

# Conception de diodes TMBS haute tension (6kV) en diamant

Ralph MAKHOUL<sup>1,2</sup>, Karine ISOIRD<sup>2</sup>, Luong Viet PHUNG<sup>1</sup>, Dominique PLANSON<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ Lyon, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Ampère, F-69621, Villeurbanne, France

<sup>2</sup> LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

**RESUME** - Cet article présente la première étape de conception de diode TMBS (Trench MOS Barrier Schottky) 6 kV en diamant. Le choix du diélectrique de la TMBS se révèle être crucial pour obtenir le claquage dans le diamant et atteindre les performances électriques visées. Les résultats des simulations TCAD 2D montrent l'influence des paramètres technologiques et géométriques sur la tenue en tension de la diode TMBS. L'analyse de ces résultats révèle une profondeur de gravure de la tranchée 'd' optimale pour obtenir la tension de claquage la plus élevée et profiter de l'auto-blindage qui est une particularité de la TMBS. Le dopage de la couche P a augmenté de  $7 \times 10^{15}$  à  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  pour la même tenue en tension de 5400 V à 300 K.

**Mots-clés**— Composants de puissance, diamant, TMBS, haute tension, TMBS, simulations TCAD, MOS, Schottky.

## 1. INTRODUCTION

Dans le contexte de la transition énergétique au profit des énergies décarbonées, on assiste au développement de convertisseurs adaptés aux réseaux HVDC. Ces convertisseurs nécessitent des composants actifs à semi-conducteur dont la tenue en tension visée est supérieure à 10 kV. Le diamant est un matériau prometteur pour les applications à très forte puissance, présentant des propriétés électriques et thermiques nettement supérieures au Si, SiC et GaN [1-2]. Les résultats de tenue en tension les plus impressionnants sont pour l'instant systématiquement obtenus lors de l'utilisation de composants latéraux. La transition sur des composants verticaux en diamant avec des tenues en tension élevées reste non mûre mais permet l'obtention des structures avec des densités de courant plus importantes [3]. Le but de cet article est de concevoir une diode TMBS verticale en diamant qui supporte une tenue en tension de 6000 V avec des densités de courant de  $1500 \text{ A/cm}^2$ . Des diodes TMBS en Si et SiC pour des tenues en tension entre 600 et 700 V à 300 K ont déjà été réalisées [4-5], présentant ainsi des limites d'exploitation en fonction de la tenue en tension. Le diamant présentant un compromis  $R_{on} \cdot S/BV$  250 fois plus important que le Si et 10 fois plus que le SiC [6], permet d'avoir une diode TMBS dont la tenue en tension est supérieure à 700 V. Des simulations TCAD sont

faites, pour concevoir une diode TMBS diamant, et étudier le comportement électrique de cette structure en fonction de ses paramètres géométriques et technologiques, afin de déterminer la structure optimale qui supporte une tenue en tension de 6 kV à température ambiante.

## 2. SIMULATIONS TCAD DE DIODES TMBS

### 2.1. Principe de fonctionnement de diode TMBS

La spécificité de la TMBS est une tranchée dans laquelle est déposée une couche de diélectrique. L'ajout du diélectrique permet de réaliser une structure métal- oxyde-semi-conducteur (MOS) dans le fond et sur les flancs de la tranchée (Fig. 1). En appliquant une polarisation inverse au niveau de l'anode, une zone de charge d'espace (ZCE) s'étend verticalement sous le contact Schottky mais également latéralement avec l'effet MOS. À partir d'une certaine polarisation les deux zones de désertion latérales se rejoignent : les vecteurs champs électriques de même norme mais de sens opposé s'annulent et conduisent au phénomène d'auto-blindage qui met le contact Schottky à l'abri des forts champs électriques et empêche le claquage du composant sous le contact [7].

