



HAL
open science

FilSiC – De l'épitaxie au module de puissance

Philippe Cussac, Cyrille Duchesne, Jean-Baptiste Fonder, Dominique Tournier, Pierre Brosselard, Grégory Grosset, Lionel Dupuy

► **To cite this version:**

Philippe Cussac, Cyrille Duchesne, Jean-Baptiste Fonder, Dominique Tournier, Pierre Brosselard, et al.. FilSiC – De l'épitaxie au module de puissance. Symposium de Génie Electrique (SGE'16), Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361598

HAL Id: hal-01361598

<https://hal.science/hal-01361598>

Submitted on 7 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

FilSiC – De l'épitaxie au module de puissance

Philippe CUSSAC¹, Cyrille DUCHESNE¹, Jean Baptiste FONDER², Dominique TOURNIER²,
Pierre BROSSELDARD³, Gregory GROSSET⁴, Lionel DUPUY⁴,

¹CIRTEM, 1389 L'Occitane, 31670 Labège, ²AMPERE-Lab., 21 Av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne,

³CALY Technologies, 56 Bd Niels Bohr, CS52132 69603 Villeurbanne, ⁴IBS, rue Gaston Imbert, 13790 Peynier

RESUME – Les domaines de la mobilité et de la distribution d'énergie électrique nécessitent des convertisseurs statiques de plus en plus fortes puissances avec de meilleurs rendements et la capacité de fonctionner à plus hautes températures. Le programme FilSiC, porté par plusieurs PME et laboratoires complémentaires, a pour ambition de développer une filière de composants de puissance Haute Tension en SiC dont le premier résultat est une diode 3300V présentée ici.

Mots-clés—SiC, diodes JBS, Schottky, Packaging, Bumps

1. INTRODUCTION

Le Carbure de Silicium (SiC) est un semi-conducteur à large bande interdite dont les propriétés physiques intrinsèques permettent de répondre à des demandes de plus en plus exigeantes pour des applications en électronique de puissance. En effet, des domaines tels que les transports, la distribution d'énergie électrique et l'exploitation de ressources demandent des composants capables de supporter des tenues en tensions et/ou des températures ambiantes toujours plus élevées [1].

Aujourd'hui, GENESIC propose des diodes Schottky 3300V-300mA [2]. Les applications visées sont plutôt des multiplicateurs capacitifs ou de l'instrumentation haute tension. WOLFSPEED (CREE) développe une filière de MOSFET et de Diodes SiC de 900V à 15kV pour des applications transport ou Grid [3]. MITSUBISHI a développé des packs complets (MOSFET-Diodes) 3300V en SiC [4]. Pour ces 2 derniers, il ne s'agit que de développements avec possibilité de diffusion sous forme de prototypes. On peut noter également ABB qui développe une gamme de composants 3300V en SiC.

Ces travaux s'inscrivent dans la thématique des composants haute tension et fort courant en SiC. L'objectif de ce travail est de développer une diode Schottky-JBS (Junction Barrier Schottky) 3300V-20A.

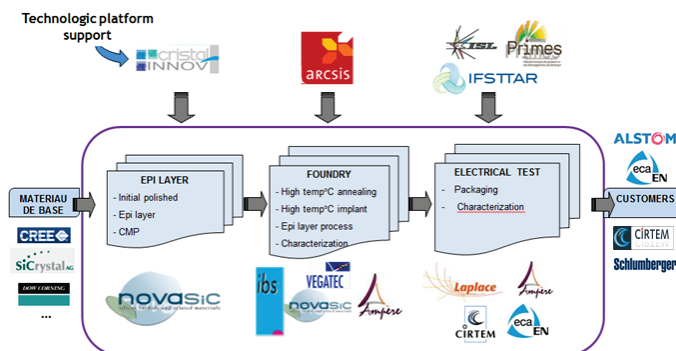


Figure 1 : Organisation du programme FilSiC

La raison d'être de FilSiC est de transformer des compétences de recherche (AMPERE, LAPLACE) et de développement (IBS, NOVASIC, VEGATEC, CIRTEM, ECA) en une filière de production de composants SiC (Fig.1), s'adressant aux hautes tensions (> 2,2 kV) et à des applications spécifiques à plus basse tension (HT°, milieu extrême...), avec l'objectif de devenir un acteur sur le marché européen et mondial.

