

Optimisation de la terminaison d'une diode Schottky diamant à haute tension

Houssam ARBESS^{1,2}, Karine ISOIRD^{1,3}, Dominique PLANSON⁴, Hong-Viet LUONG⁴

¹LAAS - CNRS, 7 avenue du colonel Roche, F-31400 Toulouse, France

²Univ de Toulouse, LAAS, F-31400 Toulouse, France

³Univ de Toulouse, UPS, LAAS, F-31400 Toulouse, France

⁴Université de Lyon, CNRS, Laboratoire AMPERE, UMR 5005, INSA de Lyon, F-69621 Villeurbanne, France

RESUME – Une nouvelle architecture de terminaison est proposée pour les diodes Schottky diamant. En utilisant des simulations par éléments finis avec les outils Sentaurus TCAD (Technology Computer-Aided Design), nous avons étudié l'impact de simples modifications de l'architecture des plaques de champ sur la tension de claquage. La tenue en tension augmente, mais ces modifications ne permettent pas de réduire la valeur du champ électrique au bord de la plaque de champ dans le diélectrique. Plusieurs topologies avec des formes originales ont été proposées pour résoudre ce problème. Les simulations paramétriques ont été utilisées pour optimiser les paramètres technologiques de ces structures de terminaison en vue de réduire la valeur crête du champ électrique en bord de terminaison, tout en maintenant la tension de claquage élevée. La solution retenue a permis de réduire le champ électrique maximal de 57 à 13 MV/cm.

Mots-clés – Diamant, Simulation TCAD, Diode Schottky, Plaque de champ.

1. INTRODUCTION

Grâce à ses propriétés uniques comme son champ critique élevé entre 5 et 20 MV/cm, sa grande mobilité des porteurs de $2000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ et sa conductivité thermique la plus élevée (20 W/K.cm) parmi tous les matériaux semiconducteur, le diamant est très intéressant pour la réalisation de composants de puissance et notamment pour les applications haute tension et haute température. L'étude est menée dans le cadre du projet DIAMONIX2. Ce projet regroupe de nombreux laboratoires français impliqués dans la recherche sur le diamant, afin de mettre en place une filière diamant pour l'électronique de puissance allant de la croissance des couches jusqu'à la réalisation et la mise en boîtier de composants en diamant. Un des objectifs de ce projet est de concevoir et réaliser une diode Schottky 1700V fonctionnant à 600K.

Comme tous les composants de puissance, la diode Schottky a besoin d'une protection périphérique afin de rendre la distribution du champ électrique la plus homogène possible dans le semiconducteur et éviter ainsi le claquage prématuré du composant. Plusieurs terminaisons de jonction sont communément employées pour les Schottky à semiconducteur large bande. Parmi les plus utilisées on trouve les anneaux de garde [1], [2], les plaques de champ [3], [4], et les JTE (Junction Termination Extension) [5].

Le dopage de type N n'est pas encore totalement maîtrisé pour le diamant et l'implantation ionique est encore un verrou technologique, seules les protections périphériques basées sur le principe des plaques de champs sont envisageables pour

l'instant. Cette étude est donc focalisée sur l'étude de nouvelles topologies de plaque de champ, venant compléter des travaux présentés très récemment [6].

Le champ critique de diamant est très élevé ce qui impose des contraintes sévères sur la périphérie du composant, puisque le champ de rupture des matériaux diélectriques communément utilisés pour réaliser les plaques de champ est inférieur ou égal à celui du diamant. Le but de cette étude est donc de proposer de nouvelles architectures de plaques de champ qui permettent d'une part de réduire la valeur du champ électrique maximal dans le diamant, améliorant ainsi la tenue en tension du composant et d'autre part de minimiser la valeur du pic de champ dans le diélectrique.

Plusieurs architectures et matériaux diélectriques ont été étudiés dans cet article.

2. DISPOSITIF ETUDIE ET IDEE PROPOSEE

La littérature fait état de nombreuses études [7]–[10] sur l'efficacité des plaques de champs comme protection périphérique de diodes Schottky. Ces publications décrivent les différentes formes et matériaux diélectriques utilisés pour réaliser ces terminaisons de jonction. Dans la plupart de ces travaux, l'efficacité de la plaque de champ n'est pas optimum puisqu'il existe un pic de champ électrique dans le semiconducteur, ce qui provoque un claquage prématuré du composant.