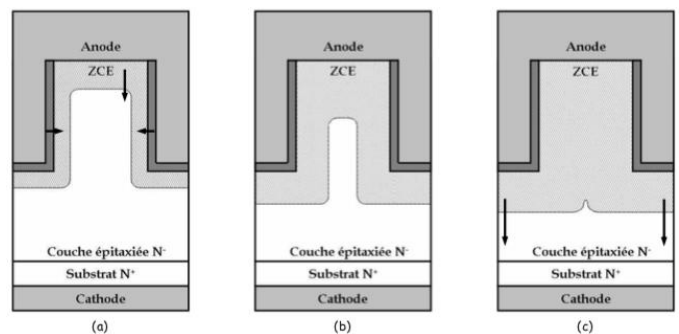


Fig. 1 : Effet de la polarisation inverse dans l'étalement de la ZCE (zone de charge d'espace) [8].

- (a) Étalement de la ZCE à faible polarisation.
- (b) Étalement de la ZCE à plus haute polarisation.
- (c) **Auto-blindage** à forte polarisation.

### 2.2. Les coefficients d'ionisation par impact du diamant

Le fichier de paramètres du diamant a été créé puis complété en se basant sur des résultats de caractérisations physiques et sur des données issues de la littérature. À l'aide de ces données, on

remplit par exemple le modèle de mobilité, l'affinité électronique du diamant, le gap et son comportement avec la température et le niveau de dopage, les coefficients d'ionisation ou encore les masses effectives des porteurs [2]. Les coefficients d'ionisation par impact du diamant sont des paramètres clés pour déterminer avec précision la tenue en tension de chaque structure, ils permettent de calculer le nombre de porteurs générés par avalanche.

Le modèle de coefficient d'ionisation par impact utilisé est le modèle de Van Overstraeten de Man, qui est basé sur la loi de Chynoweth :

$$\alpha_{n,p}(E_{ava}) = \gamma \cdot a_{n,p} \exp \frac{-\gamma \cdot b_{n,p}}{E_{ava}} \quad (\text{eq.1}) [9]$$

L'équation ci-dessus (eq.1), décrit la dépendance des coefficients d'ionisation par impact ( $a_{n,p}, b_{n,p}$ ) en fonction du champ électrique et  $\gamma$  décrit leur dépendance en fonction de la température. A ce jour aucune étude expérimentale n'a été menée pour déterminer les coefficients d'ionisation du diamant. Plusieurs valeurs peuvent être relevées dans la littérature mais elles ont été déterminées théoriquement. Les valeurs données par Rashid *et al.* en 2006 [10] ont été extrapolées des valeurs des coefficients d'ionisation du Si et du SiC. Celles déterminées par l'équipe de Kawarada [11] en 2015 sont extraites de tenue en tension expérimentale de diverses structures relevées dans la littérature. Nous avons décidé d'utiliser ces dernières pour nos simulations.

### 2.3. Simulations 1D sur une diode Schottky plane infinie en diamant type p

Des simulations 1D sont réalisées sur une diode Schottky en diamant type P, pour déterminer le compromis 'dopage/épaisseur' de la couche P nécessaire pour avoir une tenue en tension de 6000 V à 300 K. D'après la figure 2, la tension de claquage idéale est obtenue pour une gamme de dopage et d'épaisseur très limitée : dopage ( $5.10^{15}$ - $6.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) et épaisseur (20 - 25  $\mu\text{m}$ ).

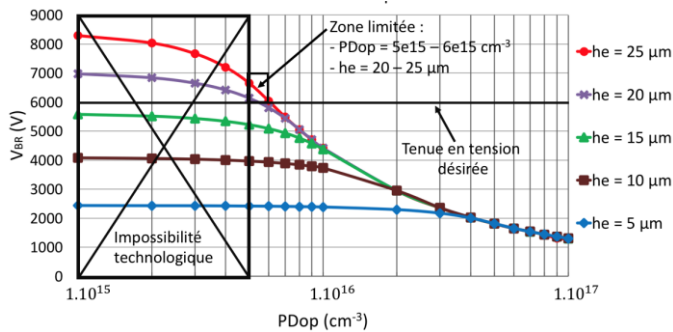


Fig. 2 : Variation de la tenue en tension en fonction du dopage pour différentes épaisseurs 'he' de la couche P à 300 K.

