

# FilSiC – De l'épitaxie au module de puissance

Philippe CUSSAC<sup>1</sup>, Cyrille DUCHESNE<sup>1</sup>, Jean Baptiste FONDER<sup>2</sup>, Dominique TOURNIER<sup>2</sup>,  
Pierre BROSSELDARD<sup>3</sup>, Gregory GROSSET<sup>4</sup>, Lionel DUPUY<sup>4</sup>,

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

<sup>3</sup>CALYTechnologies, 56 Bd Niels Bohr, CS52132 69603 Villeurbanne, <sup>4</sup>IBS, 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, basé sur 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 3500V présentée ici.**

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

## 1. INTRODUCTION

Le Carbure de Silicium (SiC) est un semiconducteur à large bande interdite. Ses propriétés physiques intrinsèques lui 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 pétrolière demandent des composants capables de supporter des températures ambiantes et/ou des tenues en tensions toujours plus élevées [1]. Les travaux suivants 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) 3500V-20A. Cette démarche s'inscrit dans le cadre du projet FILSIC qui a pour but le développement d'une filière industrielle française sur les composants de puissance en SiC partant de :

- La réalisation de l'épitaxie par la société NOVASIC
- Le design et la caractérisation électrique des composants SiC faits par le laboratoire AMPERE et industrialisés chez CALY Technologies (Spin-off du laboratoire AMPERE)
- L'optimisation de la passivation des composants (Laboratoire Laplace)
- Le développement d'équipements spécifiques pour la fabrication des composants (VEGATEC et IBS)
- La fabrication des composants (IBS)
- La réalisation des modules (CIRTEM)
- Intégration dans des convertisseurs (CIRTEM et ECA).

Un module hybride IGBT-Si/Diode-SiC a été réalisé avec des diodes SiC issues du projet FILSIC. Le papier présente le travail d'optimisation de la diode (design, fabrication et caractérisation électrique), la réalisation et les caractéristiques du module.

## 2. CONCEPTION ET FABRICATION DE LA DIODE SiC SCHOTTKY/JBS 3500V

La diode Schottky/JBS développée est illustrée par la Figure 1. 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 Sentaurus<sup>TM</sup>[2].

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 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 5 800V. Une marge de sécurité est prise pour les soucis liés notamment à la technologie qui n'est pas tout à fait mature.

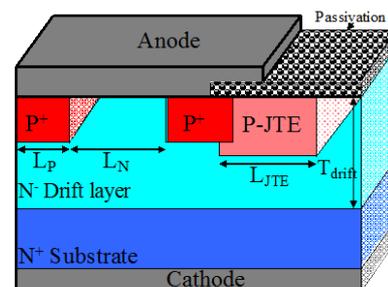


Figure 1 : Vue en coupe de la diode Schottky/JBS.

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<sup>+</sup> 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 SiO<sub>2</sub> de 1,5  $\mu\text{m}$  est réalisé pour la passivation primaire. Deux niveaux de métallisation sont nécessaires dont une première pour former les contacts Schottky de l'anode. La seconde, pour les métaux épais, cette dernière permettra d'encapsuler les puces, braser le composant en face arrière et de braser des bumps sur la face avant. La dernière étape réside 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 dans des boîtiers métalliques TO-254 par CIRTEM. La Figure 2 présente l'évolution de la caractéristique en polarisation directe de la diode sur une plage de température variant de -50°C à 200°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.

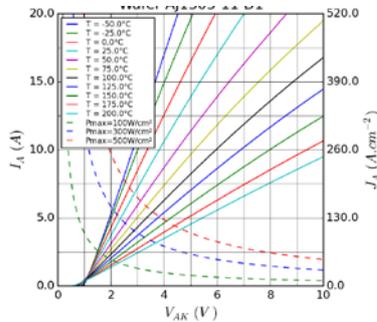


Figure 2 : I(V) en direct régime pulsé pour une plage de température variant de -50°C à 200°C

A partir de ces courbes et des tracés de current derating (présentées dans le papier final), nous pouvons estimer que le courant nominal de ces diodes est compris entre 3,5 et 5,5 A pour une température  $T_j$  de 150°C.

La capacité de ces diodes est égale à 30pF sous une tension de 500V. La résistance thermique mesurée de ces diodes dans un boîtier TO-254 est de 1,5 K.W<sup>-1</sup>.

