



HAL
open science

Imagerie 2D du champ électrique dans les diodes SiC-4H haute tension par la technique OBIC

Hassan Hamad, Pascal Bevilacqua, Dominique Planson, Christophe Raynaud,
Dominique Tournier, Bertrand Vergne, Mihai Lazar, Pierre Brosselard

► **To cite this version:**

Hassan Hamad, Pascal Bevilacqua, Dominique Planson, Christophe Raynaud, Dominique Tournier, et al.. Imagerie 2D du champ électrique dans les diodes SiC-4H haute tension par la technique OBIC. Symposium de Génie Electrique (SGE'14), Jul 2014, Cachan, France. hal-01065307

HAL Id: hal-01065307

<https://hal.science/hal-01065307>

Submitted on 18 Sep 2014

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.

Imagerie 2D du champ électrique dans les diodes SiC-4H haute tension par la technique OBIC

H. Hamad¹, P. Bevilacqua¹, D. Planson¹, C. Raynaud¹, D. Tournier¹, B. Vergne², M. Lazar¹, P. Brosseard¹

¹ Laboratoire Ampère – INSA de Lyon, Bât. De Vinci, 21 Avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne CEDEX, France

² Institut Franco-Allemand de Saint-Louis, 5 Rue du Général Cassagnou, 68300 SAINT-LOUIS, France

RESUME—L'usage des semi-conducteurs à large bande interdite est en train de se répandre, notamment pour la réalisation de composants à haute tension. Cependant, certains composants montrent des claquages pour des tensions inférieures aux tensions théoriques prévues. Ces claquages prématurés sont en général liés à l'imperfection des protections périphériques des jonctions, dont le rôle est de réduire les pics de champ en bordure du composant. Il est donc important "d'observer" le champ électrique en périphérie du composant afin de détecter les faiblesses de protection. Ce papier présente une imagerie 2D du champ électrique par la technique OBIC (Optical Beam Induced Current). Des cartographies 2D ont été réalisées sur des diodes protégées par une JTE (Junction Termination Extension) montrant une image du champ électrique aux périphéries et aux courbures des diodes. D'autres mesures ont été faites sur des diodes ZENER avec protection MESA munies d'une fenêtre optique.

Mots-clés—SiC-4H, Caractérisation des composants, Champ électrique, OBIC, Absorption photonique.

1. Introduction

Les matériaux semi-conducteurs à large bande interdite ou matériaux grand gap (Wide BandGap : WBG), tels que le SiC-4H, sont étudiés pour la conception de composants de puissance. Grâce à leur champ électrique critique élevé, les composants de puissance réalisés avec les WBG peuvent fonctionner pour des tensions plus élevées que le silicium [1]. Leur conductivité thermique élevée leur permet d'être utilisés dans le domaine des applications à haute température [2]-[3]. Les composants de puissance réalisés avec le WBG sont également performants lorsqu'ils fonctionnent à haute fréquence [4].

Toutefois, des études supplémentaires sont encore indispensables pour augmenter le calibre en tension des architectures de composants. Les composants à base de WBG sont soumis à différentes caractérisations dont celles qui ont recours à un faisceau optique telles que l'OBIC [5]. Cette dernière est utilisée pour la détermination de la durée de vie des porteurs minoritaires [6], et également pour la détermination des coefficients d'ionisation du matériau [7]. Ces deux propriétés sont indispensables pour la détermination du champ électrique critique ainsi que les temps de commutation des composants. La technique OBIC peut être également utilisée pour « visualiser » une image du champ électrique dans les composants de puissance. Elle consiste à générer des paires de porteurs libres en

éclairant la structure cristalline avec un faisceau laser de longueur d'onde convenable. Actuellement, la plupart des résultats publiés sur l'OBIC sont basés sur l'absorption mono-photonique où l'énergie du photon E_ϕ est suffisamment élevée devant la bande interdite E_G du semi-conducteur étudiée. M. Goepfert-Mayer fut la première à étudier en 1931 le principe de l'absorption bi-photonique. L'OBIC bi-photonique a été exploité pour l'analyse de défaillance des circuits intégrés [8]. Des mesures récentes ont montré la génération bi-photonique dans le SiC-4H [9].

