HAL
open science

Simulation numérique et caractérisation de composants de puissance en diamant

Nicolas Clément, Jean-Paul Rouger, Aurélien Maréchal, Gauthier Chicot, Gaetan Perez, Thanh-Toan Pham, Pierre Lefranc, Pierre-Olivier Jeannin, Yvan Avenas, David Eon, Julien Pernot, et al.

To cite this version:

Nicolas Clément, Jean-Paul Rouger, Aurélien Maréchal, Gauthier Chicot, Gaetan Perez, Thanh-Toan Pham, et al.. Simulation numérique et caractérisation de composants de puissance en diamant. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361596

HAL Id: hal-01361596

https://hal.science/hal-01361596v1

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.

Simulation numérique et caractérisation de composants de puissance en diamant

Nicolas ROUGER[1,2], Aurélien MARECHAL [1,2,3], Gauthier CHICOT[1,2], Gaëtan PEREZ[1,2], Thanh-Toan PHAM[1,2,3], Pierre LEFRANC[1,2], Pierre-Olivier JEANNIN[1,2], Yvan AVENAS[1,2], David EON[1,3], Julien PERNOT[1,3], Etienne GHEERAERT[1,3]

[1]Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France
[2]CNRS, G2ELab, F-38000 Grenoble, France
[3]CNRS, Institut Néel, F-38000 Grenoble, France

RESUME – Cet article présente les avancées sur la simulation analytique et numérique de composants de puissance en diamant, ainsi que les problématiques de caractérisation associées. Les modèles spécifiques au diamant ont été implémentés et ont été calibrés en confrontant les résultats de simulation aux dernières données expérimentales existantes. Enfin, un soin particulier a été apporté sur la maîtrise de l'auto-échauffement et de la calibration de la température du composant diamant sous test.

Mots-clés—diamant, matériaux grands gaps, simulation numérique, diode Schottky.

1. INTRODUCTION

Le diamant présente les meilleures figures de mérite par rapport aux autres semiconducteurs classiquement utilisés en électronique de puissance [1]. De nombreux composants de puissance en diamant ont été démontrés à l'échelle nationale et internationale, depuis les diodes Schottky [2,3] jusqu'aux transistors à effet de champ [4,5]. Néanmoins, de nombreux travaux restent nécessaires pour optimiser le niveau de performance des dispositifs existants et futurs en diamant en cherchant à reboucler de façon systématique sur de fines analyses numériques. Les modèles particuliers au diamant doivent être implémentés dans les simulateurs numériques et dans les analyses, en s'appuyant sur des caractérisations expérimentales couvrant une large plage de température. Cet article présente l'implémentation de ces modèles physiques, leurs limites, ainsi que les problématiques et résultats de caractérisation expérimentale en s'appuyant principalement sur les diodes P(I)N et Schottky ainsi que les capacités MOS en diamant.

2. SIMULATION NUMERIQUE

Un travail de synthèse a été réalisé pour recenser les modèles pertinents et les valeurs des paramètres de ces modèles pour la simulation numérique [6]. Au-delà des modèles, nous avons considéré l'optimisation de la zone de tenue en tension en fonction de la température et du niveau de tension, s'appuyant sur une approche semi-analytique 1D du claquage par avalanche [7]. Ensuite, des simulations numériques 1D, 2D et 3D ont été conduites pour prendre en compte les résistances série et les phénomènes spécifiques de conduction des dispositifs de puissance en diamant. Des modèles adaptés sont nécessaires pour la compréhension et la modélisation de l'interface Métal-Oxyde-Diamant, en vue de son utilisation dans de futurs transistors MOSFET en diamant.

2.1. Implémentation des modèles physiques spécifiques au diamant

Partant des résultats expérimentaux existants, nous avons implémenté et renseigné les paramètres de nombreux modèles physiques nécessaires à la simulation de composants en diamant. L'ensemble de ces modèles, leurs références bibliographiques et les valeurs des paramètres est disponible dans [6]. Parmi ceux-ci, les modèles principaux du diamant sont présentés dans les équations (1) à (9) et tableaux 1 et 2. L'énergie de bande interdite est dépendante de la température (1), la concentration de trous libres dans la bande de valence (2-4) dépend du niveau de dopage, de la température T, de l'énergie d'activation de l'atome dopant accepteur et d'un facteur de dégénérescence g_h=1/4. De façon similaire, la concentration en électrons libres dans la bande de conduction est représentée par les équations (5-6), le facteur de dégénérescence étant g_e=2.

$$E_g(T) = E_g(300\ K) + \alpha\frac{300^2}{\beta + 300} - \alpha\frac{T^2}{\beta + T} \tag{1}$$

Symbol	E_g (300 K)	α	B
Unit	eV	eV.K^{-1}	K
	5.46	1.01007	3.95198×10^6

Tableau 1 : Paramètres pour le calcul de l'énergie de bande interdite du diamant.