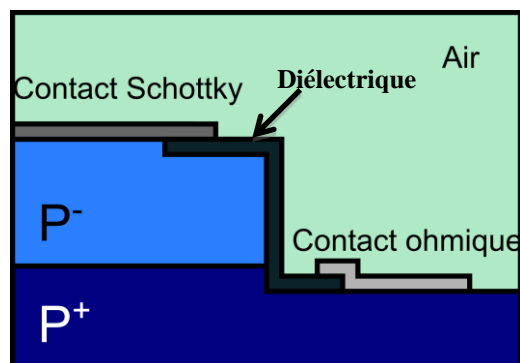


Fig.1: Nouvelle architecture de la plaque de champ

La structure de base étudiée dans ce travail est déjà détaillée dans une publication récente [6] dans laquelle une nouvelle architecture de la plaque de champ d'une diode Schottky a été proposée (Fig.1). Avec cette architecture la plaque de champ est coplanaire avec l'électrode, ce qui permet de minimiser le pic du champ électrique dans le diamant et de

répartir de manière plus homogène champ électrique dans le semiconducteur. Donc pour une épaisseur de diélectrique égale à $1,2 \mu\text{m}$ et une longueur de la plaque de champ égale à $10 \mu\text{m}$, l'efficacité de la plaque de champ est de 95% au lieu de 83% avec une architecture classique.

2.1. Difficultés technologiques

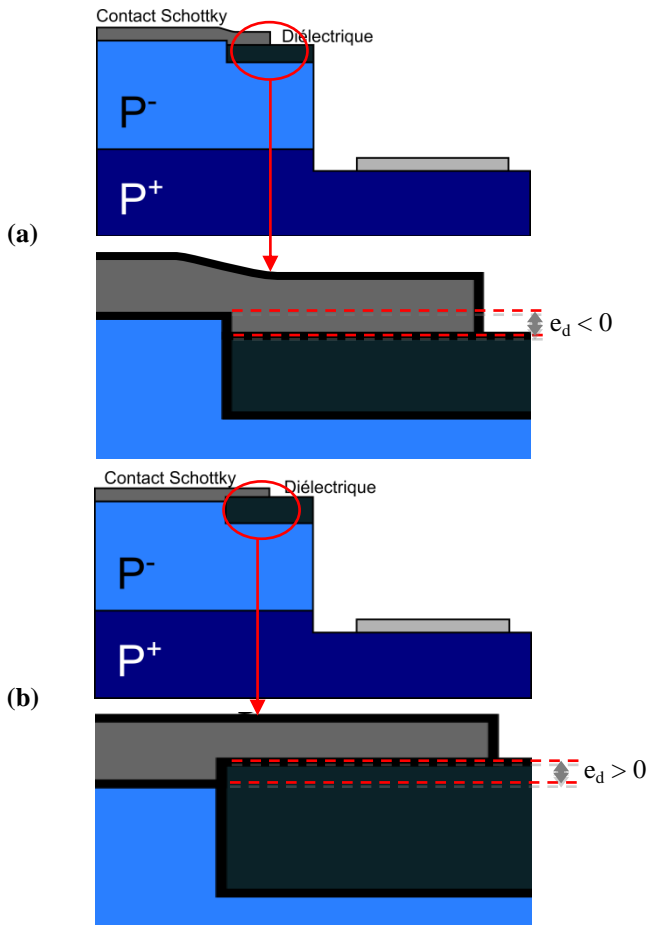


Fig.2: Difficultés technologiques attendues lors de la fabrication des diodes (a) Épaisseur de diélectrique inférieure à l'épaisseur souhaitée ($e_d < 0$), (b) épaisseur du diélectrique supérieure à l'épaisseur visée ($e_d > 0$).

Cette nouvelle architecture de la plaque de champ nécessite une gravure RIE de diamant avec l'épaisseur convenable, et un dépôt de diélectrique avant le dépôt de métal pour réaliser le contact Schottky (Fig.2). Bien que l'étape de dépôt de diélectrique soit maîtrisée, on peut s'attendre à ce que l'épaisseur du diélectrique déposée soit inférieure (Fig.2-a), ou supérieure (Fig.2-b) à celle visée.

Des simulations électriques ont été réalisées pour étudier la variation de l'efficacité de la plaque de champ en fonction de l'épaisseur du diélectrique déposée. La Fig.3 présente cette variation où l'efficacité diminue de 4% quand l'épaisseur de diélectrique augmente de 0 à $0,2 \mu\text{m}$. Cette diminution de l'efficacité s'explique par le renforcement du pic de champ électrique dans le semiconducteur. Bien que diminuée, l'efficacité de cette topologie de plaque de champ reste supérieure à celle d'une structure classique.