Dans cet article, on montre une cartographie 2D du champ électrique dans la diode, surtout dans les zones à fort champ électrique. Une détection des défauts sera signalée par un fort champ électrique et par suite un probable claquage localisé à proximité des défauts en périphérie dans la zone de charge d'espace (ZCE). Cette technique permet d'étudier l'efficacité de la protection périphérique des jonctions P/N. Deux architectures de protection seront étudiées : la protection par JTE (Junction Termination Extension) et la protection par gravure MESA.

2. Principe de l'OBIC

En éclairant un semi-conducteur avec un laser de longueur d'onde appropriée, on peut générer des paires électron-trou. C'est la génération photonique. En présence d'un champ électrique, qui va dissocier ces paires électron-trou, on peut mesurer le courant électrique aux bornes du composant. En l'absence de fort champ électrique, ces paires de porteurs vont se recombiner avant d'atteindre les bornes du composant et ne donnent donc pas naissance à un courant.

Pour visualiser ce phénomène, on se réfère maintenant au schéma de la diode P+/N/N+ de la Fig. 1. Une fois polarisée en inverse, la ZCE s'étend principalement dans la zone la moins dopée qui est de type N. Lorsqu'un faisceau laser éclaire perpendiculairement la jonction, des paires électron-trou seront générées. Les porteurs créés à l'extérieur de la ZCE, où le champ électrique est négligeable, se recombinent et aucun courant ne sera détecté. Les porteurs générés dans la ZCE sont soumis à un champ électrique et par la suite, ils acquièrent de l'énergie cinétique, ils sont accélérés et atteignent l'extrémité de la ZCE. On peut alors mesurer un courant dit « OBIC » (Optical Beam Induced Current). Si la distance entre les porteurs générés et la ZCE est inférieure à leur longueur de diffusion, ils peuvent atteindre son extrémité et par la suite, un courant OBIC pourra

être mesuré. Pour des tensions de polarisation inverses élevées, le champ électrique dans la ZCE devient important et il est proche du champ électrique critique du semi-conducteur. L'énergie cinétique acquise par les porteurs devient importante. Ils peuvent alors entraîner la génération d'autres porteurs par collision. Ces nouveaux porteurs peuvent à leur tour entraîner une nouvelle génération. Cela signifie que le courant OBIC dépend fortement du champ électrique : la technique OBIC présente alors une imagerie du champ électrique dans le composant.

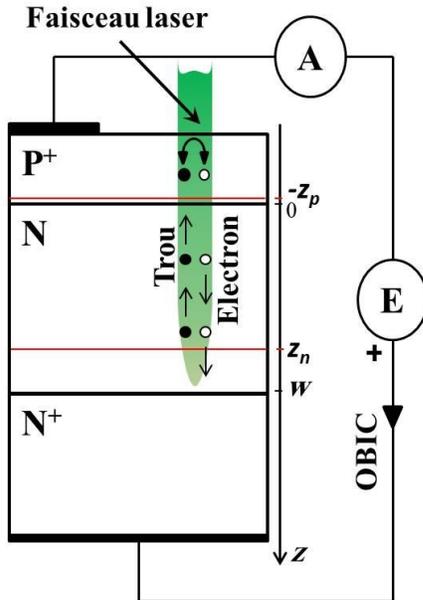


Fig. 1 : Schéma de principe de l'OBIC.

Puisqu'il s'agit d'un faisceau optique, alors l'énergie photonique (ou la longueur d'onde) utilisée est le paramètre critique. La génération photonique s'appuie sur l'absorption mono-photonique : dans ce cas, l'énergie photonique E_ϕ est suffisamment élevée devant la bande interdite du semi-conducteur E_G , et un seul photon est capable de créer une paire de porteurs. Si $E_\phi \ll E_G$, l'absorption mono-photonique devient impossible et l'absorption bi-photonique peut avoir lieu si le flux de photons est suffisamment élevé.

Dans le cas d'absorption mono-photonique, l'absorption α est reliée à l'intensité I du faisceau incident pour une émergence du faisceau suivant l'axe z par la relation linéaire de l'équation 1. Dans la génération bi-photonique, l'absorption β suivant la direction z devient quadratique en fonction de la puissance du faisceau incident (Equation 2).

$$\frac{dI}{dz} = \alpha I \quad \text{Equation 1}$$

$$\frac{dI}{dz} = \beta I^2 \quad \text{Equation 2}$$

Dans cet article, on étudie la distribution de champ électrique à la surface de la diode en adoptant l'absorption bi-photonique. Le faisceau incident est absorbé au point focal et pour des

hauteurs qui y sont proches. En fait, puisque l'absorption dépend du carré de l'intensité incidente, il faut alors que celle-ci soit suffisamment élevée, ce qui est le cas uniquement au voisinage du point focal et pour un diamètre très petit tout autour du foyer. On dit alors que l'absorption bi-photonique est ponctuelle.

