conditions très diverses est essentielle pour les APU qui peuvent aussi bien alimenter des charges de confort que des charges d'urgence. Pour le concepteur, il faut vérifier la stabilité de l'oxyde de grille du Mosfet (un problème connu), la durée de vie de l'oxyde de grille, la stabilité de la diode intrinsèque du Mosfet et, enfin, la résistance aux défaillances, notamment la robustesse en cas d'avalanche avec comme corollaire la survie aux courts-circuits.

En ce qui concerne l'intégrité de la grille, si la tension de seuil se déplace, les performances du dispositif changent (par exemple, la résistance au déclenchement augmente), ce qui peut entraîner un comportement erratique du système, voire une panne de l'APU. Ainsi, les données de tension pour les Mosfet SiC de production ne doivent présenter aucun changement significatif et ce même après 1 000 heures de stress à 175°C (figure 1).

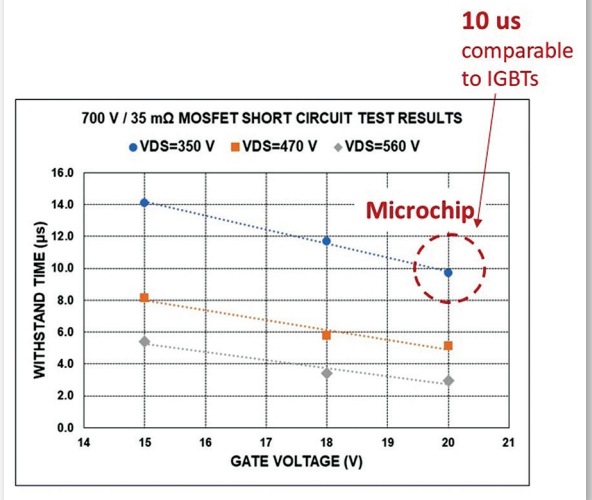
Du côté de la durée de vie de l'oxyde de grille, on peut la prédire en accélérant les échantillons jusqu'à la rupture par l'application d'une température et d'un champ électrique élevés. L'énergie d'activation est extraite pour chaque mode de défaillance et une équation d'Arrhenius est utilisée pour extrapoler la durée de vie de l'oxyde (figure 2). L'oxyde de grille d'un Mosfet SiC de qualité

industrielle peut ainsi durer bien au-delà de 100 ans sous une forte contrainte, ce qui garantit un fonctionnement régulier et fiable de l'APU au-delà de la durée de vie prévue.

Pour ce qui a trait à la stabilité de la diode intrinsèque, contrairement à l'IGBT, le Mosfet SiC peut conduire un courant inverse en utilisant sa propre diode. Dans certains dispositifs, celle-ci se dégrade avec le temps, entraînant une augmentation de la résistance $R_{DS(ON)}$ et un échauffement supérieur à celui prévu (1). Ainsi, de grandes variations ont été constatées entre fournisseurs lorsque l'on analyse les courbes I-V de la diode intrinsèque, et la résistance drain-source à l'état passant ($R_{DS(ON)}$) d'un Mosfet après plusieurs heures de stress du fait d'un courant direct

4 RÉSISTANCE AUX COURTS-CIRCUITS DES MOSFET SiC

Les temps de résistance au court-circuit pour les Mosfet SiC de qualité en production ne sont pas identiques selon les fournisseurs.

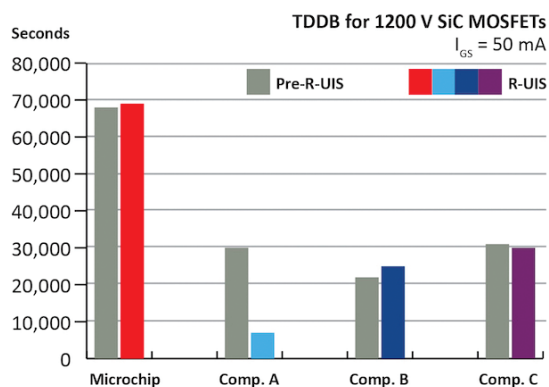


constant (figure 3). Un fournisseur a connu une dégradation notable, un autre est devenu inutilisable. Les dispositifs sélectionnés ne doivent présenter aucun décalage perceptible. L'utilisation d'un Mosfet SiC à diode intrinsèque stable améliore la fiabilité et réduit le coût en éliminant la diode antiparallèle.

