



**HAL**  
open science

## **PASChAC, système automatisé de caractérisation de composants sur wafer**

Bertrand Vergne, Gontran Pâques, Claudia Maurer, Sigo Scharnholz, Pierre Brosselard, Dominique Planson

► **To cite this version:**

Bertrand Vergne, Gontran Pâques, Claudia Maurer, Sigo Scharnholz, Pierre Brosselard, et al.. PASChAC, système automatisé de caractérisation de composants sur wafer. *Electronique de Puissance du Futur 2012*, Jul 2012, Bordeaux, France. hal-02282734

**HAL Id: hal-02282734**

**<https://hal.science/hal-02282734>**

Submitted on 10 Sep 2019

**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.

# PASChAC, système automatisé de caractérisation de composants sur wafer

Bertrand Vergne<sup>1</sup>, Gontran Pâques<sup>1</sup>, Claudia Maurer<sup>1</sup>, Sigo Scharnholz<sup>1</sup>, Pierre Brosselard<sup>2</sup>, Dominique Planson<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut Franco-allemand de Recherches de Saint Louis (ISL), 5 rue du G<sup>al</sup> Cassagnou, 68301 Saint Louis, France

<sup>2</sup> Laboratoire Ampère, INSA Lyon, 20 Av. Albert Einstein, 69621 Villeurbanne, France

*La commercialisation de wafers de grande taille en carbure de silicium implique la présence d'un grand nombre de composants par wafer. Cet article décrit les améliorations apportées à notre chambre à vide de caractérisation de composants nus sur wafer servant également à la validation des processus technologiques en cours de production. Nous présentons des exemples de résultats obtenus dans le cadre de divers contrats et des tests de fiabilité de nos mesures. Nous comparons également ces dernières avec celles obtenues avec de l'huile isolante.*

## I. INTRODUCTION

La réalisation de composants haute tension de puissance à base de matériaux à large bande interdite nécessite des moyens dédiés à l'évaluation de leurs performances. En effet, les composants à base de nitrures de gallium, de diamant ou de carbure de silicium visent potentiellement des domaines de tension supérieurs à ceux communément rencontrés. Ces nouveaux matériaux impliquent la mise au point de nouveaux concepts et de nouveaux procédés de fabrication, par exemple de nouvelles structures de terminaison [1-3]. Le challenge réside alors dans l'évaluation des bénéfices de ces dernières sur le comportement final des composants. De plus la commercialisation de wafers de taille de plus en plus importante impose l'adaptation des moyens de production sur des surfaces plus vastes. Cela conduit à un nombre important de composants par wafer : la densité de défauts dans les matériaux empêche encore la réalisation de composant de grande surface active. Un traitement manuel de plusieurs centaines de composants est difficilement envisageable [4].

C'est dans ce contexte que nous présentons notre instrumentation de composants sur wafer, qui a été perfectionnée et utilisée dans le cadre des projets VHVD-SiC et SiCHT<sup>2</sup> [5]. Il s'agit de notre chambre expérimentale dénommée PASChAC, pour « Precise-Automated-Semiconductor-Characterisation under Ambient-Control ». Cette dernière permet de tester des composants en régime statique, courbes courant/tension, au cours de leur fabrication avec un minimum d'intervention humaine et ceci sans contamination du wafer grâce à l'emploi du vide comme passivation secondaire.

## II. PERFORMANCES ET AUTOMATISATION DE PASChAC

### A. Vue d'ensemble du système et améliorations apportées

La figure 1 montre un wafer du projet SiCHT<sup>2</sup> installé pour être mesuré sur le porte échantillon en cuivre, lui-même isolé de la masse générale. Ce dernier est relié à un nano-ampèremètre ou un électromètre Keithley en fonction des besoins. L'appareil de mesure est inséré dans la boucle

de retour du courant et est protégé par un éclateur à gaz et une résistance de 1 M $\Omega$ , figure 2. La pointe peut scanner une surface de 70x70 mm soit presque l'intégralité d'un wafer de 3 pouces grâce à la platine de translation installée au fond de la chambre. Le porte pointe est fixé à deux translations permettant de lever et d'ajuster la pointe suivant un des deux axes sur une course de 5 mm.

