HAL
open science

La diode Schottky en diamant : le présent et le futur

David Eon, Julien Pernot, Aboulaye Traoré, Nicolas Clément, Jean-Paul Rouger, Etienne Gheeraert

To cite this version:

David Eon, Julien Pernot, Aboulaye Traoré, Nicolas Clément, Jean-Paul Rouger, Etienne Gheeraert. La diode Schottky en diamant : le présent et le futur. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361578

HAL Id: hal-01361578

https://hal.science/hal-01361578

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.

La diode Schottky en diamant : le présent et le futur

David Eon[1,2], Julien Pernot[1,2,3], Aboulaye Traoré[4], Etienne Gheeraert[1,2], Nicolas Rouger[5,6]
[1]Univ. Grenoble Alpes, Institut Néel, F-38000 Grenoble, France
[2]CNRS, Institut Néel, F-38000 Grenoble, France
[3]Institut Universitaire de France, 103 Boulevard Saint-Michel, F-75005 Paris, France
[4]Advanced Power Electronics Research Center, AIST, Tsukuba, Japan
[5]Univ. Grenoble Alpes, G2ELab, F-38000 Grenoble, France
[6]CNRS, G2ELab, F-38000 Grenoble, France

RESUME –Des diodes Schottky en diamant avec une structure pseudo-verticales montrant une densité de courant de 10^3A/cm^2 (à 6V) avec un champ de claquage supérieur à 7.7MV/cm ont été réalisées. Ces diodes ont été obtenues par croissance homoépitaxiale du diamant avec le zirconium comme métal de contact Schottky. Ces résultats ont permis d'avoir le record mondial actuel du facteur de Baliga pour le diamant avec 244MV/cm^2. Ces travaux montrent que les potentialités du diamant ne sont pas uniquement théoriques. La maitrise actuelle des interfaces et de la croissance permettent d'imaginer des composants de puissance performant en poussant le diamant dans ses retranchements.

Mots-clés—Diamant, Semiconducteurs grands gap, Diode Schottky.

1. INTRODUCTION

Le diamant pour les composants hautes puissances est largement étudié compte tenu de ses exceptionnelles propriétés intrinsèques. Nous pouvons par exemples citer son champ de claquage supérieur à 10 MV/cm pour les dopages élevés, la mobilité importantes des porteurs (pour les trous 2000 cm^2.V^{-1}.s^{-1} et pour les électrons 1000 cm^2.V^{-1}.s^{-1}) pour les faibles dopages, et sa conductivité thermique de 22 W.m^{-1}.K^{-1}. La diode Schottky est actuellement le composant présentant les résultats les plus prometteurs [1] [2]. Pour ces composants l'objectif est toujours d'avoir le maximum de courant en régime direct et la meilleure tenue en tension en régime inverse. Les structures pseudo-verticales (avec une couche diamant métallique enterrée) ou verticale (avec un substrat fortement dopé) sont celles présentant les résistances séries les plus faibles. Toutefois, les tensions de claquage sont encore assez faibles. Au contraire les structures horizontales sont celles qui ont permis d'avoir les plus fortes tensions de claquage [3] [4].

2. REALISATION

Les diodes sont réalisées à partir de l'empilement sur un substrat diamant, d'une couche très fortement dopées (p+) ayant une conduction métallique et permettant d'avoir le contact ohmique de la diode, suivi d'une seconde couche faiblement dopée (p-) qui sera la zone active de la diode. Ces croissances sont obtenues au sein de réacteurs de croissance MPCVD (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition) dans des conditions permettant d'obtenir des couches de très bonnes qualités. La concentration de bore dans la couche active est de 5.10^{15} cm^{-3} et l'épaisseur de 1,3 µm. Apres différentes étapes de lithographie, gravure et dépôt métallique la structure pseudo-verticale présentée Fig. 1 est obtenue. Le contact ohmique est positionné sur les bords de l'échantillon tandis que le centre est dédié aux contacts Schottky. Une attention particulière a été prise sur le contrôle de l'interface Schottky avec un traitement ozone afin d'avoir une surface oxygénée avant de déposer le zirconium comme métal Schottky. Le choix de ce métal comme nous le montrerons a permis d'avoir une excellente stabilité de l'interface et a donné lieu au dépôt d'un brevet [5].