Les points clés du programme FilSiC sont :

- **La réalisation de l'épitaxie (NOVASIC) :**
La qualité de la couche épitaxiée est essentielle pour la tenue en tension et le rendement de production des composants. Les procédés d'épitaxie développés s'appuient sur des substrats du commerce et utilisent des gaz standards de haute pureté. Les couches de 4H-SiC sont déposées à des vitesses allant jusqu'à 30µm/h. NOVASIC a aussi développé un réacteur multi-plaques et une chambre mono-plaque de capacité 150mm.
- **Le design et la caractérisation électrique des composants SiC menés par le laboratoire AMPERE et industrialisés chez CALY Technologies (Spin-off du laboratoire AMPERE).**
- **L'optimisation de la passivation des composants (Laboratoire LAPLACE) :**
L'objectif est la détermination des performances et de la limite à haute température d'un matériau de passivation secondaire photosensible (dans la gamme de température jusqu'à 400 °C).
- **Le développement d'équipements spécifiques pour la fabrication des composants (VEGATEC et IBS) :**
VEGATEC a développé un four industriel à haute température (1800°C) permettant le recuit des plaques SiC. IBS a développé un implantateur à chaud industriel permettant la réalisation de jonction dans le SiC sur des plaques jusqu'à 150mm de diamètre.
- **La fabrication des composants (IBS) :**
Les premiers composants fabriqués par IBS dans FilSiC sont des diodes SiC 3.3kV avec des rendements électriques de l'ordre de 80%. Un composant de type JFET 3.3kV est en cours de développement.
- **La réalisation des modules (CIRTEM) :**
Un packaging innovant pour ces composants SiC haute-tension a été réalisé.
- **Intégration dans des convertisseurs (CIRTEM et ECA) :**
Les applications visées sont les réseaux de distribution électrique, le transport ferroviaire, l'aérospatiale,

l'aéronautique, la propulsion navale, les équipements militaires impulsions, l'exploitation pétrolière et les grandes expériences de physique.

Des modules Diode SiC et hybride IGBT-Si/Diode-SiC ont été réalisés avec des diodes issues du projet FILSIC. Cette publication présente le travail d'optimisation de la diode (design, fabrication et caractérisation électrique), la réalisation et les caractéristiques des modules Diode et Bras d'onduleur.

2. CONCEPTION ET FABRICATION DE LA DIODE SiC SCHOTTKY/JBS 3300V

La diode Schottky/JBS développée est illustrée par la Figure 2. Pour ces niveaux de tenue en tension, le composant a une structure verticale. L'anode se trouve en face avant quant à la cathode, elle se trouve en face arrière. La protection périphérique du composant est quant à elle, définie par une zone P nommée JTE (Junction Termination Extension). La simulation à base d'éléments finis permet de définir les différents paramètres de couches telles que (e_{N-} , N_D) mais aussi d'approximer la tenue en tension en fonction des paramètres (D_{etch} , L_{JTE} et P-JTE). Le logiciel utilisé est SentaurusTM[5].

Tout d'abord, il faut définir les paramètres de la zone de drift (e_{N-} , N_D) en réalisant des simulations en inverse et en direct de la diode. Un compromis entre la tenue en tension inverse et la chute de tension à l'état passant doit être déterminé. Les paramètres sont : $e_{N-} = 35 \mu\text{m}$ et $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ pour une tenue en tension théorique de 5800V. Une marge de sécurité est prise pour les soucis liés notamment à la technologie qui n'est pas tout à fait mature.

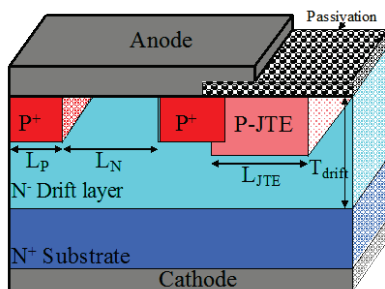


Figure 2 : Vue en coupe de la diode Schottky/JBS.

Les diodes ont été fabriquées chez IBS. Sept niveaux de masque sont nécessaires pour fabriquer les composants en SiC. La première étape concerne la gravure de type RIE (Reactive Ion Etching) du SiC pour définir les motifs d'alignement (gravure peu profonde de 150 à 200 nm). En deuxième lieu, la JTE est implantée avec de l'aluminium. Une seconde implantation d'aluminium est réalisée pour définir les anneaux P+ en-dessous du contact d'anode. Ils permettent notamment de réduire les courants de fuite et d'augmenter la capacité en sur-courant par rapport à une diode Schottky pure. Ensuite, un dépôt de SiO₂ de 1,5 μm est réalisé pour la passivation primaire. Deux niveaux de métallisation sont nécessaires dont une première pour former les contacts Schottky de l'anode, et la seconde pour les métaux épais. Cette dernière permettra d'encapsuler les puces, braser le composant en face arrière et des bumps sur la face avant. La dernière étape consiste en un dépôt de polyimide permettant de réaliser la passivation secondaire.

3. CARACTERISATIONS ELECTRIQUES

Afin de réaliser les caractéristiques électriques en régimes statique et dynamique, des diodes ont été encapsulées par

CIRTEM dans des boîtiers spécifiques Haute Tension nommés DISCO (Figure 3).

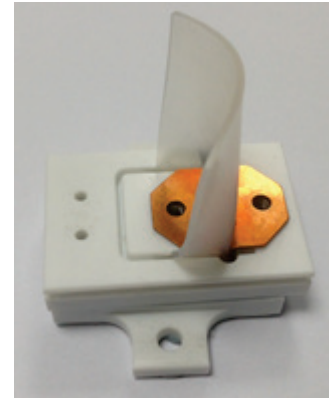


Figure 3 : Boîtier spécifique pour composant Haute Tension discret (DISCO)

La figure 4 présente l'évolution de la caractéristique en polarisation directe de la diode sur une plage de température variant de -25°C à +175°C. L'évolution des caractéristiques est conforme à celle de diodes Schottky puisque la résistance augmente et la tension de seuil diminue avec la température.

