HAL
open science

Réalisation et caractérisation de diodes Schottky en diamant monocristallin protégées par plaque de champ sur Si3N4

Fabien Thion, Karine Isoird, Dominique Planson, Marie-Laure Locatelli, Henri Schneider, Nicolas Mauran, Riadh Issaoui, J. Achard

To cite this version:

Fabien Thion, Karine Isoird, Dominique Planson, Marie-Laure Locatelli, Henri Schneider, et al.. Réalisation et caractérisation de diodes Schottky en diamant monocristallin protégées par plaque de champ sur Si3N4. 14ème EPF, Jul 2012, Bordeaux, France. 4 p. hal-01005917

HAL Id: hal-01005917

https://hal.science/hal-01005917v1

Submitted on 13 Jun 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.

Réalisation et caractérisation de diodes Schottky en diamant monocristallin protégées par plaque de champ sur Si_3N_4

Fabien Thion[1, 2, 3], Karine Isoird[1, 4], Dominique Planson[3], Marie-Laure Locatelli[5,6], Henri Schneider[1,7] , Nicolas Mauran[1,2], Riadh Issaoui[8], Jocelyn Achard[8]
[1]CNRS, LAAS, 7 avenue du colonel Roche, F-31400 Toulouse, France
[2]Univ de Toulouse, LAAS, F-31400 Toulouse, France
[3]Université de Lyon, CNRS, Laboratoire AMPERE, UMR 5005, INSA de Lyon, F-69621 Villeurbanne, France
[4]Univ de Toulouse, UPS, LAAS ; F-31400 Toulouse, France
[5]Université de Toulouse ; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie) ; 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse cedex 9, France
[6]CNRS ; LAPLACE ; F-31062 Toulouse, France
[7]Univ de Toulouse, INP, LAAS, F-31400 Toulouse, France
[8]LSPM-CNRS, université Paris 13, 99 avenue J.B. Clément 93940 Villetaneuse, France

Des diodes Schottky sont réalisées sur un échantillon vertical de diamant monocristallin dont la croissance a été réalisée au LSPM. Ces diodes ont été fabriquées en salle blanche au LAAS en tenant compte des résultats de simulations précédemment réalisées au laboratoire.Des caractéristiques électriques et en température ont ensuite été faites sur une station sous pointes. Les résultats de caractérisation sont montrés dans cet article, ainsi qu'une discussion autour de ces mêmes résultats.

I. Introduction

Le diamant, de par ses propriétés uniques, est un excellent candidat pour l'élaboration de composants de puissance. Relativement aux autres matériaux semi-conducteurs, il possède des propriétés électriques et mécaniques incomparables et il est aussi l'un des tous meilleurs conducteurs thermiques. Parmi ses nombreuses propriétés, on notera un champ critique compris entre 5 et 20 MV/cm, des mobilités des électrons comme des trous de 2000 cm^2/V.s ou encore une conduction thermique de 20 W/K.cm. L'étude a été menée dans le cadre du projet DIAMONIX. 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 boitier de composants de puissance en diamant. L'objectif principal de ce projet est de réaliser un démonstrateur sous forme de diode Schottky de tenue en tension 1200 V à 600 K et pouvant atteindre une densité de courant à l'état passant de 100 A/cm^2 sous 5 V toujours à 600 K. L'étude présentée dans cet article traite de la conception et la réalisation de diodes Schottky 1200 V protégées par plaque de champ à base de Si_3N_4. Plusieurs articles, tels [1,2,3], font état de performances exceptionnelles du diamant et sont très encourageants pour le développement d'une filière de composants électroniques de puissance en diamant.