$$p = \frac{1}{2}(\Phi_a + N_D)\left(\sqrt{1 + \frac{4\Phi_a(N_A - N_D)}{(\Phi_a + N_D)^2}} - 1\right) \tag{2}$$

$$\Phi_a = g_h . N_V exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \tag{3}$$

$$E_a(eV) = 0.38 - 4.7877 \times 10^{-8} \times N_A^{1/3} \quad (4)$$

$$n = \frac{1}{2}(\Phi_d + N_A)\left(\sqrt{1 + \frac{4\Phi_d(N_D - N_A)}{(\Phi_d + N_A)^2}} - 1\right) \quad (5)$$

$$\Phi_d = g_e . N_C exp\left(-\frac{E_d}{k_B T}\right) \quad (6)$$

Cette ionisation incomplète des dopants est une des difficultés du matériau diamant pour l'électronique de puissance, où le Bore et le Phosphore sont utilisés classiquement et respectivement comme atomes dopants accepteurs et donneurs, avec des énergies d'activation élevées. La figure 1 présente en particulier le nombre de porteurs libres en fonction de la température, pour un niveau de dopage fixé (donneurs ou accepteurs à 1e17 cm-3, compensés à 10%), pour le diamant dopé N et P, et le SiC et GaN dopés N. En conséquence, le dopage de type P est préférable pour le diamant, et l'augmentation de la température est bénéfique pour l'augmentation du nombre de porteurs, et par suite, pour la diminution de la résistance série des composants de puissance, ceci devant être complété et tempéré par des modèles fiables de mobilité des porteurs.

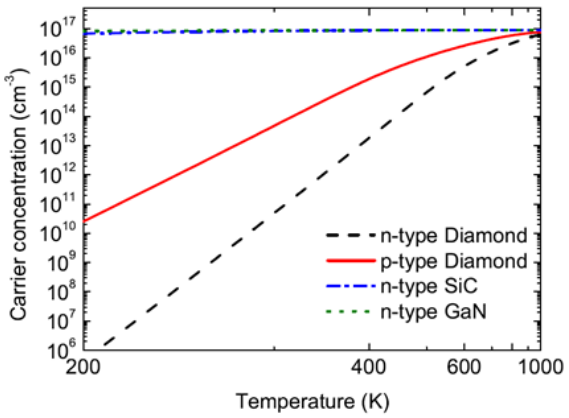

Figure 1 : Exemples de modèles spécifiques au diamant et comparaison avec les autres matériaux pour l'électronique de puissance : concentration de porteurs libres en fonction de la température, pour une concentration d'atomes dopants de 1e17 cm-3 et une compensation de 10%. La dépendence de l'énergie de bande interdite en fonction de la température a été prise en compte pour les matériaux.

Les modèles de mobilité des porteurs libres sont présentés dans les équations (7) à (9) et le tableau 2, rendant compte de façon empirique des dépendances au niveau de dopage et de la température, en s'appuyant sur des mesures de conductivité par effet hall [8-9].

$$\mu(T, N_{imp}) = \mu(300, N_{imp}) \times \left(\frac{T}{300}\right)^{-\beta(N_{imp})} \quad (7)$$

$$\beta(N_{imp}) = \beta_{min} + \frac{\beta_{max} - \beta_{min}}{1 + \left(\frac{N_{imp}}{N_\beta}\right)^{\gamma_\beta}} \quad (8)$$

$$\mu(300, N_{imp}) = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N_{imp}}{N_\mu}\right)^{\gamma_\mu}} \quad (9)$$

Symbole	β_{min}	β_{max}	N_β	γ_β	μ_{min}	μ_{max}	N_μ	γ_μ
Unité			cm^{-3}		$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$	cm^{-3}	
Trous	0	3.11	4.10×10^{18}	0.617	0	2016	3.25×10^{17}	0.730
Electrons	0	2.17	3.75×10^{17}	0.585	0	1030	9.90×10^{16}	0.564

Tableau 2 : Paramètres pour le calcul de la mobilité des porteurs libres dans le diamant.

D'autres mécanismes de conduction ont été démontrés dans le diamant, pouvant réduire significativement la résistivité de couches dopés au Bore ou au Phosphore. Les mécanismes proposés sont par exemple la conduction par saut, de type NNH (Nearest Neighbor Hopping) pour le Phosphore, et VRH (Variable Range Hopping) pour le Bore. Ces mécanismes de conduction affectent plus particulièrement les couches dopées type N et permettent de limiter la résistivité de ces couches à température ambiante, malgré une mauvaise ionisation des dopants Phosphore – figure 2. Les couches de type N peuvent être utilisées dans les diodes et transistors bipolaires, ainsi que dans des transistors de puissance de type P où le canal d'inversion serait formé par une couche de type N, mais où il est aussi important de calculer de façon précise la résistance équivalente de la zone pincée dans la région N. Dans ce dernier cas, il est important de prédire de façon précise le comportement du court-circuit Base Emetteur du transistor PNP parasite intrinsèque à la structure du MOSFET de type P à inversion.