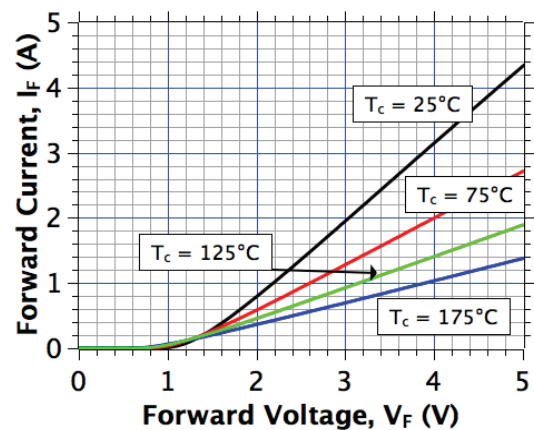


Figure 4 : If(Vf) en direct régime pulsé pour une plage de température variant de 25°C à 175°C

Pour mesurer la résistance thermique d'une de ces diodes dans un boîtier DISCO, nous avons utilisé une méthode basée sur le principe de la variation de la tension V_{AK} durant une impulsion de courant imposée. Ainsi, on obtient une valeur de résistance thermique $R_{thJC}=1,7 \text{ K.W}^{-1}$ pour le couple puce diode SiC/boîtier DISCO.

A partir des mesures en polarisation directe impulsionnelle et de la résistance thermique précédente, nous avons tracé sur la figure 5 les courbes de courant maximum en fonction de la température de boîtier qui reposent sur l'équation suivante :

$$T_j = T_c + R_{thJC} * P_{diss}$$

avec T_j la température de jonction, T_c la température du boîtier et P_{diss} la puissance dissipée. Nous pouvons estimer que le courant nominal de ces diodes est compris entre 3,5A et 4A pour une température T_j de 150°C.

Les diodes ont également été mesurées en régime de blocage jusqu'à 3300V. La Figure 6 illustre les caractéristiques pour des températures variant de +25°C à +175°C. A 3300V, le courant de fuite passe de 100nA pour une température de boîtier de 25°C à 300 μA pour une température de 175°C. Ces diodes SiC présentent l'atout non négligeable, par rapport à leurs homologues 3,3 kV en Si, de pouvoir fonctionner à une T_j de 175°C avec un faible courant de fuite.

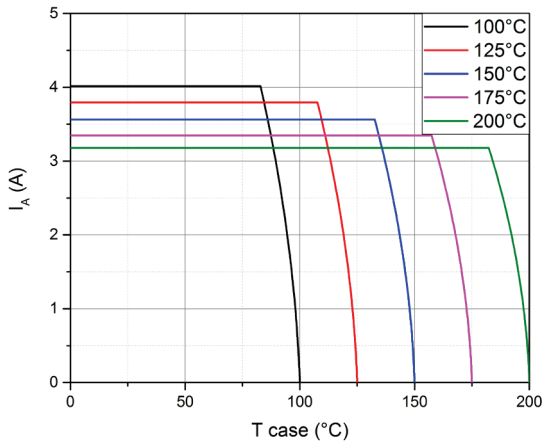


Figure 5 : Courant Maximal Admissible en fonction Tc pour différentes valeurs de T_J définie à une densité de puissance de 300 W.cm⁻²

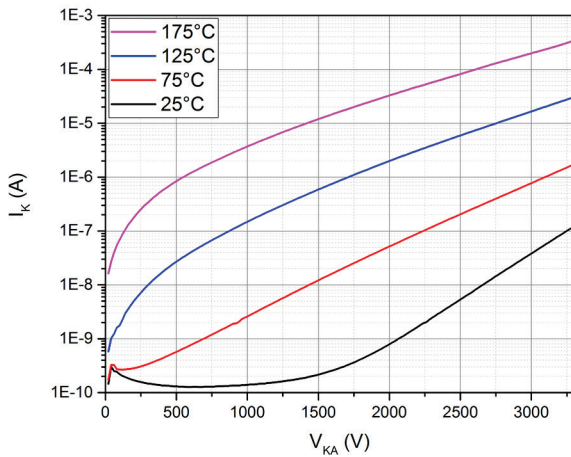


Figure 6 : I_r(V_r) en régime inverse pour des température de 25°C à 175°C

Ces diodes ont une capacité de 30pF sous une tension inverse de 500V (mesure Keysight B1505A).