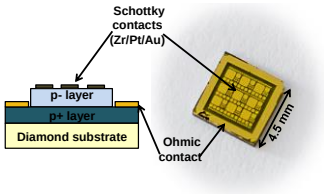


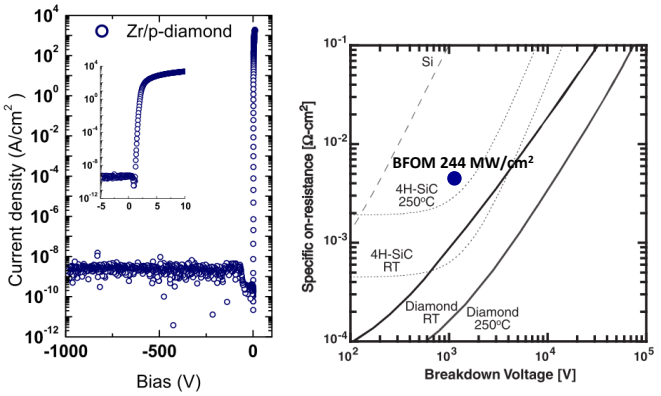
Fig.1 Représentation schématique montrant la section des diodes avec la photo d'un échantillon après microfabrication.

3. MESURES ELECTRIQUES

Les mesures électriques à température ambiante sont montrées sur la Fig. 2. Il apparait que les diodes Schottky avec le zirconium ont un excellent facteur de rectification, une forte densité de courant de 10^3A/cm^2 (à 6V). En régime directe, pour les faibles tensions, le courant est contrôlé par le mécanisme thermo-ionique classiquement observé dans les diodes Schottky. Pour les tensions plus fortes, il s'agit finalement de la résistance série intrinsèque de la couche diamant (p-) qui limite le courant. En régime inverse la tenue en tension est supérieure à 1000V et la densité de courant reste en dessous 10^{-8} A.cm^{-2} ce qui correspond à la limite de courant mesurable par nos appareils de mesure (10^{-12} A). Pour 1000V, la diode fonctionne en condition « punch-through » ce qui donne une assez bonne estimation du champ électrique maximale de 7.7 MV/cm dans la couche. Il est important de noter qu'aucune protection particulière, autre que la préparation de l'interface précédemment mentionnée, pour limiter les effets de bord sur les contacts et les points chauds du champ électrique n'ont été prise dans cette étude.

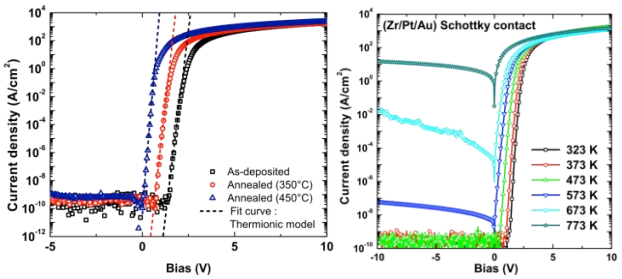
Ces résultats permettent de calculer la valeur de mérite de Baliga (= $V^2/(R_{on}S)$ avec V la tension inverse maximale et $R_{on}S$ la résistance spécifique en régime direct) à 244 MW/cm^2. Cette valeur est la plus grande actuellement reportée dans la littérature.

La stabilité thermique entre le zirconium et le diamant a aussi été étudiée. D'une part, deux recuits, à 350°C et 450°C ont été effectués et des mesures I-V à température ambiante ont été réalisées ensuite. Les résultats sur la figure 3a montrent une augmentation du courant avec la température de recuit à une tension donnée dans le régime direct. La valeur de la barrière Schottky en utilisant l'expression d'un courant thermo-ionique, est de 1 eV après un recuit à 450°C. Cette valeur est ensuite constante pour des recuits à plus hautes températures. Les caractéristiques de ces diodes à différentes températures montrent un comportement thermo-ionique en régime direct sans détérioration de l'interface (Fig 3b). En régime inverse une forte dépendance de courant de fuite avec la température est observée. Le mécanisme qui a été identifié et qui gouverne principalement ce courant est la combinaison des mécanismes d'activation thermique et de passage tunnel au travers de la barrière triangulaire à l'interface pour les forts potentiels. Ce résultat est concordant avec la faible barrière trouvée.



a) b)

Fig.2 a) Caractéristique courant-tension d'une diode Schottky avec le zirconium comme métal. Cette caractéristique montre une forte densité de courant dans le régime direct et une bonne tenue en tension dans le regime inverse. b) Graphique de Baliga comparant les limites du diamant et du SiC pour deux temperatures données par [6] avec le point correspond à cette étude.



a) b)

Fig.3 a) Caractéristiques courant-tension à température ambiante des diodes Schottky en fonction de la température de recuit de l'interface. b) caractérisitiques courant tension à différente température

Des mesures de reproductibilité ont aussi été faites. Sur différents échantillons avec différentes tailles de diode, des caractéristiques I-V systématiques ont données les résultats de la figure 4. Il apparait clairement que pour une taille de diode donnée, les caractéristiques se superposent. Cette figure montre aussi que le courant est naturellement dépendant de la taille du contact Schottky pour donner un maximum proche de 1A pour une surface carrée de 500 µm de côté.