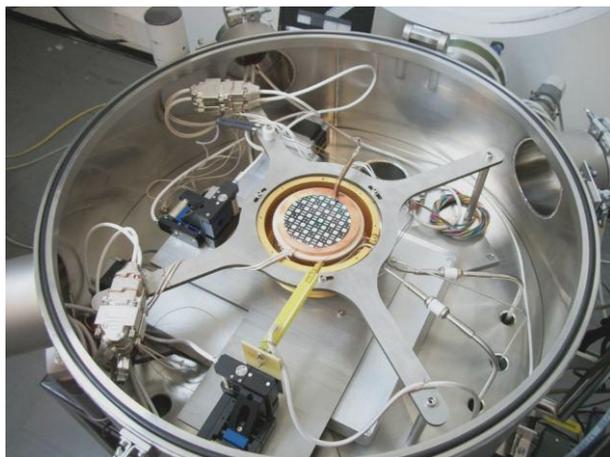


Figure 1 : Vue intérieure de la chambre avec un wafer de 3 pouces sur le porte échantillon. La pointe haute tension est à l'extrémité du bras situé au bas de la photographie.

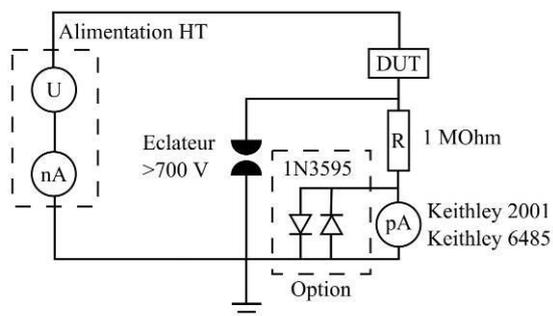


Figure 2 : Schéma électrique équivalent du système d'acquisition.

Une partie de l'ensemble de l'instrumentation utilisée est présentée sur la figure 3. Elle comprend : les moniteurs de pression (Penning, Pirani, cathode froide), le spectromètre de masse et son oscilloscope, les drivers des translations, le système d'interlock, le contrôleur de température,

l'alimentation haute tension, le Keithley 2001 et l'ordinateur de contrôle. La redondance des moyens de mesure de la pression de l'enceinte permet de savoir quand il faut nettoyer les deux principaux capteurs.

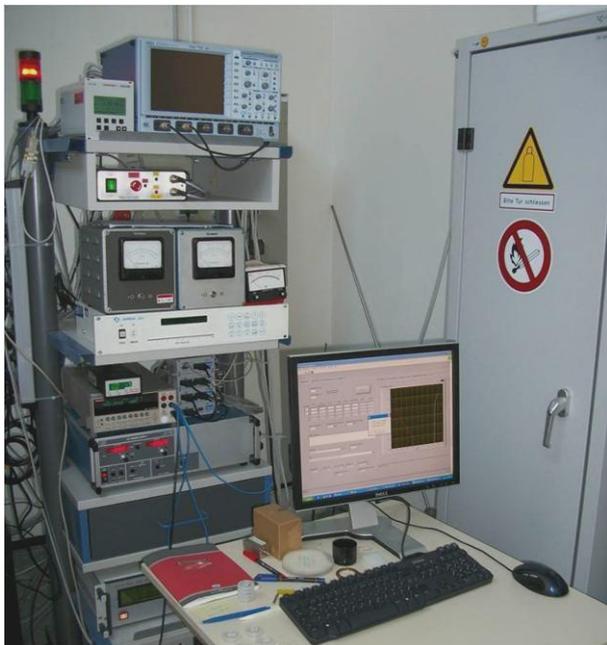


Figure 3 : Vue de l'ensemble des appareils permettant de réaliser les mesures automatiques.