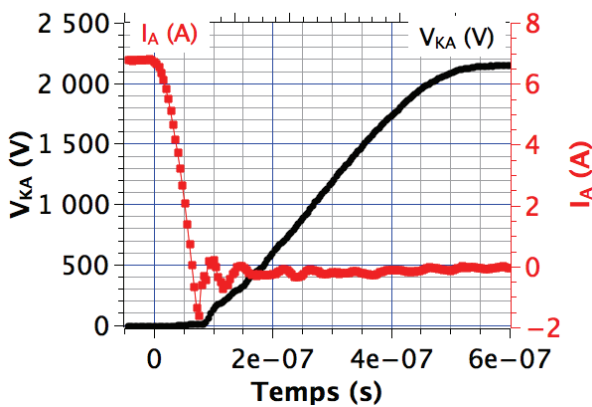


Figure 7 : Evolution temporelle du courant et de la tension de la diode à l'ouverture

Les performances en commutation de ces diodes ont été mesurées dans une configuration hacheur pour un di/dt de $100A.\mu s^{-1}$ (Figure 7). Ces diodes n'ont pas de conduction bipolaire en fonctionnement normal donc leurs performances à l'ouverture ne dépendent pas de la température. Le pic de courant est faible car il n'y a pas de charge à évacuer. Il dépend de la valeur de capacité du composant et il est directement proportionnel à la surface active de la diode. La commutation a été réalisée pour une tension de bus continu de 2,2 kV.

Des mesures de surcharge destructive en courant ont été réalisées pour une onde sinusoïdale redressée de 10 ms. La Figure 8 illustre les formes d'ondes temporelles de la tension et du courant de la diode. La destruction apparaît lorsque le courant augmente subitement vers 4.5ms ou la diode devient un court-circuit puis un circuit ouvert (fusion des fils de lien). La valeur du courant de destruction de la diode est de 24A. Cette mesure est destructive pour le moment mais d'autres diodes ont été caractérisées jusqu'à leur casse et la valeur de courant de destruction varie entre 22 et 25 A.

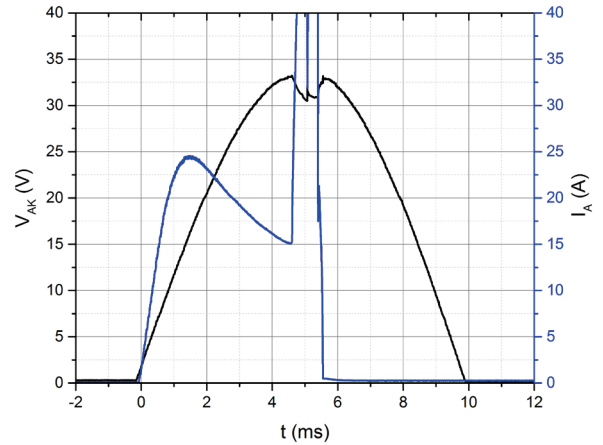


Figure 8 : Forme d'ondes temporelles de la tension et du courant au moment de la destruction de la diode lors de la détermination du « surge current ».

Le design de la diode est de type JBS ce qui implique une composante bipolaire. Or, que ce soit lors des mesures en régime impulsif ou en surcharge de courant, la composante bipolaire n'a pas été activée. Ce design de diode présente l'avantage d'avoir un courant de fuite faible mais nous n'expliquons pas encore pourquoi la composante bipolaire n'apparaît pas ce qui limite sa capacité de surcharge.

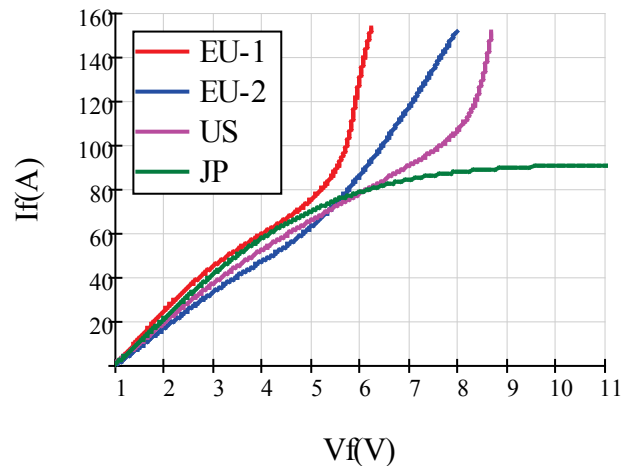


Figure 9: $I_f=f(V_f)$ pour 3 JBS (EU,US) et 1 Schottky (JP) SiC 10A/650V

La figure 9 présente la caractéristique $I_f=f(V_f)$ de 4 diodes SiC 10A/650V. Elle illustre l'effet et l'intérêt de la composante bipolaire au-delà de 60-80-100A d'une diode JBS (EU, US) sur la capacité de surcharge en courant par rapport à une diode Schottky (JP) qui sature à 90A.

4. PACKAGING DE PUISSANCE

La figure 10 représente la technologie d'assemblage double-face retenue pour l'encapsulation des composants issus du programme FILSIC [6]. Cette structure assure de faibles inductances de connexion et de très bonnes performances tant sur le plan thermique qu'au niveau de la fiabilité. Les composants ciblés dans ce programme sont prioritairement des diodes et Jfet SiC 3.3kV. Des IGBT Si 3.3kV disponibles dans le commerce sont utilisés pour valider le packaging et évaluer les diodes SiC.