3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le laser utilisé est un laser vert pulsé de fréquence de répétition 20 kHz. La longueur d'onde de la lumière incidente est de 532 nm et la durée de l'impulsion est de l'ordre de 1 ns. La puissance moyenne incidente est réglable et elle peut atteindre 100 mW, soit une énergie de 5 μ J par impulsion. Deux miroirs semi-réfléchissants sont utilisés pour « guider » le faisceau laser vers une lentille convergente pour focaliser l'énergie lumineuse au foyer de la lentille. Le faisceau final qui éclaire l'échantillon sous test est vertical et on peut changer la position du spot et sa hauteur en déplaçant les miroirs et la lentille. Le banc optique est contrôlé avec des moteurs piézo-électriques pilotés par Lab-View. Le pas de déplacement minimal des moteurs est de 1 μ m. Le faisceau laser balaie le composant sous test. Ce dernier est polarisé en inverse avec la SMU (Source Measurement Unit) Keithley 237 capable de fournir des tensions jusqu'à 1300 V et pouvant mesurer des courants de l'ordre du pA. Les mesures sont enregistrées pour chaque position du faisceau et pour plusieurs tensions. Le contact avec l'anode est pris à l'aide d'une pointe, et la cathode, qui est la face arrière des composants, est posée sur un support métallique relié à l'autre borne de la SMU. Un schéma descriptif du banc expérimental est montré dans la Fig. 2. Lors des premières mesures, on a remarqué que le faisceau laser cause une rayure sur la surface des composants et dès que le faisceau touche le métal, la diode est détruite, et elle devient passante dans les deux sens. Pour éviter ce problème, le faisceau est défocalisé de façon à ne pas détruire l'échantillon.

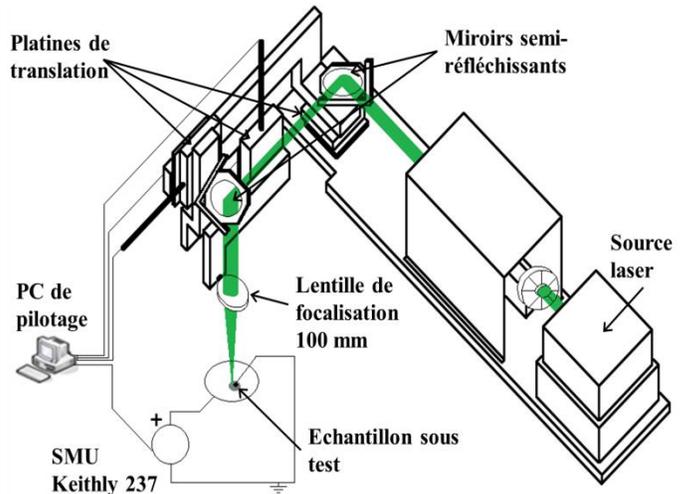


Fig. 2 : Schéma descriptif du banc expérimental OBIC.

Les échantillons étudiés sont des diodes polarisées en inverse avec deux types de protection. La première est une diode d'avalanche circulaire de tenue en tension de 59 V fabriquée à l'institut Franco-Allemand de Saint-Louis (ISL). Ce sont des

diodes circulaires munies d'une protection MESA (Fig. 3a). Une fenêtre optique est réalisée par la technique SIMS pour faire pénétrer le faisceau optique dans la zone à champ électrique élevé [10]. Pour ces diodes les mesures sont réalisées sur une partie de la surface contenant le bord de la diode et la fenêtre optique. La comparaison du courant OBIC au centre et au bord de la diode nous permet de voir l'efficacité de la protection utilisée. La deuxième structure étudiée est une diode carrée P⁺/N/N⁺ avec protection JTE (Fig. 3b) et sa tenue en tension est de l'ordre de 800V. Les mesures sont réalisées sur le quart de la diode pour visualiser l'effet de la protection surtout au niveau de la courbure de la diode.