Les améliorations apportées, depuis notre première présentation de notre chambre lors de la précédente conférence EPF, sont avant tout l'ajout des translations motorisées et l'évolution du logiciel d'acquisition (gestion du déplacement de la pointe et sélection des composants). Un capteur de type photopile a également été ajouté pour les mesures sans contact de l'homogénéité de la température sur l'ensemble du wafer. Ce dernier est actuellement porté par le deuxième ensemble de translation de 5 mm (partie gauche de la figure 1, sans le bras et la thermopile). Il nous reste encore à le calibrer en température.

### B. Performances accessibles

PASChAC est une chambre à vide permettant d'accueillir à l'heure actuelle des wafers de 3 pouces de diamètre ou des échantillons plus petits. Nous espérons porter sa capacité d'accueil à des wafers 4 pouces d'ici les prochaines années. L'intérêt du vide est de ne pas contaminer les wafers et il est plus fiable et plus simple d'utilisation que les huiles haute tension ou les gaz inertes sous pression. En effet contrairement à un milieu dense de type liquide, le vide permet de limiter grandement la convection autour du composant ou du wafer sous test créée entre les parties froides et chaudes. Cela évite notamment la migration d'éléments métalliques ou de poussières à proximité des terminaisons des composants réduisant par la même leur tenue en tension. Le même problème est rencontré lors du déplacement de la pointe dans l'huile : effet de brassage. L'oxydation des métallisations est également réduite grâce au vide lors de l'exposition des échantillons à de hautes températures. La pression minimum de travail étant de  $10^{-4}$  mbar, la pression partielle d'oxygène restant est au moins  $10^{-7}$  fois inférieure à la

pression atmosphérique (« équation des gaz parfaits »). A l'opposé, les liquides peuvent contenir une quantité non négligeable en outre d'oxygène dissoute vis-à-vis du vide, loi de Henry [6]. Les performances de PASChAC sont : une polarisation des composants jusqu'à 20 kV, une précision des mesures en courant allant de 10 fA, Keithley 6485, à 10 pA, Keithley 2001, la régulation du porte échantillon théoriquement de 4 K à 700 K, une mesure de la composition du vide de 0 amu à 100 amu grâce à un analyseur de gaz résiduels, une régulation de la pression de la chambre de  $2.10^{-6}$  mbar à 1000 mbar et le déplacement d'une pointe sur un carré de 70 mm de côté par l'intermédiaire de translations motorisées (pilotage manuel ou automatisé).

### C. Automatisation des mesures

L'automatisation a été réalisée de manière logicielle. L'utilisateur rentre ses paramètres pour la ou les caractérisations électriques à réaliser sur l'ensemble des composants d'une même famille : tension de départ, tension d'arrivée, marche de tension, vitesse de montée en tension, courant maximal de l'alimentation, courant maximal de consigne autorisé sur le multimètre, température de la série de mesure, la pression minimale à atteindre avant les mesures.

Une fois les paramètres électriques rentrés, il suffit de charger une image suffisamment résolue des structures métalliques du wafer ou de l'échantillon dans le programme (une photographie peut aussi convenir sous certaines réserves). L'utilisateur choisit les composants devant être testés et place également sur l'image les points de référence pour déterminer la correspondance pixels-coordonnées de la pointe haute tension dans le système de coordonnées des translations motorisées. La sélection des composants à tester peut se faire soit manuellement soit par reconnaissance de formes par le logiciel. Le plan de contact est également palpé pour connaître l'orientation du wafer vis-à-vis du système de coordonnées des translations. Le logiciel se charge alors de calculer la matrice de changement de repère et l'équation du plan tout en présentant la marge d'erreur à l'utilisateur. Ce dernier peut choisir de déplacer la pointe de composant en composant sans pratiquer les mesures planifiées, afin de vérifier le bon positionnement de la pointe sur le contact.

Finalement, le logiciel se charge de réaliser les mesures souhaitées pour l'ensemble des composants sans autres interventions humaines. Elles sont toutes sauvegardées dans des fichiers textes au fur et à mesure. Le logiciel fournit également une image de synthèse de la numérotation des composants, une autre des points de référence, ainsi qu'une dernière actualisée à chaque mesure de la tension maximale atteinte par chacun des composants. Cette cartographie permet d'avoir une vue d'ensemble des performances atteintes.