Les liens électriques et mécaniques entre les puces semi-conductrices (Jfet, Diode) et les substrats céramiques métallisés (1.x) sont assurés par des brasures (2.x) et des billes de cuivre ou « bumps » (3). Les interconnexions (4) sont brasées sur les métallisations (1.x.x). L'isolation de volume est réalisée par un gel ou une résine (7). Le boîtier (6) assure le maintien mécanique des différents éléments, les interfaces hydrauliques et la circulation du liquide de refroidissement (8).

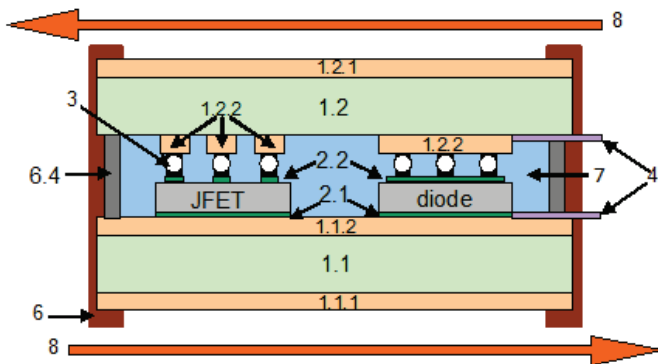


Figure 10 : Schéma d'un module de puissance

Les substrats AlN métallisés en cuivre apparaissent comme le meilleur compromis en termes d'isolation électrique, de conductivité thermique et de fiabilité thermomécanique.

Des essais d'arrachement ont permis de spécifier la nature et l'épaisseur des métallisations (Ag) en faces avant ou arrière des puces semi-conductrices et de choisir les brasures adaptées (SnAg).

L'injection d'un gel polymère (7) entre les 2 substrats (1.x) permet d'assurer une tenue en tension bien au-delà de 3.3kV. L'assemblage possède une tenue diélectrique de 5.3kVrms (50Hz), le seuil d'apparition des décharges partielles est de 5kVrms et celui d'extinction de 4.5kVrms (<10pC, 50Hz).

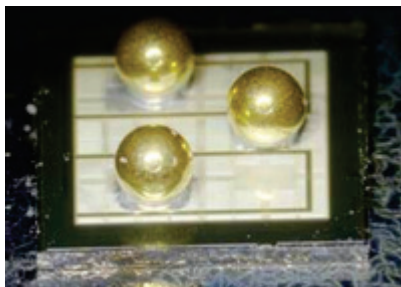


Figure 11 : Billes de connections Grille et Source d'un Jfet SiC 3300V

La figure 11 illustre la difficulté de mise en œuvre de la technologie de packaging de la figure 10 en haute tension avec des petites puces semi-conductrices : 1 bille à droite de connexion de la Grille et 2 billes à gauche de connexion de la Source d'un Jfet SiC 3300V (4x4mm). L'utilisation de puces IGBT Si 3300V (13x13mm) ne pose pas de problème mise à part la nécessité de re-métalliser en Ag la face avant métallisée

en Al car cette dernière est prévue pour une connexion par fils (wire bonding).

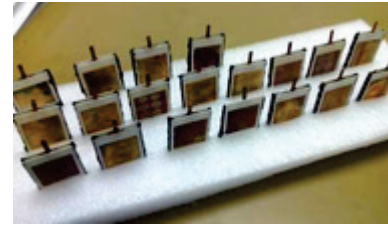


Figure 12 : Modules à 1 puce Diode SiC 3.3kV

Nous avons réalisé 20 modules (Figure 12) à 1 puce diode SiC 3.3kV afin de les soumettre à un cyclage passif entre -40°C et +150°C et étudier la tenue mécanique de ce type d'assemblage. Durant les cycles, 10 modules étaient polarisés en direct avec un courant de 500mA et 10 modules étaient polarisés en inverse avec une tension de 2kV afin de surveiller une dérive d'une diode ou d'une connexion.

Nous avons observé une défaillance rapide au bout de 10 cycles d'un module polarisé en direct que nous attribuons à une mauvaise désoxydation de la face avant de la diode. Le test des 9 modules restant a été stoppé après 200 cycles sans observer de dérive significative sur la chute de tension ou de défaillance de l'assemblage. L'analyse des brasures au scanner acoustique montre un bon état des joints pour 7 modules et une légère dégradation pour les 2 autres.

Le test des 10 modules polarisés en inverse a été stoppé après 200 cycles sans observer de dérive ou de défaillance. L'analyse au scanner acoustique est plus délicate que précédemment à cause du gel isolant (absent lors du test en polarisation directe) mais ne révèle pas de dégradation des joints de brasure.