Dans toutes nos mesures, la puissance du laser est fixée à 41.3 mW et une défocalisation de 300 μm ; soit un faisceau d'environ 20 μm de diamètre qui aborde la diode. D'où la densité de puissance moyenne de faisceau optique qui tape sur la diode est de 3.29 kW/cm² et la densité de puissance instantanée atteint 1.64×10⁸ W/cm².

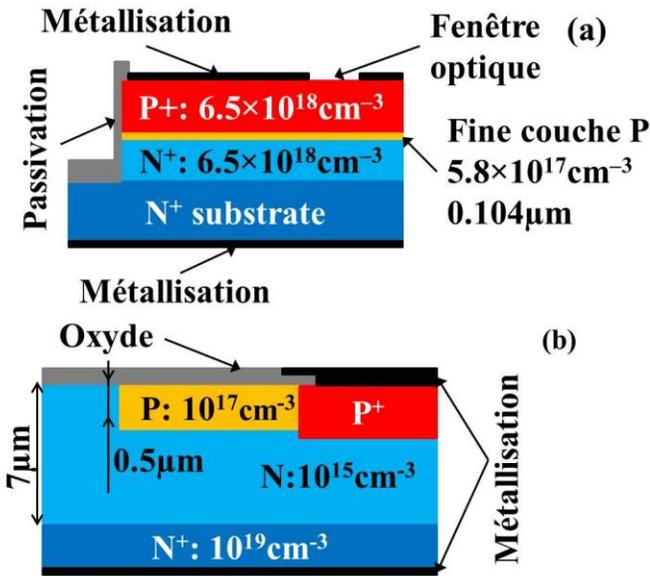


Fig. 3 : Vue partielle en coupe des diodes de test, (a) Diode d'avalanche, (b) Diode P⁺/N/N⁺.

4. SIMULATIONs OBIC

Des simulations de type éléments finis sont réalisées avec le logiciel SENTAURUS TCAD. Un faisceau optique balaie la surface de la diode munie d'une protection JTE montrée à la Fig. 4. La diode elle-même est soumise à une tension inverse et le courant OBIC induit est simulé en fonction de la position du faisceau pour plusieurs valeurs de la tension inverse. La protection par JTE n'est pas optimisée dans la simulation : ce qui permet d'avoir des pics de champ et par suite un courant OBIC qui ne soit pas homogène. La plaque de champ n'est pas prise en compte dans la simulation, ce qui permet au faisceau d'aborder le point de recouvrement de la JTE et de la zone fortement dopée. Les paramètres du faisceau sont ajustables : on peut faire varier la longueur d'onde, la densité de puissance et l'orientation et les dimensions du faisceau. Ceux-ci sont réglés

pour se mettre dans des conditions proches des conditions expérimentales [10].

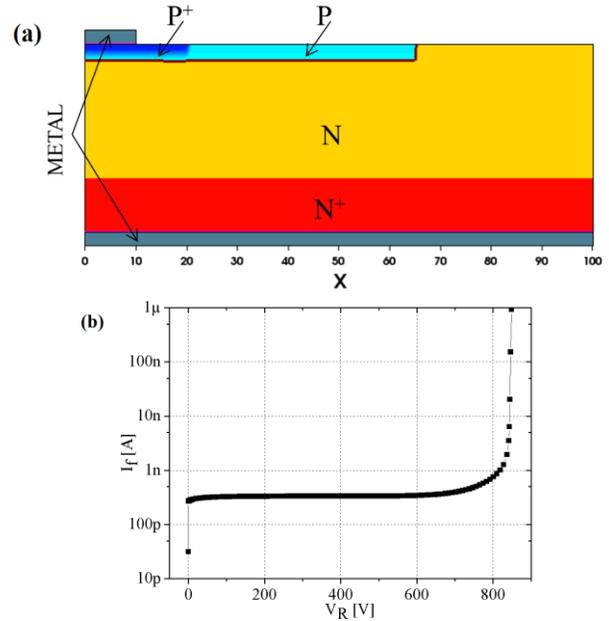


Fig. 4 : Schéma de la structure simulée (a) et simulation du courant de fuite en fonction de la tension (b).

La Fig. 5 montre la variation de l'OBIC simulé en fonction de la position du faisceau pour des tensions inverses variant entre 0 et 800 V. Les simulations montrent un fort courant OBIC lorsqu'on éclaire la JTE et la zone de recouvrement de la JTE et de l'émetteur, il est nul lorsque le faisceau tombe sur le métal (zone réfléchissante) et à l'extrémité de la diode là où le champ électrique est supposé être nul. On remarque encore que le courant OBIC n'évolue pas trop pour des faibles tensions ($V_R < 600$ V). Pour des tensions élevées le courant OBIC subit une forte variation en fonction de la tension inverse ($V_R > 600$ V).