Les translations utilisées permettent théoriquement un placement des pointes à moins de 10  $\mu$ m près : cumul de l'ensemble des marges possibles d'erreur, soit l'erreur de positionnement et l'erreur angulaire reportée à l'extrémité de la pointe de mesure. A ce jour aucune structure aussi petite n'a été testée : le plus petit contact métallique contacté de manière automatique faisait 200  $\mu$ m de

diamètre sur un wafer de 3 pouces. La résolution maximale de l'image manipulable est de 4000x4000 pixels, soit une résolution d'environ 20  $\mu\text{m}$  au niveau du wafer. Cette dernière devrait être suffisante pour positionner de manière reproductible notre pointe de 15  $\mu\text{m}$  de rayon de courbure au centre d'une structure de 140  $\mu\text{m}$  de diamètre, 7x7 pixels, voir légèrement moins en fonction de la qualité de la prise des points de références (sur l'image et sur le wafer).

### III. FIABILITE ET MESURES DE WAFERS ENTIERS

#### A. Tests de fiabilité

Nous avons déjà démontré les performances électriques lors d'une précédente communication [5]. Nous démontrons ici que notre système de métrologie est parfaitement fiable et plus pratique que l'utilisation d'huile isolante. La fiabilité des mesures a été conduite sur un petit échantillon carré de 1 cm de côté. Sur cet échantillon, 6 diodes PIN en SiC-4H de 2 kV fabriquées à l'ISL ont été caractérisées sous différents niveaux de vide et différentes compositions de ce dernier (air sec, azote, argon). Les résultats des mesures sont présentés dans la figure 4 pour une de ces diodes et ce pour différents niveaux de vide (air sec).

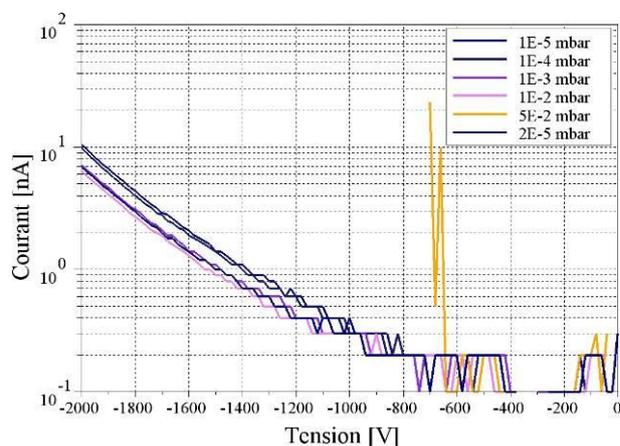


Figure 4 : Courbes I(V) d'une diode SiC sous différents niveaux de vide réalisées avec un Keithley 2001.

Les tests avec de l'azote et de l'argon ne changent pas fondamentalement les résultats obtenus avec l'air sec à part le niveau d'isolation pour les « hautes pressions »,  $5.10^{-2}$  mbar, loi de Paschen. Les mesures ont été réalisées sur 2 semaines avec très peu de dispersion entre chaque mesure.

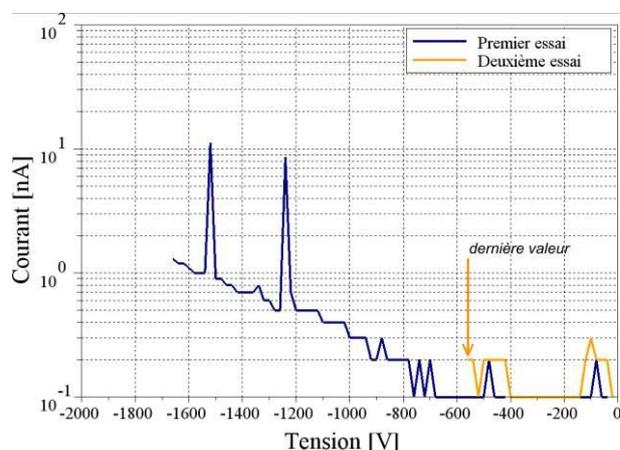


Figure 5 : Courbes I(V) de la diode précédente (figure 4), mais cette fois isolée par de l'huile haute tension.