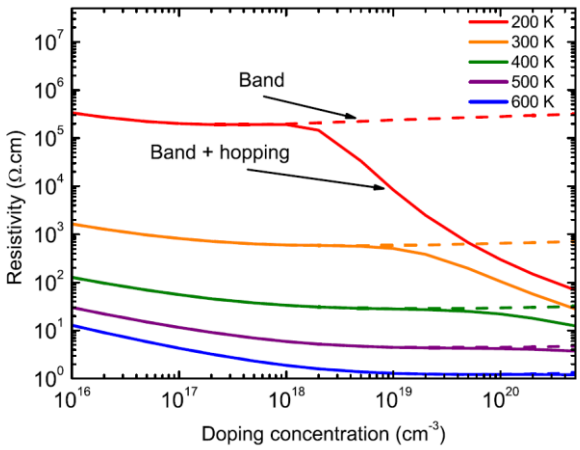

Figure 2 : Résistivité de couches diamant dopés N, en fonction de la température et du dopage. Le nombre d'électrons libres dans la bande de conduction est calculé, ainsi que leur mobilité associée, complétés par un modèle équivalent de mobilité pour la conduction par saut.

Les modèles précédents permettent de prédire de façon précise la résistance à l'état passant de composants unipolaires en diamant, sur une large plage de dopage et de température. Il est nécessaire alors de les compléter par une représentation adéquate des phénomènes régissant la tenue en tension des composants de puissance en diamant. L'analyse de la tenue en tension est classiquement basée sur le calcul de l'intégrale d'ionisation par impact des porteurs libres dans la zone de charge d'espace [10-12]. A ce jour, des modèles de coefficients d'ionisation sont disponibles dans la littérature, mais de nombreuses questions et limites peuvent être soulignées :

- La tenue en tension des dispositifs expérimentaux est-elle réellement issue d'un claquage par avalanche ?

- Quelles sont les dépendances en température ?
- Y-a-t-il une modification des coefficients d'ionisation selon des gammes de niveaux de champs électriques ?
- La tenue en tension des dispositifs expérimentaux peut-elle être calculée uniquement en 1D, en supposant une efficacité de terminaison en tension de 100% ? Quelle est la dégradation de la tenue en tension 1D sous l'effet des terminaisons en tension et de la distribution 3D du champ électrique et des potentiels ?
- L'architecture latérale des premiers composants en diamant est-elle optimale pour la tenue en tension, avec par exemple un claquage prématuré Grille-Drain dans les transistors latéraux en diamant, à l'image des transistors GaN-HEMT ?
- Pour les modèles théoriques de coefficients d'ionisation par impact, les hypothèses sont-elles bien vérifiées, s'appuyant aussi sur des résultats expérimentaux où le claquage 1D par avalanche n'est pas garanti [13] ?
- Les courants de fuites limitent-ils la tenue en tension des composants, particulièrement pour les diodes Schottky en diamant ?
- Quelle est la reproductibilité des mesures ayant permis l'élaboration des modèles ?

Il est néanmoins vital d'avoir des modèles de tenue en tension afin d'optimiser le dimensionnement de la zone de tenue en tension pour les composants en diamant, à l'image du Silicium où le coefficient de troncature optimal est connu pour les composants unipolaires et bipolaires (par exemple, [14]). L'optimisation des dispositifs de puissance en diamant, depuis l'optimisation de la zone de tenue en tension jusqu'à la terminaison en tension, doit s'appuyer sur des modèles fiables. Dans [15], des coefficients d'ionisation par impact sont proposés, en essayant de rendre compte de la tenue en tension observées sur des dispositifs expérimentaux par une modélisation du claquage par avalanche. Bien que cette approche soit discutable selon les points relevés précédemment, notamment car le claquage par avalanche n'a pas été observé sur la quasi-totalité des composants en diamant, elle permet néanmoins d'avoir un modèle fidèle aux dernières mesures expérimentales et dans le pire des cas, sous-estimant la tenue en tension intrinsèque possible. L'équation (10) présente le modèle retenu de coefficient d'ionisation pour les électrons et les trous, avec a_n=1.4e5 cm^{-1}, b_n=2.4e7 V/cm, a_p=6.1^{e}4 cm^{-1}, b_p=1.4e7 V/cm [15]. La dépendance en température n'est pas renseignée.

$$\alpha_p = a_p \exp\left(\frac{-b_p}{|E|}\right), \alpha_n = a_n \exp\left(\frac{-b_n}{|E|}\right) \qquad (10)$$

D'autres pistes complémentaires de détermination des coefficients d'ionisation semblent nécessaires, notamment grâce à la génération de porteurs par rayonnement. Enfin, pour la simulation de composants bipolaires ou la représentation des phénomènes de génération-recombinaison, des modèles de durée de vie de porteurs doivent être implémentés et vérifiés [6]. La durée de vie maximale des porteurs dans le diamant est de l'ordre ou inférieure à la ns. Une des conséquences de cette faible durée de vie est de limiter l'intérêt des composants bipolaires dans le cas du diamant : par exemple, pour les diodes bipolaires en diamant, les fortes recombinaisons limitent ainsi la modulation de résistivité et ne parviennent pas à compenser le potentiel de diffusion élevé, et présentent alors une chute de tension à l'état passant plus élevée que les diodes unipolaires. Néanmoins, par des effets 2D et l'optimisation des dimensions selon la durée de vie et la longueur de diffusion des porteurs dans le diamant, il est possible d'injecter des porteurs minoritaires et de moduler la conductivité d'un composant type JFET [16].