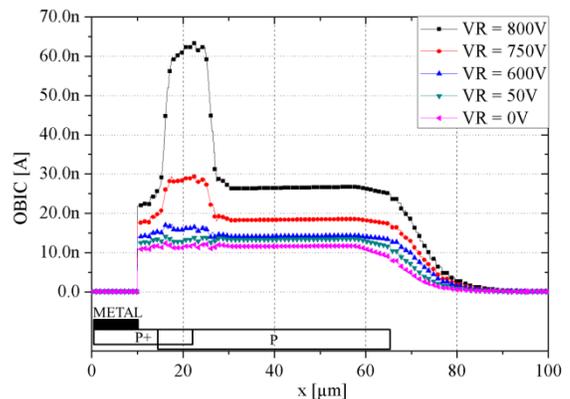


Fig. 5 : Simulations OBIC en fonction de la position du faisceau pour plusieurs tensions inverses (0, 50, 600, 750 et 800 V).

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

La Fig. 6 montre les vues de dessus de la diode avalanche et de la diode P⁺/N/N⁺. Les parties des diodes en lignes continues

sont celles qui sont balayées par le faisceau optique. En fait, les mesures sont relativement longues, ce qui impose une contrainte pour ne pas balayer toute la surface du composant.

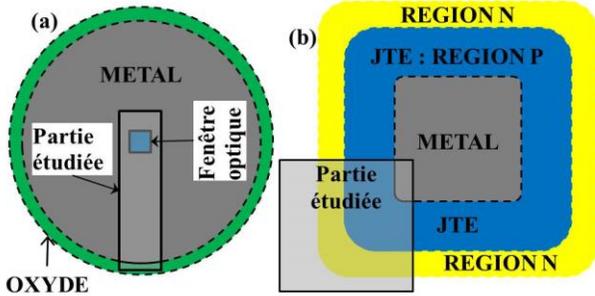


Fig. 6 : Vue du dessus des diodes de test et des zones étudiées. (a) diode avalanche et (b) diode P+/N/N+.

Les résultats de la cartographie 2D de la diode avalanche sont montrés à la Fig. 7. Un fort courant OBIC est mesuré lorsqu'on éclaire la fenêtre optique. Un courant OBIC moins fort est mesuré lorsque le faisceau aborde le contour de la diode, le courant est nul ailleurs. Un faible courant OBIC apparaît le long d'une ligne verticale et est dû à une ancienne rayure causée par le laser mais qui n'a pas détruit la diode. Effectivement, le faisceau n'était pas suffisamment défocalisé. Pour toutes les mesures réalisées, le signal OBIC est le plus fort à l'intérieur de la fenêtre optique. Cela signifie que le champ électrique est plus fort au centre de la diode qu'à son extrémité, même pour des tensions proches de la tension d'avalanche. Cela indique que la protection adoptée est efficace et que le claquage, lorsqu'il a lieu, arrive pour des tensions très proches de la tension de claquage global. On remarque encore, pour ces cartographies, que le relevé du courant OBIC dans la fenêtre n'évolue pas trop pour des faibles tensions. Cependant, à 50 et 55V, les valeurs de l'OBIC subissent une augmentation brusque par comparaison à une mesure réalisée au même point pour des tensions plus faibles. Ce résultat est comparable avec les résultats de la simulation déjà montrée : pour des champs électriques élevés, la génération d'une paire des porteurs entraîne une chaîne de générations et par suite une augmentation du courant mesuré.

La Fig. 8 montre des cartographies OBIC pour une diode P+/N/N+. A 0 V, le courant OBIC décroît clairement lorsque le faisceau optique balaie la diode de la JTE vers son extrémité. Cela est dû au fait que la ZCE n'est pas étendue sur toute la JTE et que le champ électrique est très faible. Pour des tensions variant entre 50 et 700 V, le courant OBIC est presque constant lorsqu'on éclaire la JTE. Le signal OBIC est nul ailleurs. Le courant OBIC n'évolue pas trop en fonction de la tension pour une position fixée de la JTE. Pour une tension de 750 V, le signal OBIC est presque constant dans la JTE, mais il augmente brusquement à la limite JTE/METAL. Cette augmentation signifie que le champ électrique devient plus important en ce point, et que la multiplication a eu lieu. Cela signifie qu'on commence à atteindre les limites de la tension de claquage de la diode. Cette action apparaît clairement à 800V où un très fort courant OBIC ($\sim 10 \mu A$) est signalé tout autour de la métallisation.