II. Conception de diode Schottky 1,2 kV

Les simulations de la structure présentée en figure 1 sont réalisées à l'aide de SENTAURUS TCAD [4] en tenant compte d'une efficacité de protection de 80%. Il faut ainsi une structure qui ait une tenue en tension idéale de 1500 V (tenue en tension en 1D). Cette tenue en tension est obtenue (voir figure 2) à 600 K pour un dopage inférieur à 10^{16} cm^{-3} et une épaisseur d'environ 8 µm de la couche p-. Il faut ensuite jouer sur le type de diélectrique, l'épaisseur et la longueur de la plaque de champ sur le diélectrique pour obtenir l'efficacité de la protection désirée et une tenue en tension de 1200 V. Une épaisseur de 850 nm de Si_3N_4 pour une longueur de plaque de champ de 10 µm (figure 1) sont les paramètres optimaux retenus.

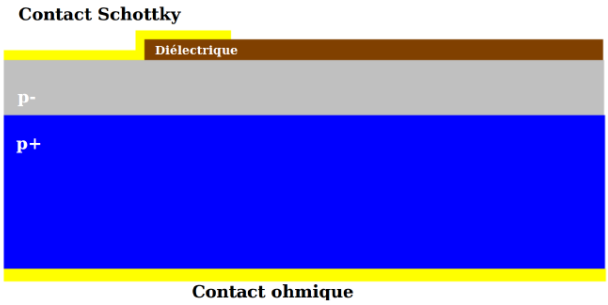

Figure 1 : Vue en coupe d'une diode protégée par une plaque de champ.

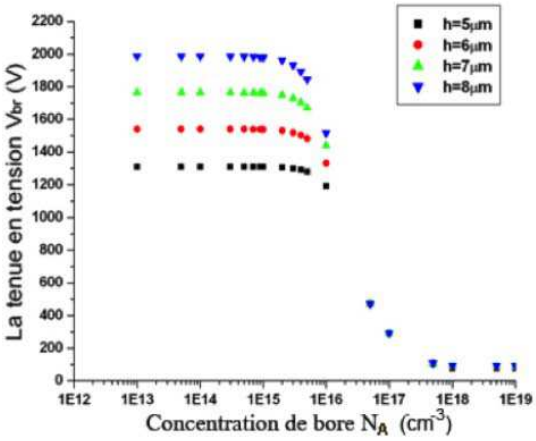

Figure 2 : Résultats de tenue en tension 1D à 600 K en fonction de l'épaisseur et du dopage de la couche p-.

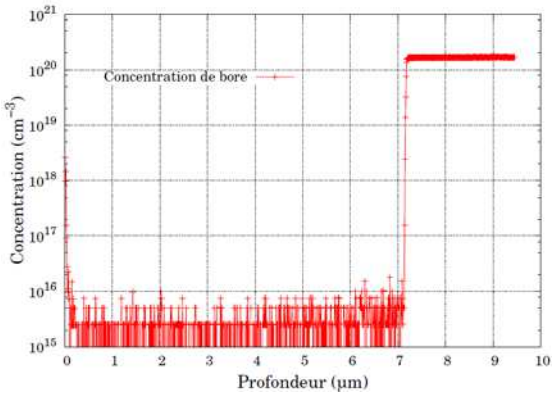

Figure 3 : Mesures SIMS sur l'échantillon.

III. PROCEDE TECHNOLOGIQUE

L'échantillon reçu a été fabriqué par le LSPM. Celui-ci est composé d'une couche p+ de 255 µm dopée au Bore à $1{,}6.10^{20}$ cm^{-3} et d'une couche de 7 µm dopée à 8.10^{15} cm^{-3} (ces deux valeurs étant respectivement données par des mesures C(V) figure 8 et SIMS en figure 3). Le procédé technologique a tenu compte de précédents travaux réalisés au laboratoire [5]. L'échantillon est tout d'abord nettoyé dans une succession de bains d'acides (H_2SO_4 + H_2O_2, HF, HF + HNO_3, HCl + HNO_3, HCl dilué) afin d'éliminer les contaminations organiques et métalliques. Ensuite, on réalise un dépôt pleine plaque de Si_3N_4 PECVD à 300°C de 850 nm. Le contact ohmique en face arrière est réalisé à l'aide d'un dépôt de Ti/Pt/Au suivi d'un recuit à 450°C pendant 30 minutes. Une étape de photolithographie puis de gravure RIE-ICP du film de Si_3N_4 durant 5 minutes nous permet d'ouvrir les contacts sur le diamant p-. Enfin, un lift-off de Ni/Al (le nickel étant le métal de choix pour les contacts Schottky d'après une étude précédente réalisée au laboratoire [5]) permet de réaliser les diodes (figure 4).