2.2. Simulation analytique et semi-analytique pour l'optimisation de la zone de tenue en tension

En s'appuyant sur le calcul de l'intégrale d'ionisation avec des coefficients adaptés au diamant, une analyse fine du coefficient de troncature optimal d'un composant unipolaire en fonction de la tension claquage (de 1 kV à 10 kV) a été menée. Cette étude permet de mieux concevoir l'épaisseur et le niveau de dopage de la zone de tenue en tension, dans le cas d'une zone de tenue en tension dopée au Bore. Bien connu dans les cas du Silicium et du SiC par exemple, cette analyse n'avait, à ce jour, jamais été conduite pour le diamant avec des coefficients fiables d'ionisation par impact. Par exemple, [10,17] utilisent d'autres modèles d'ionisation par impact, mais ne proposent pas d'optimisation du dimensionnement de la zone de tenue en tension. De plus, [10,12] considèrent uniquement des jonctions sans troncature (NPT pour Non Punch Through), avec une analyse comparative de l'avalanche sur les semiconducteurs de puissance à dopage uniforme.

Dans notre approche, nous avons utilisé soit un calcul analytique de l'intégrale d'ionisation pour des dopages uniformes, soit un calcul 1D et 2D par un code MATLAB utilisant les différences finies pour tout type de dopage [7]. Un plan d'expérience numérique a été réalisé afin de comparer l'effet de la troncature (PT pour Punch Through) sur la valeur de la résistance spécifique RonS à tenue en tension fixée et calculée par l'intégrale d'ionisation tendant vers l'unité (ici la tension de claquage a été considérée atteinte lorsque l'intégrale d'ionisation était égale ou supérieure à 0.995). La figure 3 présente les résultats obtenus dans le cas 1D et selon nos modèles et nos hypothèses, pour un dopage uniforme au Bore de la zone de tenue en tension. Le coefficient théorique de troncature optimal dans les composants unipolaires en diamant est sensiblement 0.70, proche du facteur 0.75 communément admis dans le Silicium [14]. Pour le concepteur de composants de puissance en diamant, il sera nécessaire d'utiliser ce résultat, combiné à la prédiction du champ électrique maximal en fonction du niveau du dopage de la zone de tenue en tension proposé dans [15]. La figure 3 permet aussi de mieux anticiper les limites technologiques et leurs impacts sur le compromis Ron.S vs. BV. Par exemple, une plus forte troncature permettra de réduire l'épaisseur de la zone de tenue en tension, mais le niveau de dopage devra être réduit et globalement, la résistance spécifique sera plus grande pour des coefficients de troncatures inférieurs au coefficient optimal. La conception à la troncature optimale permettrait de réduire la résistance de la zone de tenue en tension de 12 à 16% par rapport à une zone non tronquée, et de plus de 50% dans le cas de coefficients de troncature faibles. Cette optimisation reste néanmoins tributaire du modèle de coefficients d'ionisation par impact utilisé, et il reste primordial d'augmenter la fiabilité de ces modèles. Les valeurs optimales de RonS pour des composants unipolaires en diamant à 500K, pour 6.5kV et 10kV, montrent l'intérêt du diamant pour l'électronique de puissance (15 mΩ.cm² et 41 mΩ.cm² pour 6.5 kV et 10 kV), en s'appuyant sur les derniers modèles connus dans l'état de l'art.

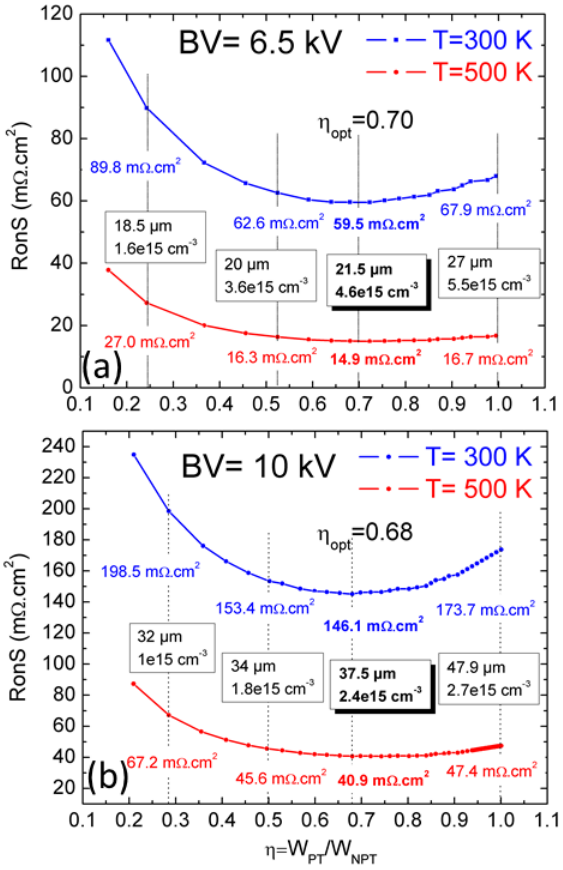

Figure 3 : Calcul de la résistance spécifique de la zone de tenue en tension, en fonction de la température et du coefficient de troncature, pour deux tenues en tension.