4. Les possibilites envisageables des diodes

L'ensemble de ces résultats permettent d'envisager l'avenir pour les diodes en diamant dans l'électronique de puissance. La grande reproductibilité des résultats ainsi que forte densité de courant sont des facteurs encourageant pour la future intégration de ces composants au sein de vrai convertisseur de puissance. Il faut toutefois travailler en étroite collaboration entre la croissance et les besoins en termes de performance. Il est par exemple important de connaitre l'optimum d'épaisseur et de dopage permettant d'avoir la plus forte tension de claquage, tout en ayant la plus faible résistance de la couche p-. Un des résultats de ces calculs est donné sur la figure 5. Dans cette approche la tension de claquage a été calculée en utilisant l'intégrale d'ionisation et les paramètres de la ref [7].

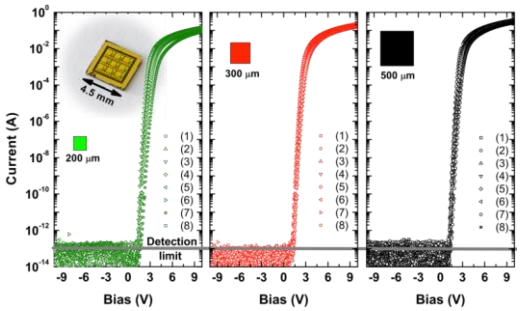


Fig.4 Caractéristiques I-V pour différente taille de diode montrant la grande reproductibilité des résultats.

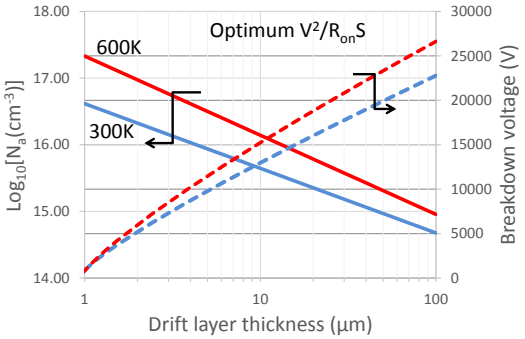


Fig.5 Optimum de dopage pour une épaisseur donnée de la couche active et tension de claquage estimée.

5. Conclusions

Ce travail montre que le diamant progresse. Il reste certes des développements à faire mais les performances actuelles permettent de vérifier les simulations, calculs qui permettent d'imaginer et d'optimiser les prochains composants. Ce cycle désormais vertueux donnera les composants de puissance de demain en diamant.

6. References

[1] A. Traore; P. Muret, A. Fiori, D.Eon, E. Gheeraert; J. Pernot "Zr/oxidized diamond interface for high power Schottky diodes", *Appl. Phys. Lett.* **104**, 052105 (2014).

[2] H. Umezawa, Y. Kato and S. Shikata, "1Ω On-resistance diamond vertical-Schottky barrier diode operated at 250°C", *Appl. Phys. Express* **6** 011302 (2013)

[3] P. N. Volpe, P. Muret, J. Pernot, F. Omnes, T. Teraji, Y. Koide, F. Jomard, D. Planson, P. Brosselard, N. Dheilly, B. Vergne, S. Scharnholz "Extreme dielectric strength in boron doped homoepitaxial diamond", *Appl. Phys. Lett.* **97**, 223501(2010)

[4] W. Huang, T. P. Chow, J. Yang, and J. E. Butler "High voltage diamond Schottky barrier rectifiers" *Int. J. High Speed Electron. Syst.* **14**, 872 (2004)

[5] French patent 2013: # 13.53647 " Procédé de fabrication d'une diode Schottky sur un substrat en diamant" extension PCT/US N°14/786130

[6] H. Umezawa, M. Nagase, Y. Kato and S. Shikata, "High temperature application of diamond power device", *Diam. Rel. Mater.* **24,** 201-205 (2012)

[7] A. Hiraiwa, and H. Kawarada "Blocking characteristics of diamond junctions with a punch-through design" *J. Appl. Phys.*, **117** (2015) 124503