5. MODULE DIODE AVEC 8 PUCES SiC 3300V

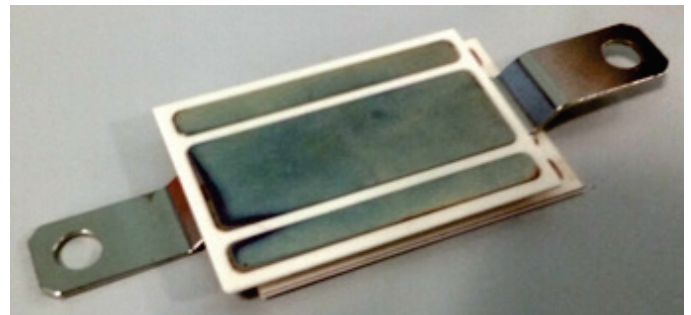


Figure 13 : Modules Diode avec 8 puces SiC 3.3kV (35 x 55 mm)

Nous avons réalisé avec le principe de packaging présenté au §4 un module avec 8 puces diode SiC 3300V (Figure 13). Les substrats acceptent jusqu'à 12 diodes SiC 3300V.

Les mesures de la caractéristique en polarisation directe $I_f=f(V_f)$ sont présentées à la figure 14 jusqu'à 70A à 23°C et limitées à 10A par le moyen de test à 101°C et 124°C. Ces mesures font apparaître une résistance directe élevée : $V_f(I_f) = 1V + 1.15\Omega \cdot I_f(A)$ par diode. Nous avons vérifié que cette résistance ne provenait pas de la mise en boîtier mais du processus de fabrication des diodes.

Le coefficient en température positif de la résistance directe des diodes SiC réalisées permet la mise en parallèle de nombreuses puces avec une bonne répartition de courant.

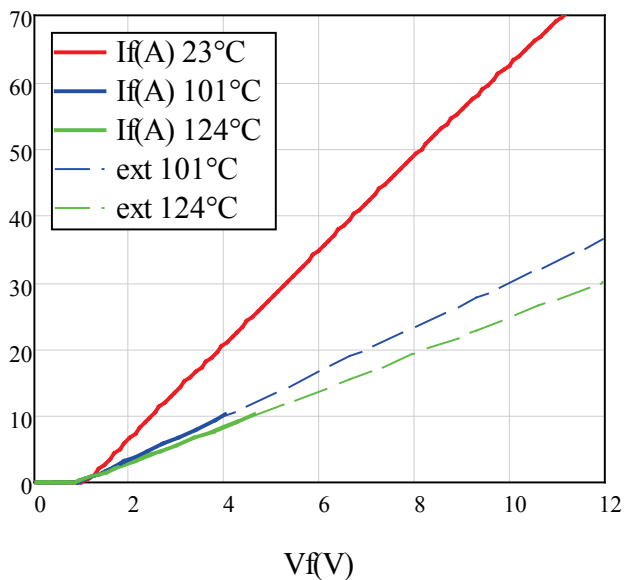


Fig.14 : Caractéristique directe du Modules Diode avec 8 puces SiC 3.3kV

Le figure 15 regroupe les mesures de courant $I_r=f(V_r)$ en polarisation inverse à différentes températures jusqu'à 3.3kV. La tension inverse des 8 diodes encapsulées pour un courant de fuite de $10\mu A$ varie entre 4kV et 4.65kV. Le courant de fuite par diode reste inférieur à $2\mu A$ pour 3.3kV et $125^\circ C$. Cette valeur est très satisfaisante par rapport à des composants Si ou SiC du commerce.

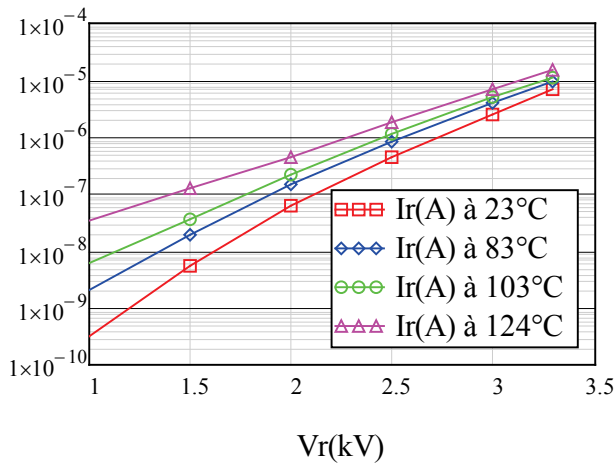


Fig.15 : Caractéristique inverse du Modules Diode avec 8 puces SiC 3.3kV

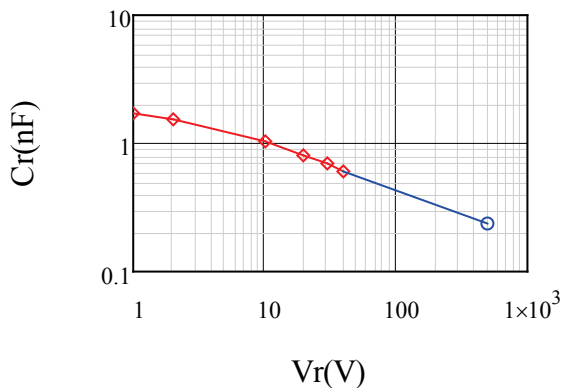


Figure 16 : Capacité en polarisation inverse du Module Diode

La mesure de la capacité $C_r=f(V_r)$ à 100KHz avec une tension inverse comprise entre 0 et 40V est présentée à la figure 16. La capacité est de 77pF par diode sous 40V.