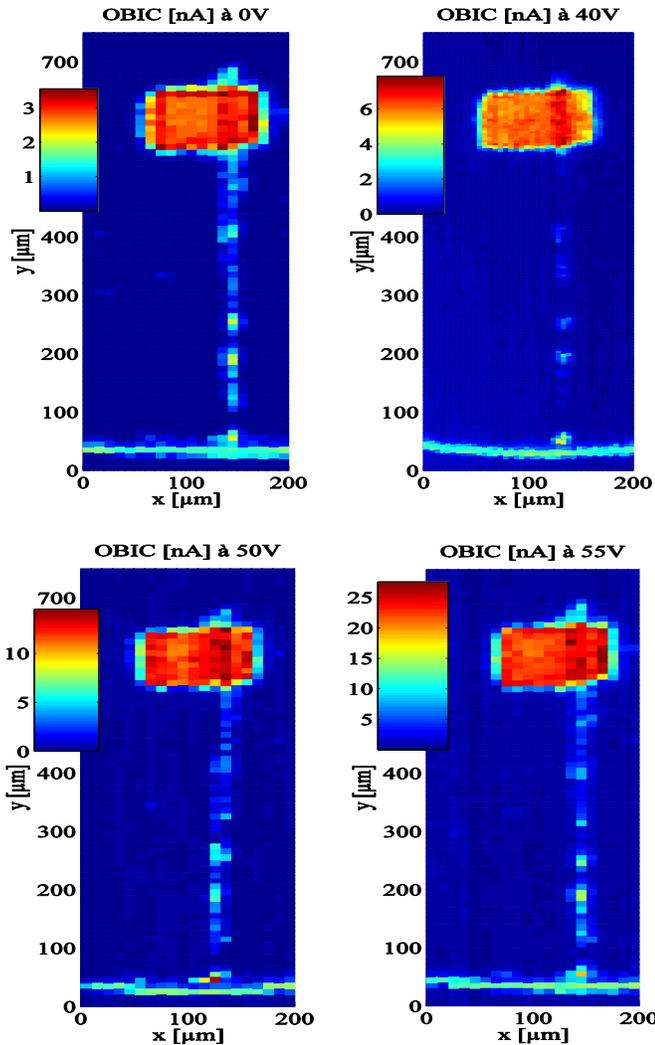


Fig. 7 : Cartographie OBIC 2D d'une diode d'avalanche sous plusieurs tensions inverses (0, 40, 50 et 55 V).