Enfin, concernant la survie sur le terrain, liée aux courts-circuits, les APU de transport sont sensibles à plusieurs situations de défaillance et nécessitent des Mosfet SiC capables de supporter ces situations en toute sécurité, tout en maintenant des performances constantes avant et après les défaillances. L'endurance aux

5 RUPTURE DIÉLECTRIQUE DES MOSFET SiC

On voit ici la rupture diélectrique en fonction du temps, avant et après une défaillance par avalanche répétitive sur des Mosfet SiC du commerce provenant de quatre fournisseurs différents (claquage diélectrique en fonction du temps pour des Mosfet SiC du commerce, avant et après 100 000 cycles R-UIS).



courts-circuits mesure la capacité du Mosfet à survivre à un court-circuit instantané de la liaison entre ses bornes « Drain » et « Source ». Les canaux MOS sont améliorés, ce qui permet à un dispositif bien conçu de distribuer en toute sécurité les courants de pointe sur toute la surface de la puce Mosfet. Dans le cas de Microchip, le temps SCWT se situe entre 3 et 14 µs, avec une dépendance à la tension de liaison et à la tension VGS appliquée (figure 4). Cela est suffisant pour de nombreux drivers de grille disponibles dans le commerce. Un driver avancé, tel que celui décrit dans la section suivante, ajoute de l'intelligence à la détection de court-circuit.

La robustesse en avalanche est encore plus exigeante : le courant dans la charge est soudainement injecté dans le Mosfet et force la tension drain-source à augmenter jusqu'à la tension de claquage. Contrairement au court-circuit, les canaux MOS ne sont pas renforcés. Le courant d'avalanche envahit alors le bord de la puce, amenant rapidement le dispositif à ses limites thermiques.

La commutation inductive répétitive non bridée (R-UIS) permet d'évaluer la robustesse d'un dispositif en cas d'avalanche. De nombreux fournisseurs maintiennent la résistance de l'oxyde, mais la capacité à démontrer une résistance jusqu'à 4 fois supérieure, ainsi qu'une stabilité de $RDS_{(ON)}$ et de la fuite drain-source(2), renforcent la capacité des Mosfet SiC

à supporter de manière sûre les surcharges électriques les plus exigeantes (figure 5).

Vers une commutation plus rapide grâce à un boîtier à faible inductance

Associées à des fronts très abrupts, certaines inductances du système d'alimentation entraînent des pertes de commutation plus élevées, des tensions d'overshoot (dépassement anormal de tension) excessives, des parasites hors-normes et, au bout du compte, une défaillance de l'APU. Les mesures préventives que les concepteurs doivent prendre pour ralentir la vitesse des Mosfet peuvent les faire s'interroger sur l'intérêt de la technologie SiC.

Le boîtier SP6LI à faible inductance de Microchip apporte ici une réponse à cette difficulté. Sa configuration par phase se traduit par l'insertion de moins de 3 nH d'inductance parasite dans la boucle d'alimentation. En interne, l'implantation a été optimisée pour assurer un timing et un partage du courant identiques. Les performances thermiques peuvent être améliorées par l'utilisation de céramique en nitrure de silicium (du nitrure d'aluminium peut aussi être utilisé) et la plaque de base

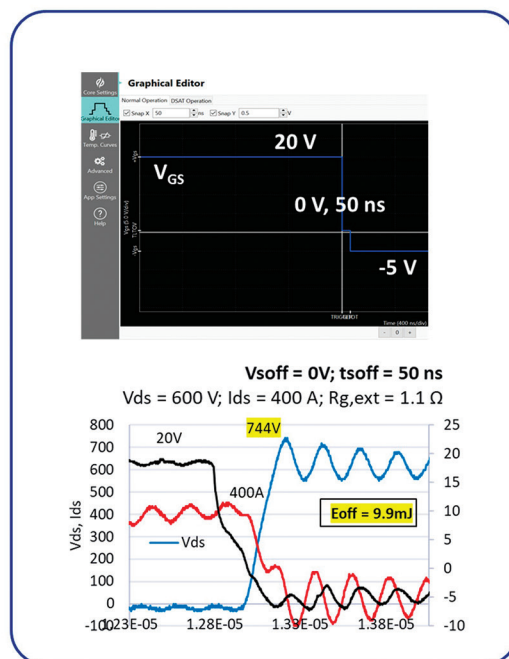
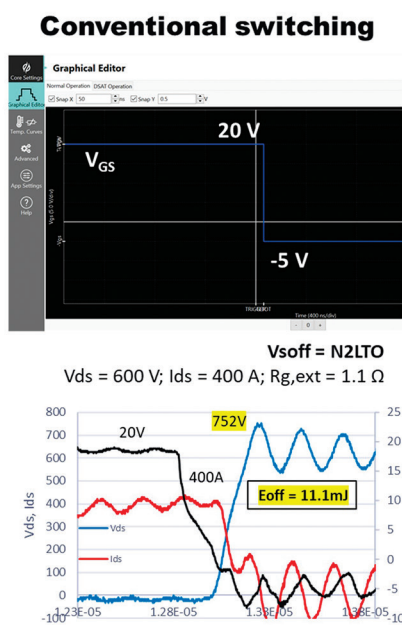
QUELQUES RÉFÉRENCES...