En optimisant les paramètres de la structure TMBS la tenue en tension visée doit être obtenue en augmentant le dopage de la couche P- et/ou en diminuant l'épaisseur de la couche P- ce qui permet de diminuer la résistance spécifique à l'état passant.

## 2.4. Simulations 2D sur la TMBS en diamant type p

### 2.4.1. Structure simulée

La figure 3, représente la structure simulée de la TMBS, avec les paramètres géométriques et technologiques correspondants. Les simulations sont réalisées pour une demi-structure, prenant ainsi en compte la continuité de symétrie de potentiel ce qui permet de diminuer le temps de calcul. Des paramètres ont été fixés comme le dopage et l'épaisseur de la couche fortement dopée (P+), ne présentant aucune influence sur le comportement électrique de la structure et sont choisis pour obtenir la résistance la plus faible de cette couche. Nous avons fait varier les autres paramètres pour comprendre leur influence sur la tenue en tension et déterminer la structure optimale. Les critères d'arrêt pour les simulations à l'état inverse sont : un courant de  $10^{-6}$  A et le champ critique du diamant de 10 MV/cm.

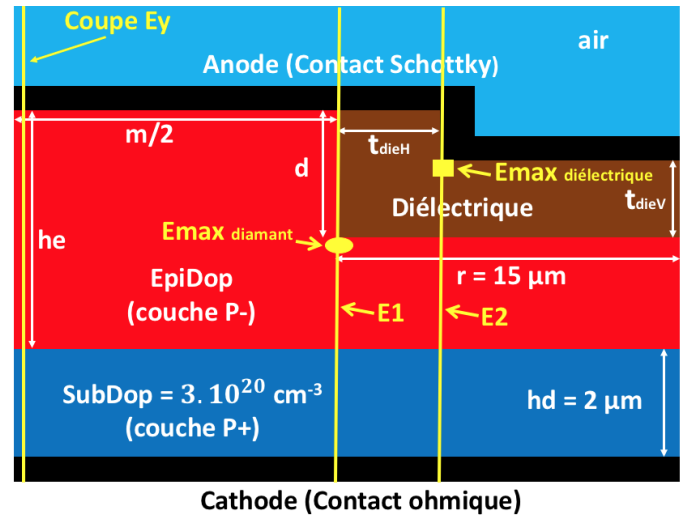


Fig. 3 : Demi-structure simulée de la TMBS avec les différents paramètres géométriques et technologiques, E1 et E2 sont les coupes verticales pour déterminer les positions du champ électrique maximal dans le diamant et le diélectrique respectivement au moment du claquage à 300 K.

### 2.4.2. Etude de l'influence des paramètres technologiques du diélectrique sur la répartition du champ électrique

Dans un premier temps, le  $\text{SiO}_2$  est utilisé comme étant le diélectrique pour la tranche. La figure 4, montre la variation de la tenue en tension en fonction de la demi-largeur de la mèse 'm/2' en fixant les paramètres suivants : les mêmes épaisseurs verticales et horizontales du diélectrique ' $t_{\text{dieH}} = t_{\text{dieV}}$ ' et la profondeur de gravure 'd'. La tenue en tension maximale est obtenue pour  $m/2 = 0,25 \mu\text{m}$ . En étudiant la répartition du champ électrique dans la structure TMBS au moment du claquage, nous constatons que le champ électrique maximum se situe au pied de la tranche dans le  $\text{SiO}_2$ , ceci est dû au resserrement des lignes de potentiel au fond de la tranche. Cette valeur est égale au champ de rupture du  $\text{SiO}_2$  (8 MV/cm) [12] et elle est atteinte pour des tensions inférieures à la tension d'auto-blindage limitant de fait la tenue en tension de la structure. Plusieurs simulations sont réalisées en faisant varier l'épaisseur du diélectrique, la profondeur de gravure et le dopage, la tenue en tension obtenue est inférieure à la tension d'auto-blindage de la TMBS.