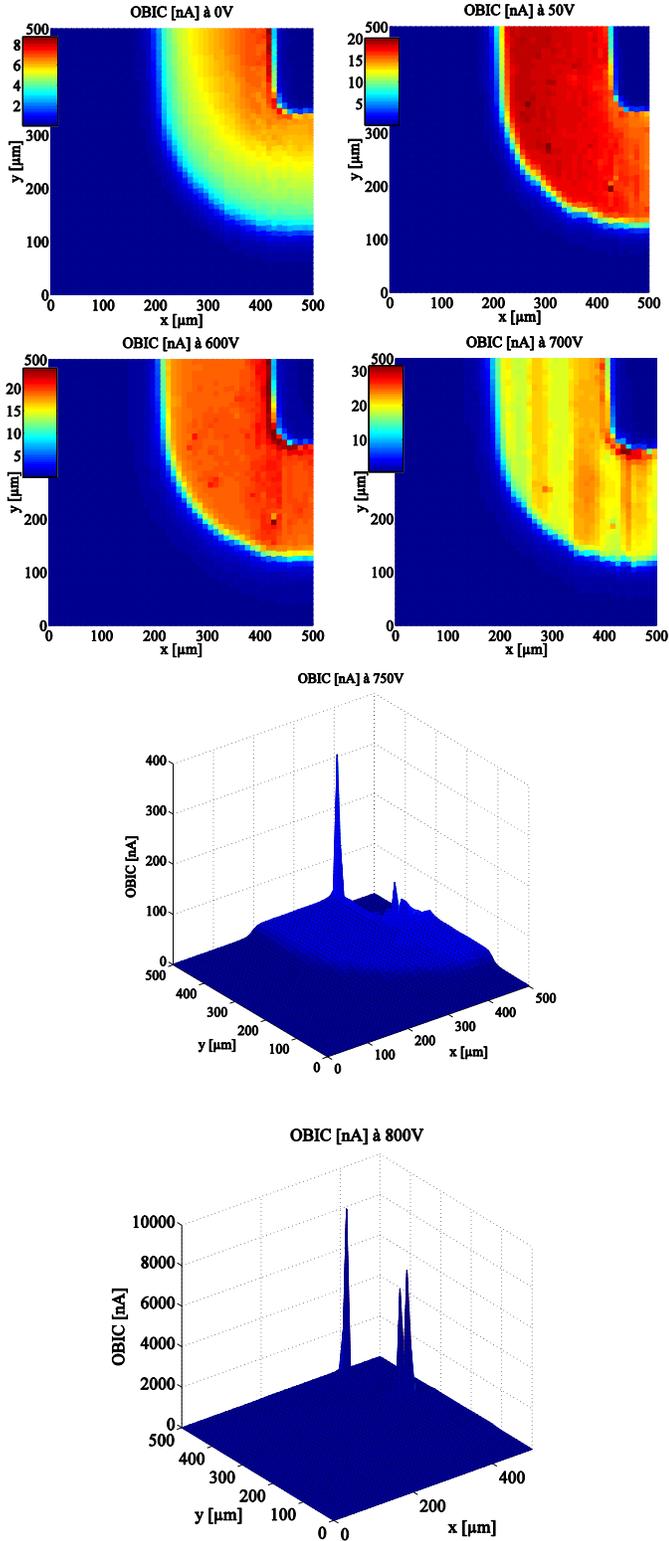


Fig. 8 : Cartographie OBIC 2D d'une partie d'une diode $P^+/N/N^+$ sous plusieurs tensions inverses (0, 50, 600, 700, 750 et 800 V).

D'autres mesures OBIC sont réalisées sur une diode de même type mais ayant une tenue en tension qui ne dépasse pas les 300 V. Les mesures à 50 et 100 V montrent de façon reproductible un point sur la courbure de la JTE pour lequel le courant OBIC atteint une valeur très importante par rapport aux autres points de mesures (Fig. 9). Cela veut dire que le champ électrique en ce point est plus élevé qu'à la surface de la diode. Cela signifie qu'un défaut structural existe en ce point critique de la diode. La protection périphérique qui a pour but d'améliorer la tenue en tension de la diode est fortement critique à la courbure de la diode et un tel défaut diminue fortement la tenue en tension de la diode. Cette méthode montre son efficacité à détecter les défauts dans l'épitaxie et dans la couche implantée non couverte par le métal même à des tensions relativement basses.

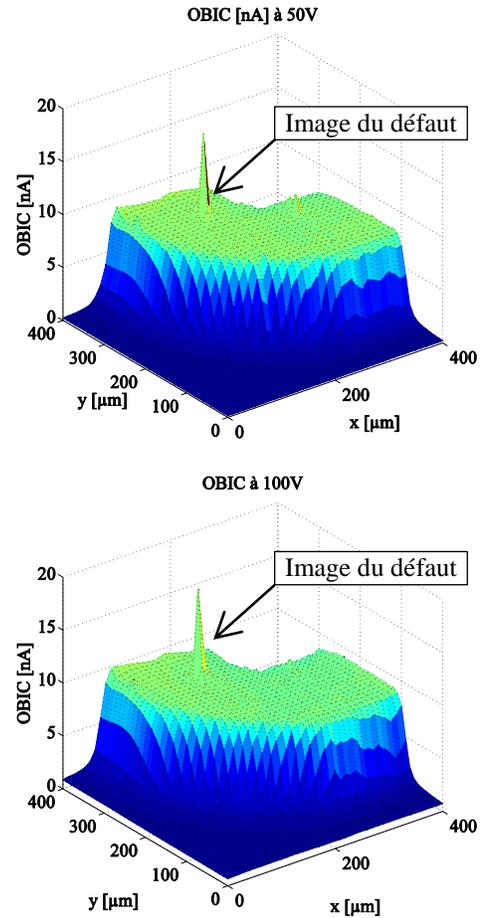


Fig. 9 : Cartographie OBIC 2D d'une partie d'une diode ayant une tenue en tension faible.