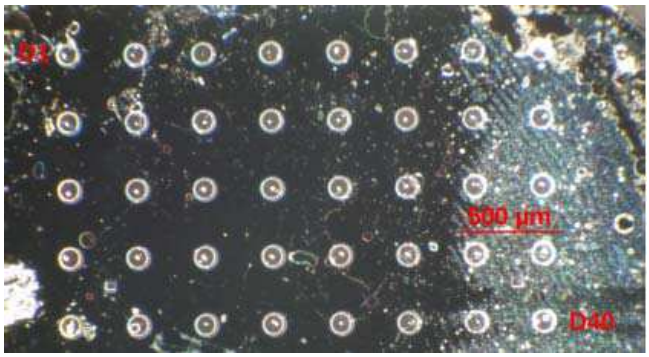

Figure 4 : Echantillon en fin de procédé et numérotation horizontale des diodes : D1 à D8 sur la première ligne. L'échantillon fait 3 mm de largeur.

IV. CARACTERISATIONS ELECTRIQUES

Les caractérisations électriques ont été réalisées à l'aide d'une station sous-pointes équipée d'un support chauffant reliée à une SMU Agilent 4142B. Des mesures ont été faites en direct et en inverse. On identifie deux types de comportement, voir la figure 5 pour les mesures en direct et la figure 6 pour les mesures en inverse à température ambiante.

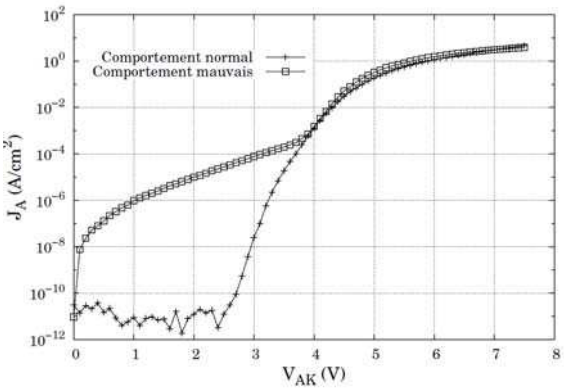

Figure 5 : Mesures I(V) en direct à 25°C.

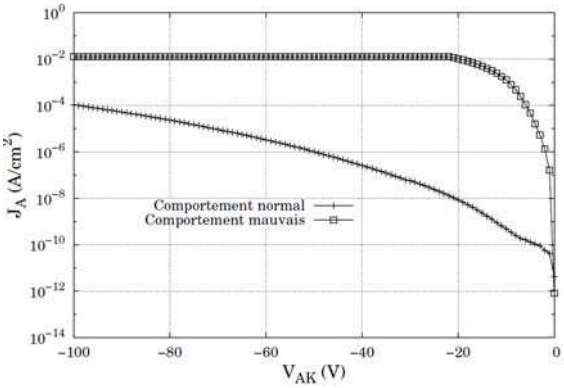

Figure 6 : Mesures I(V) en inverse à 25°C. Les caractéristiques présentées sont réalisées sur les mêmes diodes que la figure 5 .

Le premier type de comportement (nommé "mauvais") est redresseur mais ces diodes laissent apparaître un fort courant de fuite problématique et une simple observation au microscope montre que ces diodes sont réalisées sur des pics d'épitaxie (figure 7).

Figure 7 : Diode réalisée sur un pic d'épitaxie.