Une première piste est envisagée pour limiter le champ électrique au pied de la tranchée, c'est de faire varier indépendamment les épaisseurs horizontales et verticales du diélectrique. Sur la figure 5, la courbe bleue montre la variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur horizontale ' $t_{dieH}$ ' pour une épaisseur verticale fixée ' $t_{dieV} = 0,4 \mu m$ '. On peut remarquer qu'en augmentant ' $t_{dieH}$ ', la tenue en tension est dégradée par un claquage prématuré dans le diélectrique due au resserrement des lignes équipotentielles au pied de l'angle dans le diélectrique, comme on peut le voir dans la figure 6 en passant du cas (a) au cas (c). En revanche, la courbe en rouge montre la variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur verticale ' $t_{dieV}$ ' pour une épaisseur horizontale fixée ' $t_{dieH} = 0,4 \mu m$ '. On peut constater qu'en augmentant ' $t_{dieV}$ ', la tenue en tension augmente grâce à l'étalement des lignes équipotentielles dans le diélectrique avec pour conséquence la diminution du stress dans le diélectrique, comme on peut le voir en passant du cas (d) au cas (f). La variation des épaisseurs ( $t_{dieH}$  et  $t_{dieV}$ ) du diélectrique a un effet majeur sur la répartition des lignes équipotentielles. Les simulations montrent qu'on a intérêt à travailler avec une faible épaisseur horizontale ' $t_{dieH}$ ' et à augmenter l'épaisseur verticale ' $t_{dieV}$ ', pour limiter le stress dans le diélectrique. Pour les simulations suivantes l'épaisseur horizontale ' $t_{dieH}$ ' sera fixée à  $0,05 \mu m$ . Le choix des épaisseurs se révèle très important pour l'augmentation de la tension de claquage, mais ne résout toujours pas le problème majeur de l'obtention d'une tension supérieure à la tension d'auto-blindage. Pour pallier ce problème plusieurs diélectriques sont testés pour évaluer leurs propriétés électriques ( $\epsilon_r$  : permittivité relative et  $E_g$  : largeur de la bande interdite) sur la répartition des lignes équipotentielles et du champ électrique maximal au moment du claquage.

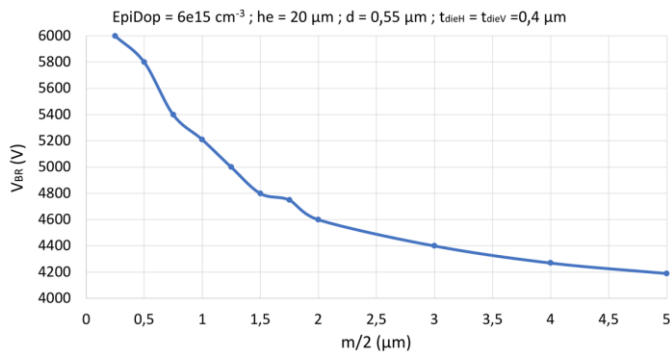


Fig. 4 : Variation de la tenue en tension en fonction de  $m/2$  à 300 K.

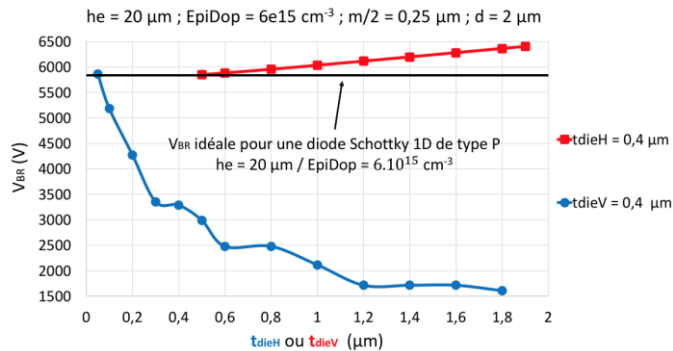


Fig. 5 : Variation de la tenue en tension en fonction de  $t_{dieH}$  ou  $t_{dieV}$  pour  $t_{dieV} = 0,4 \mu m$  (courbe en Blue) et  $t_{dieH} = 0,4 \mu m$  (courbe en Rouge) respectivement à 300 K.