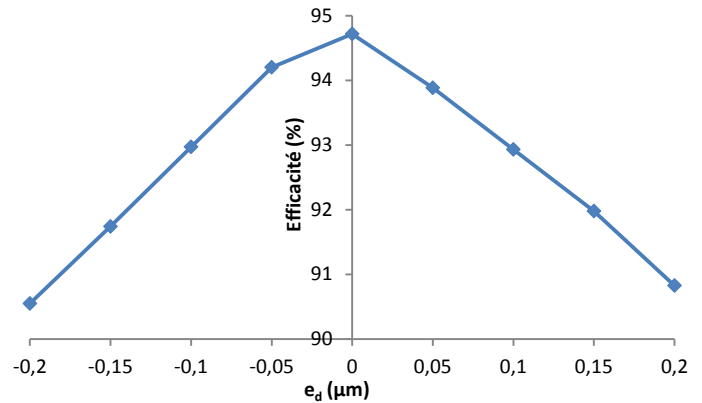


Fig.3: Variation de l'efficacité de la plaque de champ en fonction de e_d , les valeurs positives sont une surépaisseur et les valeurs négatives des retraits du diélectrique.

3. NOUVELLE ARCHITECTURE POUR UN CHAMP ELECTRIQUE MAXIMAL PLUS FAIBLE

Le champ électrique est maintenant presque homogène latéralement dans le diamant, mais sa valeur maximale dans le diélectrique atteint 48 MV/cm à 1700 V (Fig. 4) en utilisant l'oxyde de silicium comme diélectrique et en faisant un maillage très fin (10 nm distance entre deux nœuds) dans la zone du champ électrique maximal. Cette valeur reste presque égale sous la même tension (1700 V) en utilisant la plaque de champ classique.

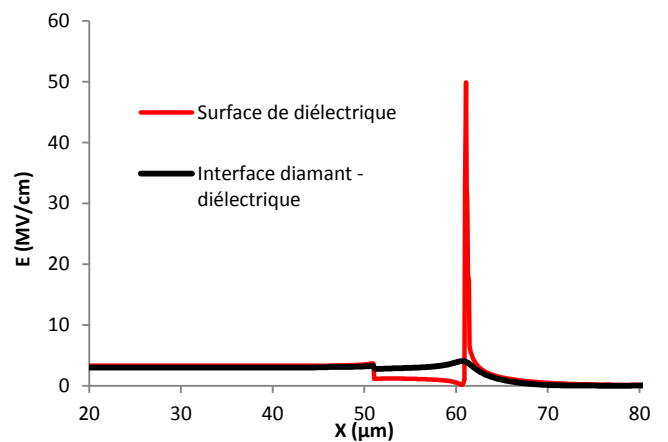


Fig. 4 : Distribution du champ électrique dans la structure optimisée

Comme le montre les caractéristiques I(V) expérimentales (Fig.5) de diodes Schottky avec plaques de champ sur Si_3N_4 précédemment réalisées au LAAS, la tenue en tension est de 450 V , largement inférieure au 1300 V obtenus pour la structure optimisée en simulation [11]. La valeur du champ électrique dans le diélectrique peut expliquer la défaillance d'une diode Schottky sous une tension plus faible que celle souhaitée. Pour améliorer l'efficacité de la plaque de champ et diminuer la valeur du champ électrique maximal, on peut envisager d'utiliser un diélectrique avec une constante diélectrique ϵ plus élevée, comme l'oxyde d'aluminium [12].

Comme le montre l'équipe de l'AIST [13] cette opération n'est pas suffisante et ne permet pas d'atteindre expérimentalement la tenue en tension souhaitée. La solution proposée est donc de changer la forme de la plaque de champ afin de partager le grand pic du champ électrique en plusieurs de valeur plus faible. Deux solutions ont déjà été proposées [6] (forme en piliers ou forme graduée de la plaque de champ) et permettent de diminuer le champ électrique dans le diélectrique jusqu'à 40 % c'est à dire 35 MV/cm.

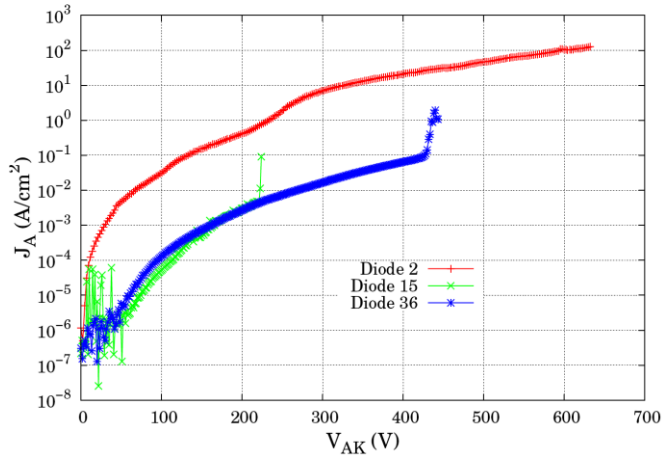


Fig.5: Caractéristiques I(V) expérimentales de diodes Schottky avec plaque de champ sur Si_3N_4 [11]