Ces mêmes mesures, réalisées en employant du Galden® comme huile isolante à pression atmosphérique, ont montrées des sauts de courants et une tenue en tension diminuée. De plus lors de la deuxième série de mesure, sans avoir changé l'huile, la tenue en tension mesurée des composants a dramatiquement chuté. La figure 5 montre les courbes I(V) relevées pour la diode précédente lors de deux mesures consécutives dans l'huile.

Ces résultats médiocres s'expliquent par la présence après le premier passage d'éléments de la sur-métallisation en suspension dans l'huile brassés par le déplacement de la pointe. A cela s'ajoute la pollution initiale des surfaces malgré leur nettoyage. Ce constat est d'autant plus dramatique que nous avons seulement testé des composants « basse tension ». Un milieu liquide isolant ne présente pas la fiabilité de notre système sous vide et permet la migration d'éléments par la présence du champ électrique.

#### B. Exemple de mesure de wafers entiers

Dans le cadre de l'ANR VHVD-SiC, nous avons mis à l'épreuve notre dispositif pour la cartographie d'un wafer 3 pouces contenant 585 diodes de petite taille et 141 diodes de plus grande taille. Ces dernières ont été réalisées par le CNM de Barcelone et conçues par le laboratoire Ampère à Lyon [7]. Le masque de la métallisation du wafer est présenté figure 6. Il a servi comme entrée au programme.

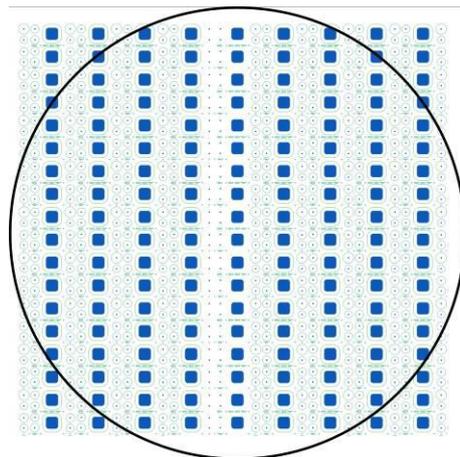


Figure 6 : Vue de la couche de métallisation du wafer VHVD-SiC. Il comprend 141 diodes de 3,9 mm<sup>2</sup> et 585 diodes de 0,045 mm<sup>2</sup>. Le cercle noir dénote les limites du wafer.

L'ensemble des composants a été caractérisé en deux étapes : les petites diodes puis les plus grandes avec des paramètres plus larges au niveau des courants de fuite admissibles. Les mesures ont été réalisées sans aucune interruption pendant une semaine et demie. Les interventions humaines se sont limitées à une vérification quotidienne de l'état de marche de l'expérience : vérification du contact par la mesure en direct et du bon positionnement de la pointe au début d'une mesure.

Le logiciel construit en temps réel une cartographie de la tenue en tension de chaque diode montrant ainsi la progression de la caractérisation (en plus de la barre de progression). Une portion de cette cartographie est présentée figure 7. Les données inscrites en rouge correspondent à un arrêt de la mesure provoqué par le fait que le courant en sortie d'alimentation haute tension a atteint la limite fixée pour cette dernière, dans notre cas une

valeur de 200 nA. La valeur en orange correspond à l'arrêt de la mesure suite à la mesure d'un courant supérieur à la limite fixée pour le Keithley, dans notre cas 50 nA, sans avoir dépassé 200 nA sur l'alimentation. Une troisième couleur, le vert, correspond à l'arrêt de la mesure car la valeur de la tension maximale fixée par l'utilisateur a été atteinte sans qu'aucune limite de courant ne l'ait été, dans notre cas cela aurait été 15 kV.