La croissance de telles couches, en termes d'épaisseur et de niveaux de dopage, reste cependant un grand challenge, mais nous sommes ici en mesure de quantifier l'impact d'un dimensionnement différent des optima proposés. De plus, comme souligné plus haut, cette étude préliminaire doit être complétée par une analyse poussée des phénomènes limitant particulièrement la tenue en tension des composants en diamant (courants de fuite, périphérie en tension [12], activation de structures parasites type PNP internes dans MOSFET, …). En complément, la figure 4 confronte le modèle avec des points expérimentaux, à l'image de [15].

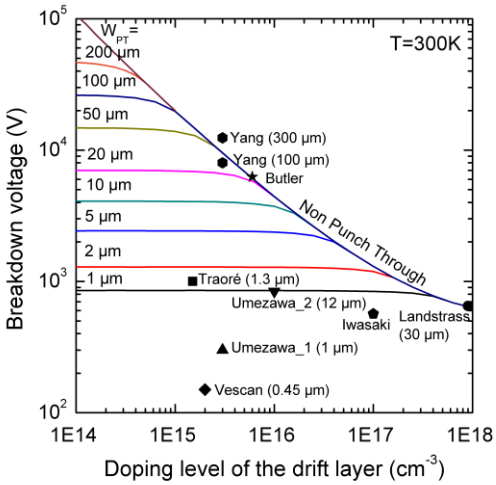

Figure 4 : Evolution de la tenue en tension prédite par avalanche en fonction du dopage de la zone de tenue en tension et de son épaisseur selon le type de dimensionnement (PT ou NPT). Les points sont issus de la littérature et ont notamment servi à [15] pour proposer les modèles de coefficients d'ionisation par impact dans le diamant.

2.3. *Simulation numérique par méthode des éléments finis 2D et 3D*

La simulation numérique est nécessaire pour l'optimisation des périphéries en tension et plus généralement, l'étude des structures 2D et 3D. Dans un premier temps, nous avons comparé les résultats semi-analytiques décrits dans la section précédente avec les mêmes modèles implantés dans la suite logicielle Silvaco. Afin d'obtenir la convergence du calcul de l'intégrale d'ionisation par impact sous Silvaco, nous avons dû modifier la valeur initiale des courants de diffusion. En effet, les valeurs extrêmement faibles de la concentration intrinsèque des porteurs libres dans le diamant peuvent générer quelques difficultés numériques. Nous avons obtenu une correspondance exacte entre l'analyse semi-analytique décrite plus haut et une structure 1D dans Silvaco. Une autre approche proposée dans [17] est de simuler les composants en diamant à partir de 700K afin de pouvoir calculer la tenue en tension par avalanche.

La simulation numérique est aussi nécessaire dans le cas de modèles complexes, particulièrement pour calculer la distribution spatiale des concentrations en porteurs libres sous l'effet de phénomènes de génération-recombinaison [6,18]. La figure 5 présente ainsi la comparaison entre modélisation numérique et mesures expérimentales, dans le but principal de confronter les limites des modèles avec les composants réels.

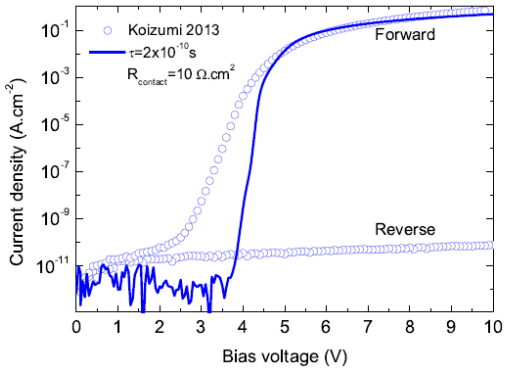

Figure 5 : Simulations numériques 2D d'une diode bipolaire en diamant, comparaison entre modèle [6] et résultats expérimentaux de [19].

De façon complémentaire, une étude 3D de la distribution de potentiel pour une diode Schottky semi-verticale, permet de mieux concevoir les amenées de courant minimisant la résistance série – figure 6.