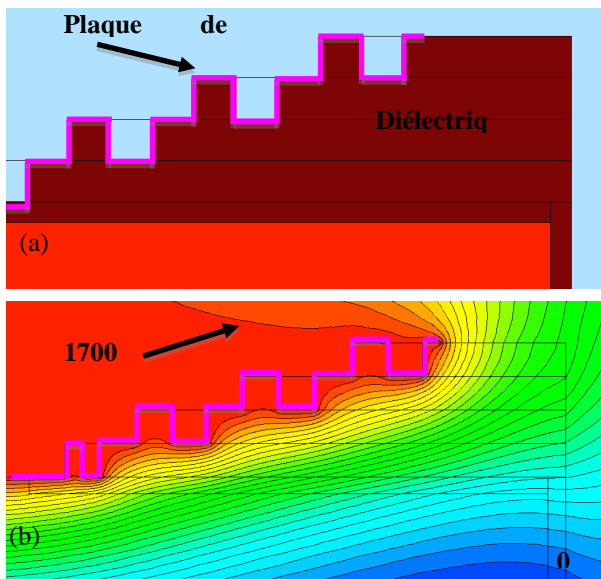


Fig. 6 : (a) Structure de forme mixte de la plaque de champ d'une diode Schottky (b) répartition des lignes équipotentielles à 1700 V dans la structure à forme mixte

Cette diminution n'est pas suffisante puisque le champ critique de l'oxyde de silicium idéal est de 10 MV/cm. Une nouvelle idée consiste à combiner les deux solutions précédemment proposées, cette nouvelle idée est appelée forme mixte de la plaque de champ (Fig. 6 -a). Le but de cette forme est d'augmenter au maximum le nombre de coins sur le chemin des équipotentielles (Fig. 6-b) sans augmenter le nombre d'étapes technologiques. Cette structure de

terminaison est simulée avec des graduations et des piliers de SiO_2 de 1,6 μm de haut, valeur optimum obtenue lors de l'étude des structures de terminaison avec des piliers ou gradués [6].

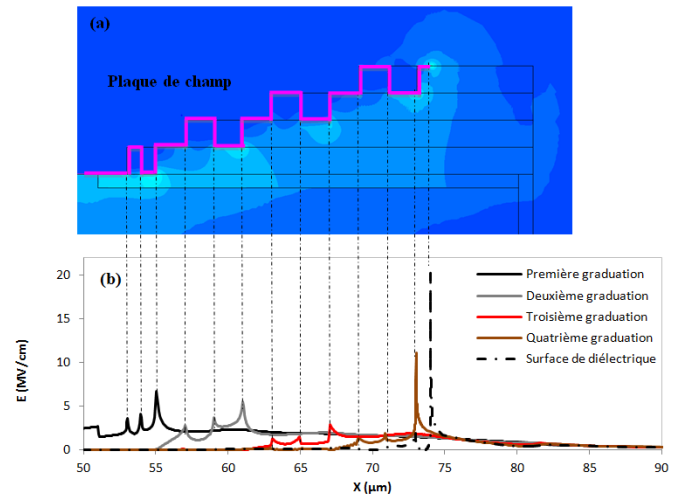


Fig. 7 : (a) répartition du champ électrique dans la structure de protection (b) vue en coupe du champ électrique suivant des axes horizontaux passant par chaque graduation et à la surface de l'oxyde.

La répartition du champ électrique à 1700 V est représentée Fig. 7-a. La vue en coupe du profil du champ électrique suivant les axes horizontaux passant par chaque graduation de la plaque de champ et à la surface de l'oxyde (Fig. 7-b), montre qu'il existe plusieurs pics de champ électrique, ce qui correspond aux nombres de coins sur le chemin des équipotentielles. Comme pour une structure de plaque de champ classique, le champ électrique maximal à 1700 V reste localisé à l'extrémité de la plaque de champ, mais diminue de 48 MV/cm pour une terminaison conventionnelle à 20,4 MV/cm pour cette structure mixte. L'utilisation de l'oxyde d'aluminium permet encore d'améliorer les performances de cette plaque de champ puisque le champ électrique maximal est seulement de 14,3 MV/cm (Notons que le champ critique de l'oxyde d'aluminium est de 8 MV/cm). Cette valeur pourra encore être réduite en utilisant un diélectrique dont la constante diélectrique ϵ est plus élevée