Dans le papier final, nous présenterons :

- L'évolution des courants de fuites avec la température
- Les courbes de current derating
- Les courbes de commutation en mode DC/DC
- Le surge current

### 4. PACKAGING DE PUISSANCE

La figure 3 présente la technologie d'assemblage double-face retenue pour l'encapsulation des composants issus du programme FILSIC. Les liens électriques et mécaniques entre les puces et les substrats sont assurés par des brasures et des billes de cuivre (bumps) [3]. Cette structure assure de faibles inductances de connexion et de très bonnes performances tant sur le plan thermique que de la fiabilité.

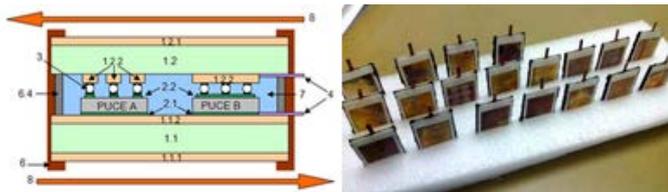


Fig.3 : Schéma d'un module de puissance Fig.4 : Modules Diode SiC 3.3kV

Des essais d'arrachement ont permis de spécifier la nature et l'épaisseur des métallisations des puces et de choisir le type de brasure.

L'injection d'un gel polymère entre les 2 substrats permet d'assurer une tenue en tension au-delà de 3.3kV. Les assemblages ont fait l'objet de tests de tenue diélectrique et de décharges partielles qui seront présentés dans le papier final.

Après avoir réalisé 20 modules (Fig.4) à 1 diode SiC 3.3kV, nous les avons soumis à un cyclage passif entre -40°C et +150°C afin d'étudier la tenue mécanique de ce type d'assemblage dont nous présenterons les résultats.

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

Nous avons réalisé un premier module de bras d'onduleur 3.3kV/75A (Fig.6) dont chaque interrupteur est constitué d'une puce IGBT Si et de 6 puces Diodes SiC (Fig. 5).

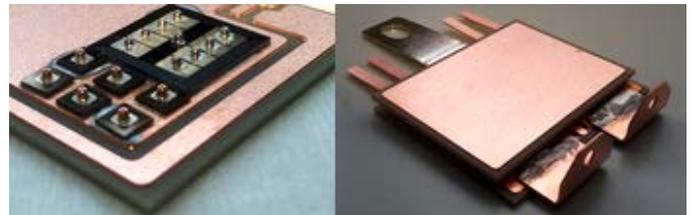


Fig.5 : IGBT Si et Diodes SiC

Fig.6 : Module bras d'onduleur

Les caractéristiques directes à température ambiante d'un IGBT et des 6 diodes en parallèle sont présentées sur la figure 7. Le courant de fuite d'un interrupteur est de 10µA sous 2kV. Le principal avantage d'une diode JBS SiC 3.3kV par rapport à une diode bipolaire Si 3.3kV de même calibre en courant est une charge stockée 40 à 50 fois plus faible qui se traduit par une diminution drastique des pertes en commutation dans la diode et dans l'IGBT.

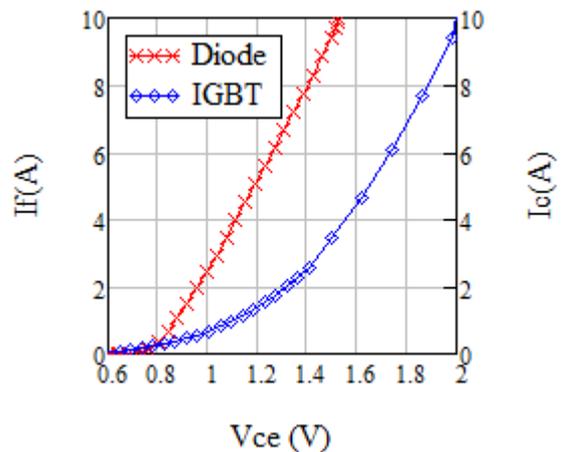


Fig.7 : Caractéristiques directes I=f(V) d'un IGBT Si et des diodes SiC

Les résultats de test du module bras d'onduleur dans un convertisseur sous 1800V seront présentés dans le papier final.

### 6. CONCLUSIONS

Nous avons présenté la conception et la fabrication d'une diode SiC 3500V ainsi que d'un packaging performant. Nous avons poursuivi par la réalisation et le test d'un module bras d'onduleur à IGBT Si et diodes SiC. La production de cette première diode SiC 3500V est en phase pré-industrielle.

### 7. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient BPI-France pour le support financier du programme FilSiC.

### 8. 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.J.  
 [2] Sentaurus Device Version F – 2011.09 www.synopsys.com.  
 [3] C. Duchesne and al. "Interconnection technology for new wide band gap semiconductors", EPE'13 ECCE Europe