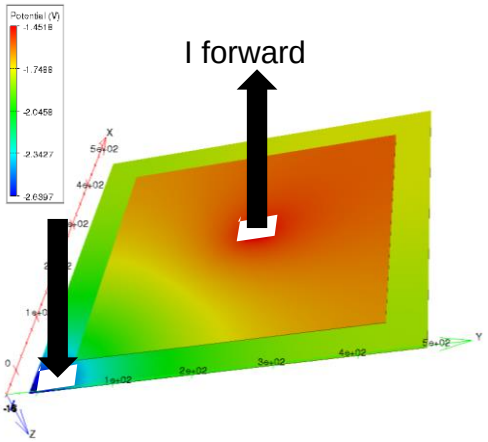

Figure 6 : Simulations numériques 3D d'une diode semi-verticale Schottky en diamant à 300K sous polarisation directe. Dans cette étude, l'échantillon considéré mesure 500µmX500µm, avec une couche P+ (1e20 cm-3) d'épaisseur 1µm sur laquelle le contact ohmique est déposé, et une couche P- (1e17 cm-3) d'épaisseur 1µm sur laquelle le contact Schottky est déposé.

3. Caractérisation et Implementation dans une cellule de commutation

La caractérisation de prototypes en diamant peut s'avérer compliquée pour différentes raisons : d'une part la passivation secondaire peut ne pas être présente, rendant difficile les caractérisations à haute tension et d'autre part, la gamme de température à mesurer peut être très importante afin d'évaluer différents modèles et phénomènes (haute température : ionisation des porteurs et modification de la mobilité, basse température : modification des courants de fuite et analyse des interfaces oxyde-diamant). Ainsi, nous utilisons une enceinte sous vide secondaire (10^{-6}mbar) afin d'assurer la passivation secondaire sur une large plage de température, depuis 88K jusqu'à 675K – figure 7. Enfin, l'auto-échauffement du dispositif sous test doit être maîtrisé afin de garantir la mesure à la température imposée par le porte-échantillon, régulé en température. Pour étudier l'écart possible entre la température du porte échantillon et celle de la puce en diamant, nous avons procédé à une calibration d'un paramètre thermo-sensible, par exemple la chute de tension à faible polarisation en courant direct d'une diode Schottky – figures 8 et 9. Ce paramètre thermo-sensible est ensuite utilisé pour suivre en temps réel la température de l'échantillon, lors de la mesure d'autres composants présents sur le même substrat en diamant ou bien pendant la phase de caractérisation d'autres composants présents sur le même échantillon.

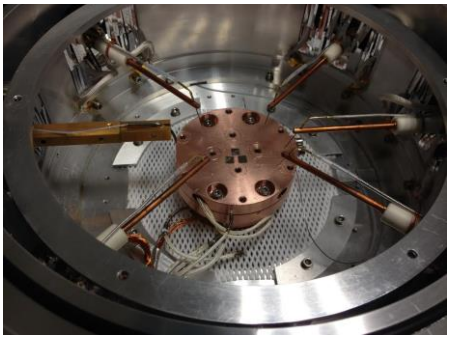

Figure 7 : Photographie de l'intérieur de l'enceinte sous vide, permettant la caractérisation de dispositifs diamant sur une large plage de température et à haute tension.

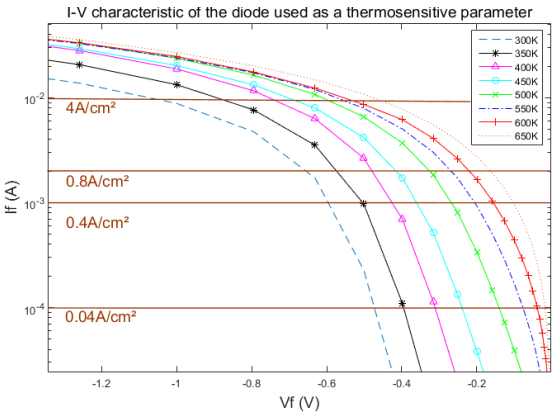

Figure 8 : Caractérisation en température d'une diode Schottky en polarisation directe. La surface active est de 500µm X 500µm. Les lignes à densité de courant fixe montrent les différents niveaux de polarisation possible pour l'extraction du paramètre thermo-sensible.

La figure 9 présente la calibration du paramètre thermo-sensible, où une densité de courant direct de 0.8A/cm² semble la solution la plus adaptée avec une bonne linéarité (-1.5mV/°C sur 300K à 675K) et de faibles pertes supplémentaires générées par ce capteur intégré de température (<0.6W/cm²).

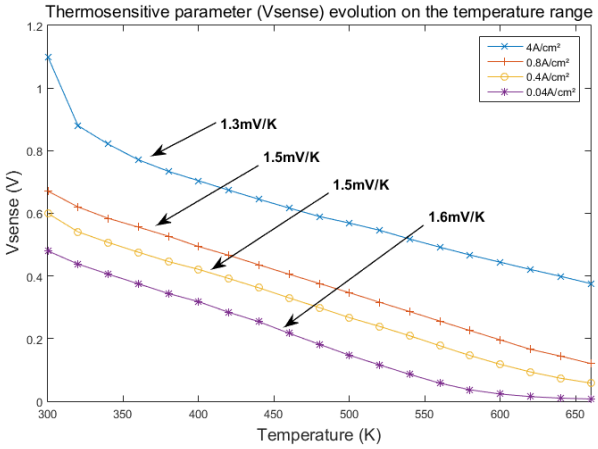

Figure 9 : Calibration du paramètre thermo-sensible – chute de tension à l'état passant en fonction de la température pour différents niveaux de courants de polarisation. La surface active est de 500µm X 500µm.