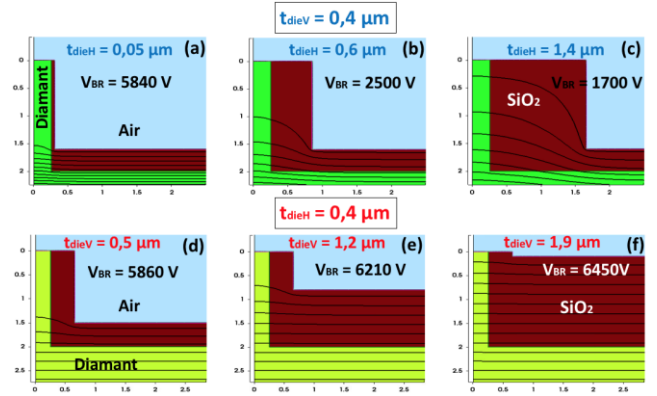


Fig. 6 : Représentation des lignes équipotentielles au moment du claquage en fonction de  $t_{dieH}$  ou  $t_{dieV}$  pour  $t_{dieV} = 0,4 \mu m$  (Blue) et  $t_{dieH} = 0,4 \mu m$  (Rouge) respectivement à 300 K

La figure 7 montre la variation de la tenue en tension en fonction de la demi-largeur ' $m/2$ ' pour différents diélectriques utilisés. On peut constater qu'avec l'oxyde d'Hafnium ' $HfO_2$ ', la tenue en tension varie en fonction de ' $m/2$ ' et alors qu'avec les autres diélectriques la tenue en tension ne change pas. De même, en faisant varier la concentration de dopage, l'épaisseur verticale du diélectrique et la profondeur de gravure, la tension de claquage varie avec le ' $HfO_2$ ' et reste invariable pour les 3 autres diélectriques. La figure 8 montre la répartition du champ électrique maximal au moment du claquage, le claquage avec le ' $HfO_2$ ' a lieu dans le diamant pour un champ maximal de 10 MV/cm situé au pied de la tranchée, par contre avec le ' $Si_3N_4$ ' le claquage est dans le diélectrique et se trouve au pied de l'angle de celui-ci, alors que la valeur maximale du champ dans le diamant reste très inférieure au 10 MV/cm. De même avec le ' $SiO_2$ ' et le ' $Al_2O_3$ ' le claquage a lieu au pied de l'angle dans le diélectrique. Le choix du diélectrique se révèle crucial pour obtenir l'auto-blindage, avoir le claquage dans le diamant et optimiser les paramètres technologiques de la TMBS.

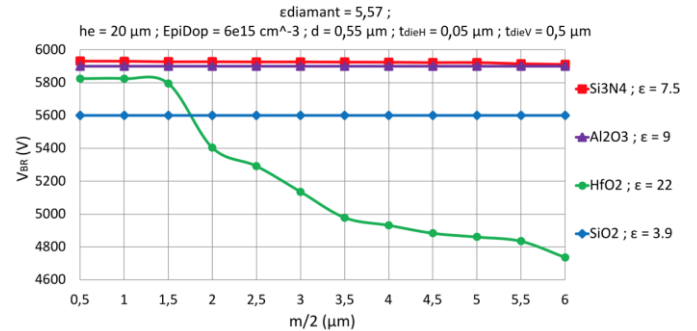


Fig. 7 : Variation de la tenue en tension en fonction de  $m/2$  à 300 K pour différentes permittivités du diélectrique.