Le facteur d'idéalité n de la meilleure des diodes (ayant un comportement "normal") est de 2,4 pour une hauteur de barrière φ_e de 2,3 eV Ces deux valeurs indiquent des problèmes à l'interface Nickel/Diamant, car assez éloignées des valeurs théoriques (une diode Schottky Nickel diamant idéale devrait avoir un n de 1 et une hauteur de barrière de 1,57 eV). Ces défauts sont dus à l'état de surface de l'échantillon et aux charges à l'interface métal/diamant. Ce résultat est étayé par des valeurs de n très élevées. On constate aussi un effet de double barrière dû à ces états d'interface.

La valeur élevée de la tension de seuil (plus de 2,5 V) peut être imputable à plusieurs phénomènes. Le premier reste bien entendu la qualité de l'interface. Si l'étape de gravure d'ouverture des contacts n'a pas été suffisante, les diodes ont été réalisées sur une couche de Si_3N_4, qui influence nécessairement le comportement des diodes. Toutefois, les mesures C(V) nous montrent que ce n'est pas le cas, les valeurs relevées lors de la mesure sont en effet beaucoup trop faibles pour qu'il y ait présence de diélectrique restant en surface du diamant. Si l'étape de gravure a été cette fois trop importante, le diamant a été attaqué et le dépôt de Nickel s'est fait sur une surface dégradée.

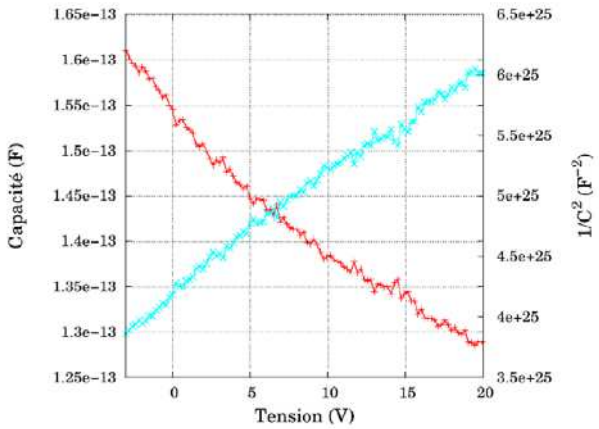

Figure 7 : Mesure C(V) et calcul du $1/C^2$ qui permet notamment de remonter au dopage de la couche.

Les mesures C(V) réalisées sur plusieurs diodes (e.g. figure 7) ont permis d'extraire les valeurs du dopage de la couche p- comme suit :

- diode 2 : dopage de 5.10^{15} cm^{-3}
- diode 16 : dopage de 5.10^{15} cm^{-3}
- diode 20 : dopage de $5,7.10^{15}$ cm^{-3}
- diode 34 : dopage de $5,7.10^{15}$ cm^{-3}
- diode 39 : dopage de $5,6.10^{15}$ cm^{-3}.

On constate une bonne homogénéité du dopage sur toute la couche. Ainsi, il apparaît que l'échantillon est plus dopé au centre que sur les bords, et les valeurs de dopage, bien corroborés par les mesures SIMS (figure 3) indiquent que celles-ci sont bien adaptées au développement de composants de puissance de tenue en tension maximale théorique de 1500 V à 600 K (figure 2).

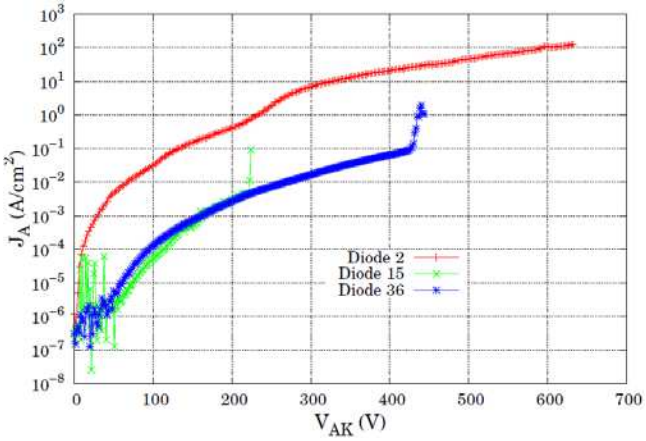

Figure 8 : Tenues en tension à température ambiante.