6. MODULE BRAS D'ONDULEUR A IGBT Si ET DIODES SiC

Nous avons réalisé un module de bras d'onduleur 3.3kV/75A (Fig. 18), basé sur la technologie présentée au §4, dont chaque interrupteur est constitué d'une puce IGBT Si et de 6 puces Diodes SiC issues du projet (Fig. 17).

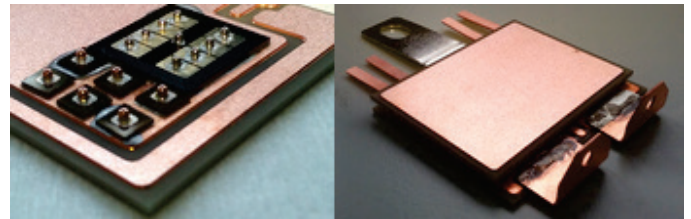


Fig.17 : IGBT Si et Diodes SiC

Fig.18 : Module bras d'onduleur

La figure 17 présente l'organisation d'un interrupteur du bras d'onduleur avec 1 puce IGBT Si (1 bille Grille ; 6 billes Source) et 6 puces Diode SiC (1 bille par Anode). On note que les connexions sont très courtes et coplanaires lorsque l'on brase le second substrat sur les billes. La figure 18 présente le module bras d'onduleur après brasures et ajout du gel d'isolation. Les 2 connexions de puissance côté droit sont le plus et le moins du bus continu et celle côté gauche la sortie. Les 4 connexions de commande côté gauche correspondent à la Grille et à la Source de chacun des 2 IGBT.

Les caractéristiques directes à température ambiante d'un IGBT et des 6 diodes en parallèle sont présentées sur la figure 19. Les diodes utilisées dans le module bras d'onduleur ne sont pas issues du même lot de fabrication que celles utilisées dans le module Diode précédent. Elles présentent une résistance directe 3 fois plus faible que précédemment : $V_f(I_f) = 0.83V + 0.36\Omega \cdot I_f(A)$.

Il faut mettre 26 de ces diodes SiC en parallèle pour obtenir la même chute de tension à 100A et $25^\circ C$ qu'avec une puce Diode Si 100A/3300V. Le design et la réalisation de diodes SiC de plus grandes surfaces avec des calibres en courant 6 et 10 fois plus importants sont en cours. Ce nouveau design est rendu possible par un rendement de production actuel proche de 80%. Il permettra de limiter le nombre de puces en parallèle à une valeur acceptable.

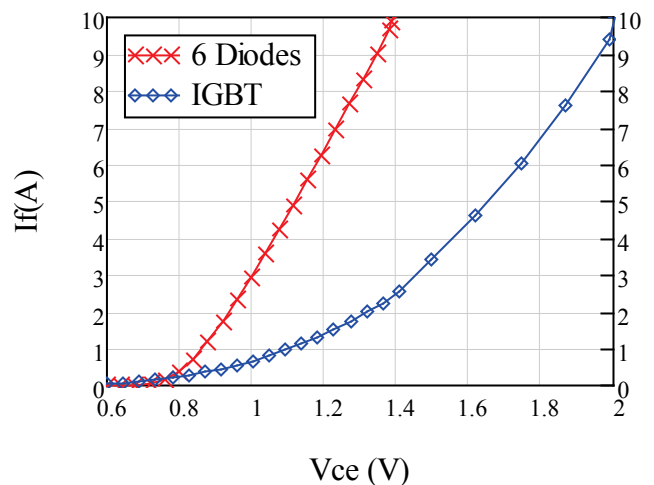


Figure 19 : Caractéristiques directes d'un IGBT Si et des diodes SiC

Le courant de fuite d'un interrupteur à température ambiante est représenté à la figure 20. La mesure du courant d'un IGBT 75A/3300V avec $V_{ge}=0V$ et $V_{ce}=2kV$ est inférieure à $10nA$ à $25^\circ C$. On peut donc directement comparer le courant de $10\mu A$ des 6 Diodes du module bras d'onduleur à

celui de 60nA des 8 Diodes du module diode soit une moyenne de 160nA contre 7.5nA par diode sous 2kV. Cet écart important provient de processus de fabrication différents.

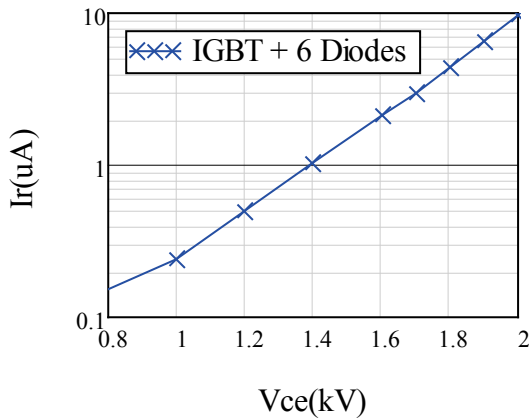


Fig.20 : Caractéristique à l'état bloqué d'un IGBT Si et des diodes SiC

Le principal avantage de la diode JBS SiC 3.3kV par rapport à une diode bipolaire Si 3.3kV de même calibre en courant est une charge stockée 50 fois plus faible. De plus, les charges stockées dans la diode JBS SiC en fonctionnement nominal, induisent essentiellement un courant capacitif, alors que celles stockées dans la jonction pn de la diode Si entraînent un courant de recouvrement inverse du même ordre que le courant direct avec un temps de commutation proche de 500ns ($I_{rm}=135A$ pour $I_f=100A$, $dI/dt=1100A/us$ 125°C).