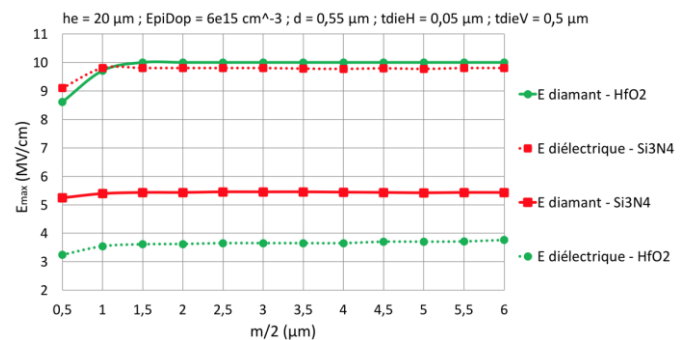


Fig. 8 : Variation du champ électrique maximal en fonction de  $m/2$  dans le diamant et dans le diélectrique au moment du claquage à 300 K.

### 2.4.3 Etude de l'influence des paramètres sur le comportement électrique de la TMBS

Dans un premier temps, nous avons étudié l'influence des trois paramètres technologiques primaires ' $m/2$ ', ' $d$ ' et ' $t_{dieV}$ ' sur l'auto-blindage pour une couche P d'épaisseur ' $he = 20 \mu m$ ' et de dopage ' $EpiDop = 1.10^{16} cm^{-3}$ '. Le dopage de la couche P est fixé à  $1.10^{16} cm^{-3}$  pour des raisons technologiques. Le diélectrique utilisé est de l'oxyde d'Hafnium  $HfO_2$  et l'épaisseur horizontale de la tranchée du diélectrique est  $t_{dieH} = 0,05 \mu m$ .

La figure 9, montre la variation de la tenue en tension en fonction de la profondeur de gravure ' $d$ ' pour différentes demi-largeurs ' $m/2$ '. On peut remarquer qu'il existe un compromis entre ' $d$ ' et ' $m/2$ ' où la tenue en tension est la plus élevée. Pour  $m/2 \leq 0,85 \mu m$ , l'auto-blindage est non optimal et se fait au fond de la mésa, ceci est dû au resserrement des lignes de potentiel au pied de la tranchée générant ainsi un claquage dans le diélectrique. Pour  $m/2$  compris entre  $0,85$  et  $1 \mu m$ , l'auto-blindage est optimal et se produit au milieu de la mésa et nous permet d'avoir la tension de claquage désirée. Pour  $m/2 > 1 \mu m$ , l'auto-blindage n'est plus optimal car il a lieu en dessous du contact Schottky, induisant ainsi un courant de fuite important en dessous du contact et un claquage prématuré. En faisant varier l'épaisseur verticale du diélectrique et la concentration du dopage, on obtient l'auto-blindage optimal pour le même compromis optimal ' $m/2$ ' et ' $d$ ' mais pour des valeurs différentes de tension en claquage. La variation du module du champ électrique suivant la coupe  $E_y$  pour  $m/2 = 1 \mu m$  et différentes ' $d$ ' est présentée dans la figure 10, on peut constater que pour ' $d = 6 \mu m$ ' la valeur du champ électrique est la plus élevée et la surface de sa répartition est la plus importante justifiant ainsi la tenue en tension la plus élevée. De même en augmentant ' $d$ ', le champ au-dessous de l'anode diminue et il est nul tout au long de la profondeur de la mésa impliquant ainsi l'avantage de l'auto-blindage qui protège le contact Schottky des forts champs électriques.

Après une série de simulations de la tenue en tension en fonction de la profondeur de gravure ' $d$ ' pour différentes demi-largeurs ' $m/2$ ', l'auto-blindage optimal est obtenu pour les paramètres suivants ' $m/2 = 0,85 \mu m$ ' et ' $d = 5,8 \mu m$ '. La résistance spécifique à l'état passant pour ces paramètres optimaux est  $21,2 m\Omega.cm^2$  à  $300 K$ . L'influence de ' $d$ ' sur la résistance spécifique est négligeable, mais pour ' $d = 5,8 \mu m$ ' on la tenue en tension la plus élevée ce qui implique un meilleur compromis  $BV/R_{on}$ .S