Au-delà des tests sous pointe, il est important de vérifier les performances en commutation des composants en diamant tels que les diodes Schottky. Nous avons ainsi conçu une cellule de commutation spécifique, permettant un fonctionnement à température normale des parties électroniques (gate drivers, transistor de puissance, circuit de mesure de courant) et à plus haute température pour les diodes en diamant. La figure 10 présente le convertisseur réalisé, où les diodes Schottky utilisées présentes des pertes minimales autour de 150°C. Du fait de la surface active relativement réduite pour l'instant des diodes Schottky diamant, il est nécessaire d'associer un environnement de commutation adapté. Par exemple, la capacité équivalente d'une diode Schottky de 200µm de côté est de l'ordre de 800fF à 2pF, et le transistor associé doit lui aussi présenter une faible capacité, ainsi que l'inductance utilisée dans la méthode du double pulse. La figure 11 présente un premier résultat de caractérisation en commutation, sous tension réduite, par la méthode du double pulse. Ces tests vont permettre de quantifier l'intérêt à l'échelle du système des composants de puissance en diamant, et d'identifier les spécificités de ces composants et adapter l'environnement de commutation.

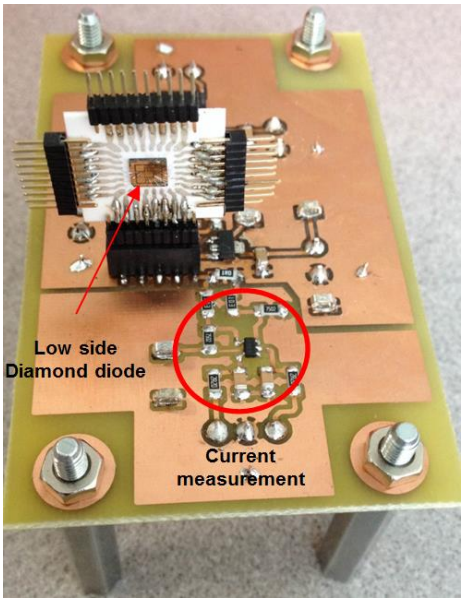

Figure 10 : Convertisseur de puissance 200V – 1A utilisant des diodes Schottky en diamant comme diodes de roue libre.

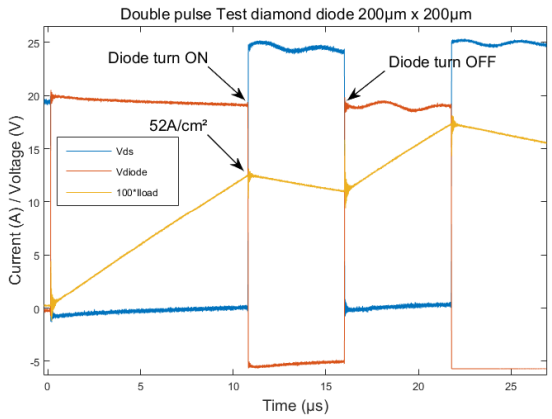

Figure 11 : Commutation transistor Silicium / Diode Diamant sous tension réduite (20V) et forte densité de courant direct (>50A/cm²).

4. Conclusion

Cet article présente l'état actuel des recherches sur la simulation et la caractérisation de composants en diamant pour l'électronique de puissance. Un soin particulier a été apporté à l'implémentation de modèles récents et validés expérimentalement. Particulièrement, nous proposons un dimensionnement optimal de la zone de tenue en tension des composants unipolaires en diamant dopés au Bore, permettant de minimiser la résistance à l'état passant pour différentes tensions de claquage. Par l'utilisation complémentaire de simulations analytiques et numériques, nous pouvons mieux anticiper le dimensionnement optimal de futurs composants de puissance. Pour la caractérisation sous pointes des composants, nous proposons d'utiliser un composant intégré sur l'échantillon en diamant afin de mesurer la température de l'échantillon lors de la caractérisation de composants présents sur le même substrat. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour garantir la fiabilité de la mesure, et assurer une bonne isolation électrique entre le capteur de température intégré et le ou les composants de puissance intégrés monolithiquement. Enfin, les spécificités du diamant imposent un soin particulier pour démontrer les bénéfices à l'échelle du système des composants en diamant, et une première réalisation de cellule de commutation a été présentée. Dans l'avenir, il faudra travailler pour identifier de façon fiable les mécanismes régissant la tenue en tension des composants en diamant, et proposer une optimisation système permettant de tirer profit au mieux du diamant pour l'électronique de puissance, depuis l'architecture du composant, sa périphérie en tension, jusqu'au circuit de pilotage (gate driver pour les transistors) et la cellule de commutation (packaging haute température, packaging faiblement impédant, capacité de découplage haute température et haute fréquence).