Lors de la commutation « Blocage Diode – Amorçage IGBT », l'IGBT voit la somme du courant de recouvrement de la diode et du courant de charge, ainsi que la tension d'alimentation tant que la diode ne s'est pas bloquée. Cet accroissement du courant couplé à l'allongement du temps de commutation ($t_{com}=450ns > t_{r_igbt}=180ns$) entraînent une augmentation importante des pertes à l'amorçage dans l'IGBT.

Dans le cas d'un dimensionnement induisant les mêmes pertes par conduction dans les diodes SiC et Si, la configuration « Diode JBS SiC+IGBT Si » permet de diviser l'énergie totale de commutation par 2 par rapport à la configuration « Diode bipolaire Si+IGBT Si ».



Figure 21 : Test du module bras d'onduleur IGBT Si / Diodes SiC

La figure 21 représente le module bras d'onduleur en test sans le dispositif de refroidissement. On distingue le condensateur de découplage du bus continu en bas, la commande des IGBT à gauche et la sortie vers la charge en haut.

Les mesures lors d'un fonctionnement sur charge inductive avec un courant commuté de 40A et une tension d'alimentation de 2kV sont présentées à la figure 22. On note la faible surtension au blocage de l'IGBT qui résulte de la technologie d'encapsulation retenue.

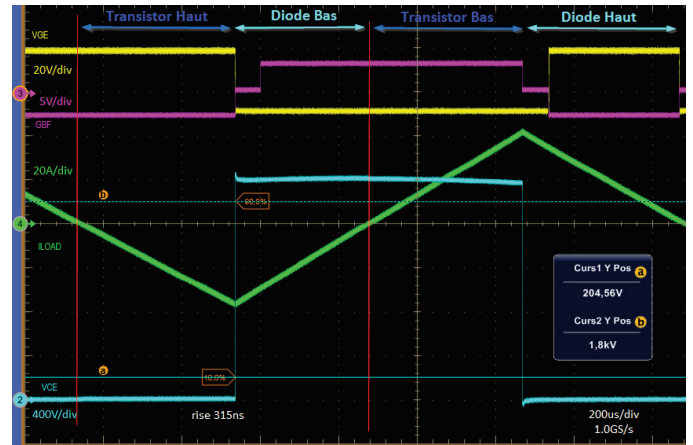


Figure 22 : Mesure du module bras d'onduleur IGBT Si / Diodes SiC

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté la conception, la fabrication et la caractérisation de diodes SiC 3300V/5A. Nous avons choisi une technologie d'encapsulation haute tension faiblement inductive à refroidissement double face pour réaliser un module à 8 diodes SiC 3300V et un module bras d'onduleur à diodes SiC et IGBT Si 3300V.

L'association de diodes SiC avec un IGBT Si 3300V permet de diviser par 2 l'énergie totale de commutation tout en conservant les mêmes pertes par conduction. Des diodes JBS SiC 3300V 30A et 60A sont en cours de développement et constituent une nécessité pour accéder à la forte puissance. La configuration hybride « Diodes SiC-IGBT Si » ouvre des perspectives économiques et de performances très intéressantes pour des applications industrielles de forte puissance.

Pour les applications où l'augmentation de la fréquence de découpage est un facteur clé de succès, le JFET SiC 3300V en cours de développement est une solution prometteuse. Dans ce cas, le packaging faiblement inductif proposé devient une nécessité.

Grâce aux efforts des partenaires de FilSiC, la production de la première diode SiC 3300V est en phase pré-industrielle.

8. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la DGA et BPI-France pour le support technique et financier au programme FilSiC.

9. REFERENCES

- [1] D. Tournier and al. "Wide Band Gap semi-conductors benefits for high power", high voltage and high temperature applications. Advanced Materials Research Vol. 324 (2011), pp. 46-51.
- [2] GAP3SLT33 SiC Power Schottky Diode www.genesicsemi.com
- [3] J. Richmond and al. "Next-generation planar sic mosfets from 900 V to 15 kV". In Silicon Carbide and Related Materials 2014, volume 821 of Materials Science Forum, pages 701-704.
- [4] K. Hamada and al. "3.3kV/1500A power modules for the world's first all-SiC traction inverter". Japanese Journal of Applied Physics, 54(4S):04DP07, 2015.
- [5] Sentaurus Device Version F – 2011.09 www.synopsys.com.
- [6] C. Duchesne and al. "Interconnection technology for new wide band gap semiconductors", EPE'13 ECCE Europe