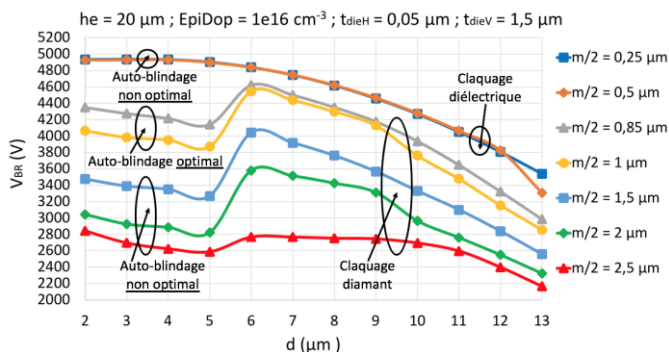


Fig. 9 : Variation de la tenue en tension en fonction de ' $d$ ' pour différentes demi-largeurs ' $m/2$ ' à  $300 K$ .

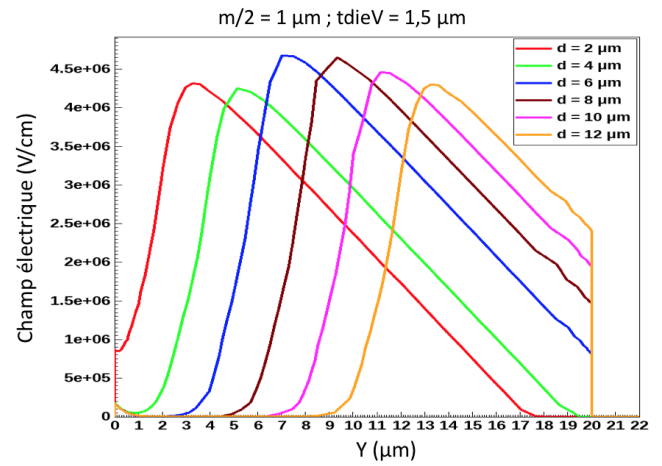


Fig. 10 : Coupe verticale  $E_y$  du champ électrique en fonction de  $Y$  à  $300 K$  (Coupe  $E_y$  voir figure 3).

La figure 11, montre la variation de la tenue en tension en fonction de l'épaisseur verticale du diélectrique  $t_{dieV}$ . On peut constater que la tenue en tension augmente avec  $t_{dieV}$ , cette augmentation provient d'une tension cumulée au sein du diélectrique. Pour l'épaisseur verticale du diélectrique retenue de  $5,25 \mu m$ , on a une diode TMBS dont la tension de claquage est de  $5400 V$  à  $300 K$  pour une couche P dont le dopage a augmenté de  $7.10^{15} cm^{-3}$  à  $1.10^{16} cm^{-3}$ , diminuant ainsi la résistance spécifique à l'état passant jusqu'à la moitié en passant de  $68 m\Omega.cm^2$  à  $33 m\Omega.cm^2$ . Au-delà de cette épaisseur  $5,25 \mu m$  de diélectrique, la structure n'est plus de type TMBS (Plus de désertion latérale liée à la couche de diélectrique déposée dans la tranchée) mais de type diode Schottky dont la protection périphérique est une tranchée remplie de diélectrique combinée à une plaque de champs. Pour la structure retenue dont la tenue en tension est de  $5400 V$ , la répartition du champ électrique est trapézoïdale, augmenté l'épaisseur ' $he$ ' de la couche P permet d'obtenir une répartition du champ électrique triangulaire et ainsi se rapprocher des  $6000V$  visé sans trop dégradé la résistance à l'état passant.