- 1).- Agarwal, A. et Kang, M., communication privée, 2020.
- 2).- Speer, K., Satheesh, N., Kashyap, A., et Bontemps, S., « Streamlined SiC Development With a Total System Solution » (Développement SiC optimisé grâce à une solution système globale) IEEE Power Electronics Magazine, Vol. 7, No. 4, pp. 28-35, 2020.
- 3).- Satheesh, N., Robins, C., et Fender, A., « The State of Intelligent SiC MOSFET Gate Drivers » (Etat des drivers de grille intelligents pour MOSFET SiC), Bodo's Power Systems, pp. 30-33, février 2018.
- 4).- Satheesh, N., « Silicon carbide MOSFETs: Handle with care » (MOSFET en carbure de silicium : manier avec précaution) in Proc. Applied Power Electronics Conference (APEC), San Antonio, Texas, États-Unis, 2018.
- Hayashiya, H. et Kondo, K., « Recent Trends in Power Electronics Applications as Solutions in Electric Railways » (Tendances récentes en applications d'électronique de puissance pour le ferroviaire électrique), IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 15 : 632-645, 2020.

peut être en cuivre ou en Al-SiC (alliage aluminium-carbure de silicium). En externe, les bornes de puissance permettent une connexion à faible inductance avec la liaison CC

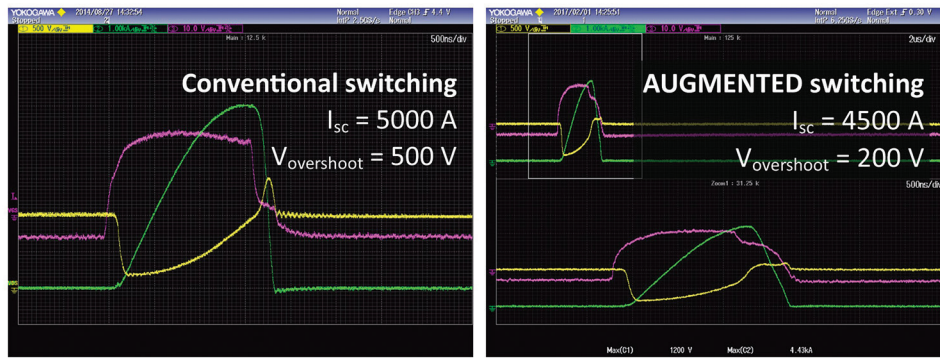
6 EVOLUTION DES COUPURES D'UN MOSFET SiC

Sur l'interface utilisateur graphique pour driver de grille programmable AgileSwitch de Microchip, les formes d'onde de coupure avec commutation conventionnelle (à gauche) et avec commutation augmentée (à droite) sont visibles.



7 IMPACT DE LA COMMUTATION AUGMENTÉE

On voit nettement la façon dont la commutation augmentée (à droite) réduit la tension crête et le courant crête en cas de court-circuit par rapport à la commutation conventionnelle (à gauche).



et une mise en parallèle optimale selon deux orientations. Le SP6LI permet au concepteur de piloter les Mosfet SiC à des vitesses plus élevées avec un rendement maximum et des parasites EMI inférieurs, ce qui se traduit par une réduction de la taille des APU, tout en évitant les défaillances liées aux parasites EMI. Les performances et la fiabilité de l'APU peuvent également être opti-

misées à l'aide de drivers de grille numérique programmables qui permettent d'ajuster à la volée la tension d'« overshoot » et les pertes de commutation. Cela permet aux concepteurs de réduire le coût et la taille de l'APU en utilisant des composants de tension inférieure et des dissipateurs thermiques plus petits, et aussi d'éliminer des heures passées avec un fer à souder et une boîte de résistances

de grille... Contrairement à la coupure conventionnelle, la coupure augmentée (figure 6) commence avec une tension de 20V, passe à un niveau intermédiaire programmé par l'utilisateur pendant une durée déterminée et passe finalement à la tension d'arrêt de -5V. Les effets sont modestes avec le SP6LI compte tenu de sa faible inductance. Des résultats publiés séparément montrent une influence plus prononcée dans d'autres cas (2 et 3). En outre, les courts-circuits sont rapidement arrêtés, réduisant la tension et le courant crête de 60% et 10% respectivement (figure 7).

Enfin, forts de l'ensemble de ces informations, les concepteurs qui souhaitent passer de l'évaluation à la production en série auront besoin de kits de développement qui réunissent les trois éléments de la solution système SiC totale pour les APU de transport : des dispositifs de puissance SiC robustes, un boîtier de puissance à faible inductance et des drivers de grille intelligents (figure 8).

8 INTÉGRATION D'UN CIRCUIT SiC DANS UN APU

Le schéma montre une proposition d'implémentation en pont complet à déphasage du circuit ASDAK+ de Microchip dans la section « courant continu-courant continu » d'un APU de transport (4).