4. CONCLUSION

Dans cet article, en utilisant la simulation TCAD avec les outils Sentaurus, une nouvelle topologie de la plaque de champ d'une diode Schottky diamant a été étudiée. Nous avons montré que l'efficacité de cette topologie n'était que très peu affectée par la variation de l'épaisseur du diélectrique déposée, mais que le champ électrique au niveau du diélectrique ne pouvait pas être supporté par ce dernier. Pour pallier ce problème, une nouvelle solution a été proposée et discutée. Cette dernière est une combinaison de deux structures déjà étudiées et permet de diminuer le champ maximal de 60% par rapport à une structure classique, tout en maintenant une tenue en tension de 1700 V.

5. REMERCIEMENT

Ces travaux sont menés dans le cadre de la thématique « simulation, conception et réalisation de composants de puissance haute tension et haute température » du LIA (Laboratoire International Associé) WIDE-Lab (Wide band gap technologies for Integration of energy efficient Devices), dont les membres sont les laboratoires français LAAS et Ampère, et le CNM de Barcelone.

6. REFERENCES

- [1] S. K. Gupta, N. Pradhan, C. Shekhar, et J. Akhtar, « Design, Fabrication, and Characterization of Ni/4H-SiC (0001) Schottky Diodes Array Equipped With Field Plate and Floating Guard Ring Edge Termination Structures », *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 25, n° 4, p. 664-672, 2012.
- [2] K. Ueno, T. Urushidani, K. Hashimoto, et Y. Seki, « The guard-ring termination for the high-voltage SiC Schottky barrier diodes », *IEEE Electron Device Letters*, vol. 16, n° 7, p. 331-332, 1995.
- [3] K. Ikeda, H. Umezawa, N. Tatsumi, K. Ramanujam, et S. Shikata, « Fabrication of a field plate structure for diamond Schottky barrier diodes », *Diamond and Related Materials*, vol. 18, n° 2-3, p. 292-295, févr. 2009.
- [4] M. C. Tarplee, V. P. Madangarli, Q. Zhang, et T. S. Sudarshan, « Design rules for field plate edge termination in SiC Schottky diodes », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 48, n° 12, p. 2659-2664, 2001.
- [5] D. Alok et B. J. Baliga, « SiC device edge termination using finite area argon implantation », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 44, n° 6, p. 1013-1017, 1997.
- [6] H. Arbess, K. Isoird, et S. Hamady, « New termination architecture for 1700 V diamond Schottky diode », in *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013, p. 1-8.
- [7] M. Brezeanu, M. Avram, S. J. Rashid, G. A. J. Amaratunga, T. Butler, N. L. Rupesinghe, F. Udrea, A. Tajani, M. Dixon, D. J. Twitchen, A. Garraway, D. Chamund, P. Taylor, et G. Brezeanu, « Termination Structures for Diamond Schottky Barrier Diodes », in *IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, 2006. ISPSD 2006*, 2006, p. 1-4.
- [8] Q.-W. Song, Y.-M. Zhang, Y.-M. Zhang, et X.-Y. Tang, « Simulation study on 4H-SiC power devices with high-k dielectric FP terminations », *Diamond and Related Materials*, vol. 22, p. 42-47, févr. 2012.
- [9] H. Umezawa, M. Nagase, Y. Kato, et S. Shikata, « High temperature application of diamond power device », *Diamond and Related Materials*, vol. 24, p. 201-205, avr. 2012.
- [10] H. Umezawa, M. Nagase, Y. Kato, et S. Shikata, « Diamond Vertical Schottky Barrier Diode with Al₂O₃ Field Plate », *Materials Science Forum*, vol. 717-720, p. 1319-1321, mai 2012.
- [11] F. Thion, « Conception de protections périphériques applicables aux diodes Schottky réalisées sur diamant monocristallin », INSA de Lyon, 2012.
- [12] K. Ikeda, H. Umezawa, N. Tatsumi, K. Ramanujam, et S. Shikata, « Fabrication of a field plate structure for diamond Schottky barrier diodes », *Diamond and Related Materials*, vol. 18, n° 2-3, p. 292-295, févr. 2009.
- [13] H. Umezawa, Y. Kato, et S. Shikata, « 1 Ω On-Resistance Diamond Vertical-Schottky Barrier Diode Operated at 250°C », *Applied Physics Express*, vol. 6, n° 1, p. 011302, 2013.