6. Conclusion

Dans cet article, on a montré des cartographies OBIC 2D sur deux types de diodes bipolaires avec deux protections différentes. Pour les diodes basses tensions, on a pu voir qu'une simple gravure MESA sans couche de JTE est suffisante pour aboutir à une bonne distribution du champ électrique. On a montré encore que la protection JTE est importante pour éviter

le claquage local des composants. La méthode utilisée permet d'obtenir une « image » du champ électrique à la surface du composant. Ce dernier est indispensable pour prévoir les performances d'une jonction à l'état bloqué et par suite la tension de claquage de la diode. Ce papier montre en même temps l'efficacité du principe de la génération multiphotonique. On peut remarquer que les mesures sont ponctuelles parce que le faisceau vert n'est « actif » que sur un petit diamètre tout autour de son axe. Mais pour la longueur de 532 nm, il faut éviter de focaliser sur l'échantillon sous test pour ne pas le détruire.

7. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le projet TRACE pour son support financier des travaux expérimentaux.

8. References

- [1] Sei-Hyung Ryu, Lin Cheng, Sarit Dhar, Craig Capell, Charlotte Jonas, Jack Clayton, Matt Donofrio, Michael O'Loughlin, Al Burk, Anant Agarwal, John Palmour, « Development of 15 kV 4H-SiC IGBTs », *Materials Science Forum*, vols. 717-720, p. 1135, 2012.
- [2] J.B. Casady, R.W. Johnson, « Status of silicon carbide (SiC) as a wide bandgap semiconductor for high temperature applications: a review », *Solid State Electronics*, vol. 39, No 10, p. 1409, 1996
- [3] Hyung Seok Lee, Martin Domeij, Erik Danielson, Carl Mikael Zetterling, Mikael Östling, « Electrical Characteristics of 4H-SiC BJTs at Elevated Temperatures », *Materials Science Forum*, vols. 483-485, p. 897, 2005.
- [4] Niclas Egebjork, Hebert Zirath, Peder Bergamn, Bjorn Magnusson, Niklas Rorsman, « Optimization of SiC MESFET for high power and high frequency applications », *Materials Science Forum*, vols. 670-680, p. 629, 2011.
- [5] Christophe Raynaud, Shu-Rui Wang, Dominique Planson, Mihai Lazar, Jean-Pierre Chante, « OBIC analysis for 1.3 kV 6H-SiC p+n planar bipolar diodes protected by Junction Termination Extension », *Diamond & Related Materials*, vol. 13, p. 1697, 2004.
- [6] T. Flohr, R. Helbig, « Determination of minority-carrier lifetime and surface recombination velocity by optical-beam-induced-current measurements at different light wavelengths », *Journal of Applied physics*, vol. 66, no. 7, p. 3060, 1989.
- [7] Duy Minh Nguyen, Christophe Raynaud, Nicolas Dheilly, Mihai Lazar, Dominique Tournier, Pierre Brosselard, Dominique Planson, « Experimental determination of impact ionization coefficients in 4H-SiC », *Diamond and Related Materials*, vol. 20, issue 3, p. 395, 2011.
- [8] C. Xu, W. Denk, « Two-Photon Optical Beam Induced Current Imaging through the Backside of Integrated Circuits », *Applied Physics Letters*, vol. 71, no. 18, p. 2578, 1997.
- [9] Hassan Hamad, Christophe Raynaud, Pascal Bevilacqua, Dominique Tournier, Bertrand Vergne, Dominique Planson, « Optical Beam Induced Current measurements based on two photon absorption process in 4H-SiC bipolar diodes », *Applied Physics Letter*, vol. 104, p. 082102, 2014.
- [10] Mihai Lazar, François Jomard, Duy-Minh Nguyen, Christophe Raynaud, Gontran Pâques, Sigo Scharholz, Dominique Tournier, Dominique Planson, « SIMS Analyses Applied to Open an Optical Window in 4H-SiC Devices for Electro-Optical Measurements », *Materials Science Forum*, vols. 717-720, 885 (2012).
- [11] « Sentaurus Device User Guide Version F-2011 », <http://151.100.120.244/personale/palma/elettronicaIPalma/Sentaurus-sdevice Ug.pdf>.