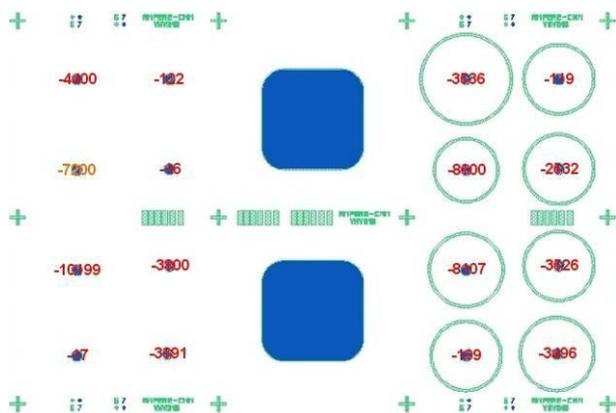


Figure 7 : Exemple de cartographie obtenue avec le système de mesure automatisé.

Malgré un grand nombre de valeurs en rouge sur la figure 7, les composants sont toujours fonctionnels. Nous constatons sur la figure 7 qu'une des diodes affichées a atteint une tension inverse de 10199 V. Le faible niveau de courant autorisé en inverse et associé à une faible vitesse de montée, 10 V/s, permet de préserver les composants de la destruction. Les mesures montrent que lorsque le courant maximum autorisé par l'alimentation haute tension est atteint, la dernière tension mesurée est presque dans la totalité des cas, supérieure à la précédente mesure. Cela signifie qu'un point stable de la caractéristique I(V) a été atteint et que le composant est toujours fonctionnel d'un point de vue caractérisation statique. La faible vitesse de montée en tension et l'intégration sur 10 mesures du courant par le Keithley explique le long processus de mesure de l'ensemble des composants des deux types, malgré des paliers de 200 V entre chaque mesure.

Les capacités d'auto-numérotation des composants d'un wafer ont pu être mises à l'épreuve sur un wafer du projet SiCHT<sup>2</sup>. Ce wafer est composé de diodes de 2, 4 et 24 mm<sup>2</sup>, figure 8.

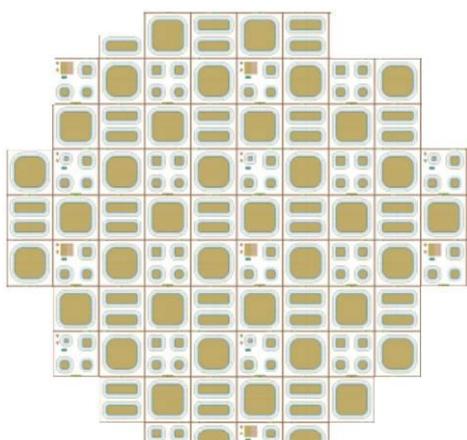


Figure 8 : Wafer 3 pouces du projet SiCHT<sup>2</sup> comprenant des diodes 6 kV de 2, 4 et 24 mm<sup>2</sup> de surface active.

La reconnaissance automatique des composants et leur numérotation sont présentées figure 9. Nous pouvons y découvrir les divers symboles : les croix rouges correspondent aux points de référence pour le calcul de la matrice de changement de repère pixels/millimètres, les cercles verts avec un point rouge correspondent aux points de référence des contacts anodes (calcul de l'équation du plan contenant les contacts), les cercles jaunes avec une croix correspondent aux composants à tester. Ces derniers sont sélectionnés automatiquement par le programme en indiquant les valeurs minimum et maximum de leur surface en nombre de pixel et du rapport largeur sur hauteur. Ces deux critères sont suffisants pour sélectionner l'ensemble des composants de ce wafer.

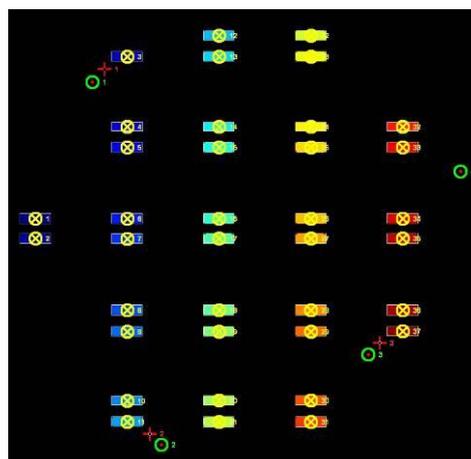


Figure 9 : Résultat de la recherche automatique et de la numérotation des composants d'un même type d'un wafer de diodes du projet SiCHT<sup>2</sup>.