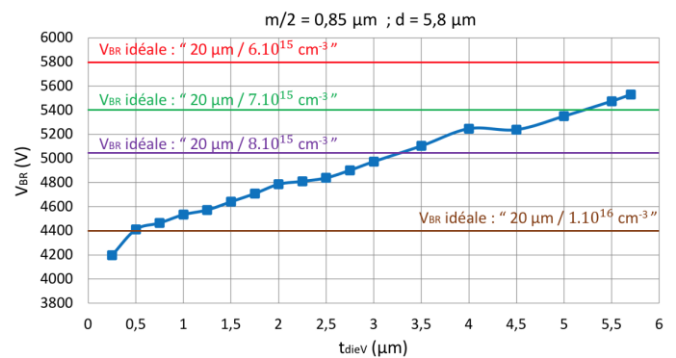


Fig. 11 : Variation de la tenue en tension en fonction de ' $t_{dieV}$ ' à  $300 K$ .

### 3. CONCLUSION

Les premières simulations TCAD pour concevoir une diode TMBS  $6kV$  en diamant ont mis en évidence l'importance du choix du diélectrique, qui doit avoir une permittivité largement supérieure à celle du diamant est nécessaire pour obtenir le claquage dans le diamant et d'optimiser ainsi les paramètres technologiques de la TMBS. Les nombreuses simulations effectuées ont montré que le  $HfO_2$  est le diélectrique le plus adapté.

Une tenue en tension maximale de 5400V est obtenue avec les paramètres technologiques suivants : un compromis ' $t_{he} = 20 \mu\text{m}$ ' / ' $\text{EpiDop} = 1.10^{16}\text{cm}^{-3}$ ',  $d = 5,8 \mu\text{m}$ ', ' $m/2 = 0,85 \mu\text{m}$ ' et ' $t_{\text{diev}} = 5,25 \mu\text{m}$ '. On a augmenté ainsi le dopage de la couche P de  $7.10^{15}$  à  $1.10^{16}\text{cm}^{-3}$ , diminuant ainsi la résistance spécifique à l'état passant de moitié en passant de  $68 \text{m}\Omega.\text{cm}^2$  à  $33 \text{m}\Omega.\text{cm}^2$  à 300 K.

Des simulations en prenant en compte des charges fixes et mobiles dans le diélectrique, permettront de compléter cette étude afin d'évaluer l'effet de ces charges sur la tenue en tension et le courant de fuite de la TMBS diamant.

#### 4. REFERENCES

- [1] Sodjan Koné, « Développement de briques technologiques pour la réalisation des composants de puissance en diamant monocristallin », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2011.
- [2] Fabien Thion, « Conception de protections périphériques applicables aux diodes Schottky réalisées sur diamant monocristallin », Thèse de doctorat, École doctorale EEA de Lyon, 2012.
- [3] W. Huang, et al., « High voltage diamond schottky rectifiers », International Journal of High Speed Electronics and Systems, vol. 14, pp. 872–878, 2004.
- [4] K.W.Chu et al., « An improvement of trench profile of 4H-SiC Trench MOS Barrier Schottky (TMBS) Rectifier », Materials Science Forum, vol.740-742, p.687-690,2013.Avr.
- [5] C.T.Yen et al., « Characteristics of 4H-SiC Dual-Metal and MOS Trench Schottky Rectifiers », CS MANTECH Conference, Avr.2016.
- [6] N. Rouger and A. Maréchal., « Design of Diamond Power Devices: Application to Schottky Barrier Diodes », Energies, vol.12, p.2387, 2019.
- [7] M. Mehrotra and B.J. Baliga, « The Trench MOS Barrier Schottky (TMBS) Rectifier », Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting, 1993.
- [8] Loïc Theolier, « Conception de transistors MOS haute tension (1200 Volts) pour l'électronique de puissance », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2008.
- [9] Synopsys. Sentaurus device guide.
- [10] S.J. Rashid and A. Tajani, « Modeling of single-crystal diamond Schottky diodes for high- voltage applications », Diamond and Related Materials, vol. 15, issue 2-3, p.317-323, 2006.
- [11] A. Hiraiwa and H. Kwarada, «Blocking characteristics of diamond junctions with a punch- through design », Journal of Applied Physics, vol. 117, no. 12, p. 124503, Mar. 2015.
- [12] Helene Bordeneuve, « Caractérisations capacités silicium », Post-doc, LAAS-CNRS Toulouse, 2009.