La figure 8 illustre les différentes caractéristiques inverses obtenues lors des mesures de tenue en tension à température ambiante. La majorité des diodes se comportent comme la diode 36 avec une tenue en tension aux alentours de 450 V. La plus faible tension de claquage mesurée est de 220 V (de type diode 15). On identifie un troisième type de comportement (cf diode 2), qui correspond au comportement nommé "mauvais" dans la figure 5.

En considérant les claquages les plus fréquents, obtenus autour de 450 V, les tenues en tension ne sont pas très bonnes pour l'épaisseur de p- considérée. En effet, pour une telle épaisseur de 7 µm et un tel dopage de 5.10^{15} cm^{-3}, les simulations 1D donnent une tenue en tension idéale de 900 V à 300 K. En appliquant l'efficacité attendue par ce type de protection, on devrait se situer aux alentours de 800 V. Notre protection correspond à une efficacité de 50%. Toutefois, la valeur obtenue de plus de 630 V sur une diode qui fuit particulièrement semble indiquer qu'il y a eu formation de charges dans le diélectrique et que celles-ci influencent le comportement en inverse des diodes. Le dépôt de Si_3N_4 ne semblant pas uniforme sur la totalité de l'échantillon (visuellement), on peut aussi expliquer la disparité de tenue en tension par une épaisseur de nitrure non homogène. Cette disparité a été constatée en observant un changement de couleur très prononcé du nitrure en fonction de la position sur l'échantillon. Malheureusement, nous ne disposons pas de technique de caractérisation susceptible de nous donner une information précise sur l'épaisseur du dépôt. Or, comme nous l'avons montré dans de précédents travaux [4], l'épaisseur du diélectrique est le paramètre critique lors de l'optimisation de la protection par plaque de champ. L'alignement étant très délicat, la longueur de plaque n'est pas optimale sur toute la circonférence de la diode (cf. figure 7), ce qui peut aussi entraîner un claquage prématuré des diodes.

V. CARACTERISATIONS EN TEMPERATURE

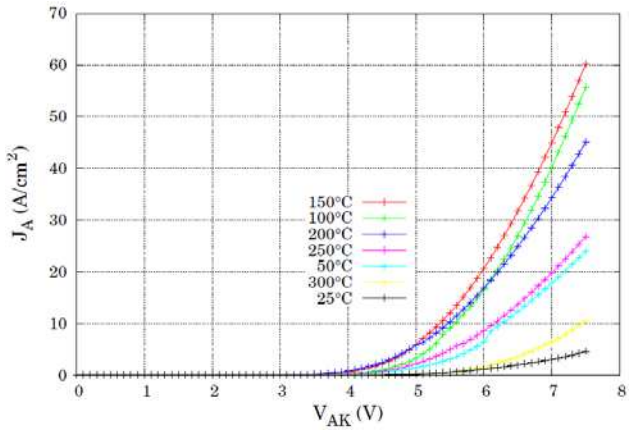

Figure 9 : Mesures I(V) en direct et en température de 25°c à 300°C.

La figure 9 illustre le comportement des diodes en température sous polarisation directe. La température 150°C est identifiée comme étant la température présentant le maximum de densité de courant pour le fonctionnement de nos diodes. La densité de courant augmente de 7 A/cm^2 à 25°C jusqu'à 62 A/cm^2 à 150°C (comme aussi constaté dans [2,3,6]) et diminue jusqu'à atteindre 12 A/cm^2 pour une température de 300°C. Ce phénomène est expliqué par l'activation thermique des

dopants dans la couche p- qui contribue à diminuer sa résistivité, et la chute de mobilité des trous lorsque la température augmente, laquelle se fait ressentir dès 150 °C et entraîne la diminution très importante des densités de courant.