A titre d'exemple, une sélection manuelle des composants du wafer de la figure 6 nécessite 1 heure 30 minutes à une personne entraînée : chaque symbole se rentre un par un. Une détection automatique de ces derniers se fait en moins de trois minutes. La seule contrainte est d'avoir une image représentant le wafer sous test sans composants surnuméraires et éventuellement sans les composants que nous ne souhaitons pas tester.

#### IV. CONCLUSION

Nous avons démontré l'intérêt d'utiliser le vide comme moyen de passivation secondaire de composants haute tension. En effet, les huiles haute tension, comme le Galden®, ne présentent pas la fiabilité et la constance du vide en matière d'isolation haute tension. De plus, l'utilisation du vide permet le test de wafers ou d'échantillons sans avoir à recourir à une étape ultérieure de nettoyage. Cela permet de poursuivre les étapes technologiques restant à faire, si l'étape testée est validée par la mesure.

Nous disposons d'un système de métrologie fiable des composants haute tension ayant fait ses preuves aussi bien sur des composants haute tension en SiC qu'en diamant [8,9]. Ce dispositif permet de procéder à la mesure de l'ensemble des composants d'un même type sur un wafer de 3 pouces de diamètre en toute sécurité. Les mesures prises sont parfaitement reproductibles d'un jour à l'autre

voir d'une semaine à l'autre même si cela est principalement fonction du composant. Le grand nombre de mesures réalisées avec cet instrument depuis plusieurs années permet de renforcer notre confiance dans la fidélité des caractéristiques I(V) obtenues [10,11].

La prochaine amélioration concerne l'ajout d'une deuxième pointe pour la polarisation des composants à trois électrodes : thyristors, transistors bipolaires, FET, JFET. La calibration du capteur de température sera la dernière étape.

Ce dispositif est prêt à être mis à disposition de nouveaux partenaires universitaires ou industriels aussi bien pour des besoins de caractérisation de composants que de mesures de champ de rupture de films isolants.

## V. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier nos collaborateurs, notamment : l'Institut Néel, le laboratoire Laplace, le CNM. Nous remercions particulièrement l'ANR pour son soutien du projet VHVD-SiC : ANR-08-BLAN-0191.

## VI. REFERENCES

- [1] G. Pâques, "Graded etched junction termination for SiC thyristors", Materials Science Forum, 2011.
- [2] W. Sung, "A new edge termination technique for high-voltage devices in 4H-SiC-multiple-floating-zone junction termination extension", Electron Devices Letters, 32, 7, 2011.
- [3] A. Mihaila, "Novel buried field rings edge termination for 4H-SiC high-voltage devices", Materials Science Forum, 891, 2003, p.433-436.
- [4] M. Östling, "SiC power devices – present status, applications and future perspective", Proceedings of the 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, 2011.
- [5] B. Vergne, "Chambre à vide de caractérisation haute tension de composants semiconducteurs nus", EPF 2010.
- [6] W.A. Fessler, "A refined mathematical for prediction of bubble evolution in transformers", IEEE Transaction on Power Delivery, 4, 1, 1989.
- [7] M. Nguyen, "Protections périphériques de diodes bipolaires 10 kV en SiC-4H", EPF 2012.
- [8] P.N. Volpe, "Breakdown voltage higher than 7.5 kV in Schottky diamond diodes", Hasselt Diamond Workshop, 2010.
- [9] P.N. Volpe, "Extreme dielectric strength in Boron doped homoepitaxial Diamond", Applied Physics Letters, 97, 1, 2010.
- [10] G. Civrac, "600 V PiN diodes fabricated using on-axis 4H silicon carbide", ICSCRM, 2011.
- [11] M. Berthou, "High temperature capability of high voltage 4H-SiC JBS", Materials Science Forum, 711, 2012, pp 124-128.