

Optimisation de la diode à Superjonction à tranchées profondes pour des applications à 600V

Sylvain NOBLECOURT^{1,2}, Josiane TASSELLI^{1,3}, Frédéric MORANCHO^{1,2}, Karine ISOIRD^{1,2}, Patrick AUSTIN^{1,2}
Pascal DUBREUIL^{1,3}, Aurélie LECESTRE^{1,3}

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

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

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

RESUME - L'objectif de ce papier est de présenter l'optimisation et la réalisation d'une diode à Superjonction et à tranchées profondes et de sa terminaison (DT-SJDiode) pouvant tenir des tensions de 600 V à l'état bloqué. Nous étudions l'influence des paramètres technologiques et géométriques sur la tenue en tension à partir de simulations effectuées sous Sentaurus TCAD. Des travaux précédents ont permis de valider certaines étapes technologiques et de dégager un procédé de fabrication pour des applications à 1200V. Il s'agit ici d'optimiser ces différentes étapes qui influent sur les paramètres électriques (verticalité des tranchées, remplissage des tranchées de terminaison de jonction, ...) pour des applications à 600V.

Mots-clés—Diode à Superjonction—Terminaison à tranchées profondes—BenzoCycloButène

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, le principal concurrent de l'IGBT pour des tenues en tension allant jusqu'à 600V est le MOSFET. En effet, ce dernier présente de très bonnes caractéristiques pour les applications de puissance à fréquence élevée mais, pour des tenues en tension plus élevées, il est limité par sa résistance à l'état passant. Afin de réduire cette dernière tout en conservant l'avantage des structures unipolaires, à savoir des commutations rapides, beaucoup de recherches ont été effectuées. Ces dernières ont abouti au concept de Superjonction, mis en œuvre notamment dans des MOSFET par les sociétés Infineon et ST-Microelectronics. L'inconvénient de ces structures est d'être fabriquées à partir d'une technologie multi-épitaxiée particulièrement onéreuse. [1, 2].

Notre objectif est donc de mettre en place une technologie à Superjonction avec une seule étape d'épitaxie. Cette technologie est bâtie à partir de tranchées profondes dont il faut maîtriser à la fois le remplissage par un diélectrique et le dopage des flancs de gravure à l'aide d'une implantation. Avant de réaliser un MOSFET à Superjonction, nous avons choisi de concevoir un véhicule test de type diode à Superjonction à tranchées profondes (DT-SJDiode) pour des applications 600 V.

Dans un premier temps, la conception et l'optimisation de ce véhicule test seront réalisées à partir de simulations effectuées à l'aide du logiciel Sentaurus. L'objectif est de déterminer les valeurs des paramètres physiques et géométriques permettant d'obtenir le meilleur compromis « tenue en tension/ résistance passante ». En effet, l'avantage premier de la Superjonction est qu'elle permet à la fois de dépasser la limite silicium et d'obtenir un des meilleurs ratio tenue en tension/résistance passante.

Dans un second temps, nous présenterons les premiers résultats technologiques autour des points critiques de notre technologie qui concernent les tranchées profondes, à savoir la maîtrise de la verticalité, le dopage sur les flancs et le remplissage par un diélectrique.

2. DEFINITIONS ET PRINCIPES

2.1. Présentation de la structure

Une coupe transversale de notre véhicule test (DT-SJDiode) est représentée sur la **Figure 1**. Elle est basée sur des cellules élémentaires permettant de mettre en œuvre le principe de Superjonction [3], à savoir une alternance de régions N et P dans le volume. Afin d'assurer la tenue en tension maximale, les Superjonctions sont protégées en périphérie de la zone active à l'aide d'une technique de garde développée au laboratoire [4] Elle est structurée à partir d'une tranchée large et profonde remplie de diélectrique terminée en surface par une plaque de champ. L'utilisation de la gravure profonde pour l'obtention de la Superjonction permet donc d'éviter la mise en œuvre d'épitaxies multiples. Les régions P⁺ sont réalisées sur les flancs des tranchées par implantation ionique de Bore par immersion plasma (PIII). Ces dernières sont ensuite remplies par un diélectrique, le BCB (Cyclotene 4026-46) [5] dont les paramètres électriques (champ critique de 5,3 MV.cm⁻¹ et constante diélectrique de 2,65) permettent d'assurer l'efficacité de la terminaison de jonction.