5. Remerciements

The research leading to these results has been performed within the GreenDiamond project (http://www.greendiamond-project.eu/) and received funding from the European Community's Horizon 2020 Programme (H2020/2014-2020) under grant agreement n° 640947. The high voltage equipment was supported by French state funds ANR-10-LABX-51-01 (Labex LANEF du Programme d'Investissements d'Avenir, equipment grant #CARAPACE).

6. References

[1] A. Hiraiwa and H. Kawarada, "Figure of merit of diamond power devices based on accurately estimated impact ionization processes," *Journal of Applied Physics*, vol. 114, no. 3, p. 034506, Jul. 2013.

[2] A. Traoré, P. Muret, A. Fiori, D. Eon, E. Gheeraert, and J. Pernot, "Zr/oxidized diamond interface for high power Schottky diodes," Applied Physics Letters, vol. 104, no. 5, p. 052105, Feb. 2014.

[3] H. Umezawa, M. Nagase, Y. Kato, and S. Shikata, "High temperature application of diamond power device," Diamond and Related Materials, vol. 24, pp. 201–205, avril 2012.

[4] H. Kawarada, H. Tsuboi, T. Yamada, D. Xu, T. Saito, A. Hiraiwa, "Wide Temperature (10K- 700K) and High Voltage (~1000V) Operation of C-H Diamond MOSFETs for Power Electronics Application", IEEE IEDM 2014, 2014.

[5] H. Umezawa, T. Matsumoto, and S.-I. Shikata, "Diamond Metal Semiconductor Field-Effect Transistor With Breakdown Voltage Over 1.5 kV," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 35, no. 11, pp. 1112–1114, Nov. 2014.

[6] A. Maréchal, N. Rouger, J.-C. Crébier, J. Pernot, S. Koizumi, T. Teraji, and E. Gheeraert, "Model implementation towards the prediction of J(V) characteristics in diamond bipolar device simulations," *Diamond and Related Materials*, vol. 43, pp. 34–42, Mar. 2014.

[7] N. Rouger, "Electric Field Distribution and Voltage Breakdown Modeling for any PN Junction", COMPEL international journal - vol 35, Issue 1, pp 136-156. 2016.

[8] J. Pernot, C. Tavares, E. Gheeraert, E. Bustarret, M. Katagiri, and S. Koizumi, "Hall electron mobility in diamond," Applied Physics Letters, vol. 89, no. 12, p. 122111. 2006.

[9] J. Pernot, P. N. Volpe, F. Omnès, P. Muret, V. Mortet, K. Haenen, and T. Teraji, "Hall hole mobility in boron-doped homoepitaxial diamond," Phys. Rev. B, vol. 81, no. 20, p. 205203, 2010.

[10] C. Raynaud, D. Tournier, H. Morel, D. Planson, "Comparison of high voltage and high temperature performances of wide bandgap semiconductors for vertical power devices", Diam. Relat. Mater. 19 (2010) 1–6.

[11] F.D. Bauer, Compact High-Precision Models for Silicon p-n Step Junction Avalanche-Breakdown Voltages, IEEE Trans. Electron Devices. 58 (2011).

[12] D. Planson, P. Brosselard, K. Isoird, M. Lazar, L.V. Phung, C. Raynaud, et al., Wide bandgap semiconductors for ultra high voltage devices. Design and characterization aspects, in: Semicond. Conf. CAS 2014 Int., 2014: pp. 35–40.

[13] Y. Kamakura, T. Kotani, K. Konaga, N. Minamitani, G. Wakimura and N. Mori, "Ab initio study of avalanche breakdown in diamond for power device applications," 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), Washington, DC, 2015, pp. 5.2.1-5.2.4.

[14] J. He, X. Zhang, Y. Wang, X. Xi, Optimum design of punch-through junction used in bipolar and unipolar high voltage power devices, Solid-State Electron. 46 (2002) 847–851.

[15] A. Hiraiwa and H. Kawarada, "Blocking characteristics of diamond junctions with a punch-through design," *Journal of Applied Physics*, vol. 117, no. 12, p. 124503, Mar. 2015.

[16] T. Suwa et al., "Normally-Off Diamond Junction Field-Effect Transistors With Submicrometer Channel," in IEEE Electron Device Letters, vol. 37, no. 2, pp. 209-211, Feb. 2016.

[17] H. Arbess, K. Isoird, S. Hamady, M. Zerarka, D. Planson, Original Field Plate to Decrease the Maximum Electric Field Peak for High-Voltage Diamond Schottky Diode, IEEE Trans. Electron Devices. 62 (2015) 2945–2951.

[18] A. Marechal, N. Rouger, JC. Crebier, J. Pernot, S. Koizumi, T. Teraji, E. Gheeraert, "Diamond bipolar device simulation", IEEE WipDa 2013. Oct 2013 - Columbus USA.

[19] S. Koizumi, T. Makino, in: R.P. Mildren, J.R. Rabeau (Eds.), Optical Engineering of Diamond, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany , pp. 177–208, 2013.