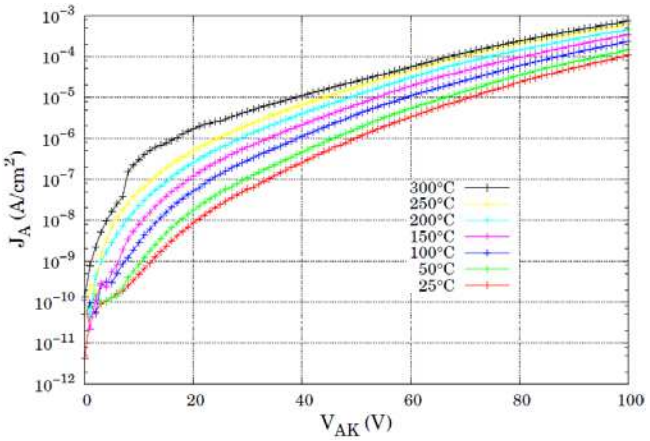

Figure 10 : Mesures I(V) en inverse et en température de 25°C à 300°C.

La figure 10 montre que les diodes ont un bon comportement en inverse lorsque l'on augmente la température. On ne constate pas d'augmentation brutale du courant de fuite, ceci étant indicateur d'une bonne stabilité thermique de nos dispositifs.

La valeur du facteur de redressement à + ou - 7,5V est de 10^{10} à 25°C, ce qui est tout à fait adapté à la réalisation de composants de puissance en diamant.

VI. CONCLUSION

Les résultats de caractérisation sont prometteurs tout en mettant en avant les difficultés encore inhérentes au matériau diamant. Toutefois, les nombreuses charges contenues dans le diélectrique et à l'interface diamant/diélectrique ont clairement un impact négatif sur la tenue en tension. La protection par plaque de champ sur Si_3N_4 n'a pas livré toutes ses possibilités, il faut améliorer la qualité du dépôt. Il faut toutefois envisager d'utiliser des diélectriques plus à même de satisfaire aux conditions de tenues en tension; tel Al_2O_3. Les problèmes rencontrés à l'interface entre le carbone et un diélectrique à base de silicium ont déjà été clairement identifiés lors de la caractérisation de composants réalisés avec du SiC. On peut aussi envisager de compléter la protection par plaque de champ par une technique permettant d'éviter les accroissements locaux du champ électrique en bord de la plaque métallique. Toutefois, le bon comportement en température, la valeur parfaitement acceptable du facteur de redressement et surtout l'évolution positive du comportement des diodes verticales précédemment réalisées au laboratoire [5] sont extrêmement encourageants pour le futur des composants de puissance en diamant.

VII. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le LAAS-CNRS, membre du réseau Renatech, pour les moyens mis à disposition en salle blanche et tout particulièrement l'équipe TEAM pour l'aide apportée sur ce projet.

VIII. REFERENCES

[1] P. Muret, P-N Volpe, T-N Tran-Thi, J. Pernot, C. Hoarau, F. Omnès, T. Teraji, "Schottky diode architectures on p-type diamond for fast switching, high forward current density and high breakdown field rectifiers", *Diamond and related materials,* vol 20, pp 285-289, 2011

[2] H. Umezawa, M. Nagase, Y. Kato, S-I Shikata, "High temperature application of diamond power device" *Diamond and related materials,* vol 24, pp 201-205, 2012

[3] A. Vescan, I. Daumiller, P. Gluche, W. Ebert, E. Kohn, "High temperature, high voltage operation of diamond Schottky diode", *Diamond and related materials,* vol 7, pp 581-584, 1998

[4] F. Thion, K. Isoird, D. Planson, M-L Locatelli, H. Ding "Simulation and design of junction termination structures for diamond Schottky diodes", *Diamond and related materials*, vol 20, pp 729-732, 2011

[5] S. Koné, "Développement de briques technologiques pour la réalisation des composants de puissance en diamant monocristallin", *Travaux de Thèse,* Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2011

[6] M. Cracium, Ch. Saby, P. muret, A. Deneuville, "A 3.4 eV potential barrier height in Schottky diodes on boron-doped diamond thin films", *Diamond and related materials,* vol 13, pp 292-295, 2004