Les paramètres de l'optimisation de la structure qui vont être étudiés sont : la profondeur de jonction D_T , la dose de Bore à planter pour obtenir les régions P⁺, le dopage de la zone

épitaxiée N⁻, ainsi que l'espacement entre deux tranchées centrales voisines W_N.

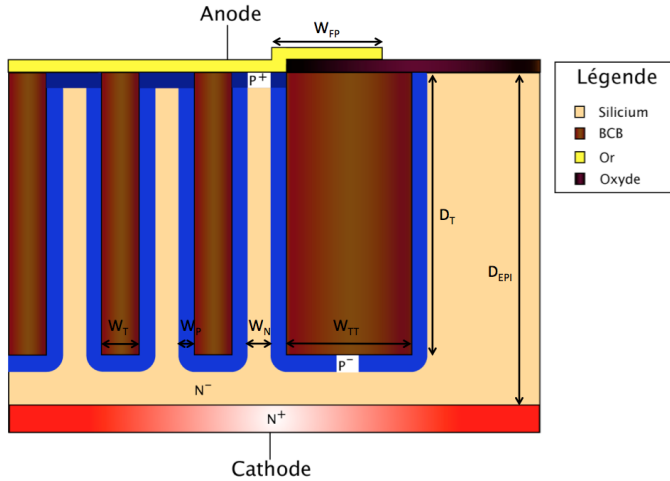


Figure 1 : Coupe transversale de la diode à Superjonction à tranchées profondes.

2.2. Etude du compromis "tenue en tension/résistance à l'état passant"

L'ensemble des paramètres physiques et géométriques influence à la fois la tenue en tension et la résistance passant. Afin d'obtenir le meilleur compromis possible, nous avons choisi d'optimiser dans un premier temps la résistance à l'état passant afin de regarder l'impact sur la tenue en tension.

La résistance à l'état passant est essentiellement due à la résistance de drift. Pour un dopage donné, cette dernière peut être ramenée à un simple barreau de silicium de type N dont la largeur est W_N et la longueur D_{EPI} et, de manière plus significative, de la profondeur D_T des tranchées. La Figure 2 montre les variations de la résistance en fonction de D_T pour différentes valeurs de W_N. Une diminution de D_T ou une augmentation de W_N entraîne naturellement une diminution de la résistance.

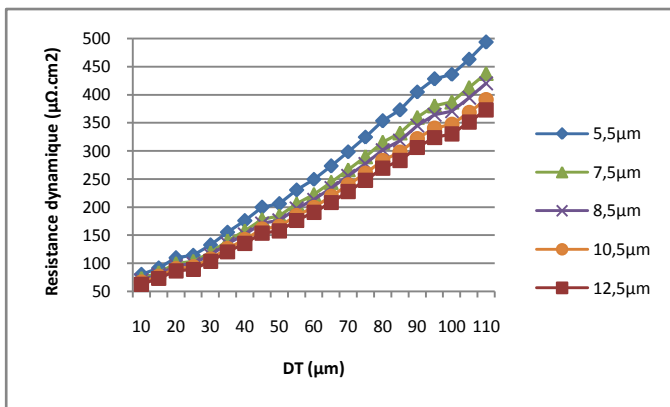


Figure 2 : Résistance dynamique d'une cellule élémentaire en fonction des paramètres W_N et D_T

Dans le cas d'une Superjonction correctement optimisée, la profondeur D_T est le paramètre permettant de jouer sur la tenue en tension maximale. La Figure 3 montre la variation de la tenue en tension en fonction de D_T. Plus la profondeur D_T augmente et plus la zone de charge d'espace augmentera. Cela a comme conséquences, l'augmentation de la circulation du champ électrique et donc l'augmentation de la tenue en tension.

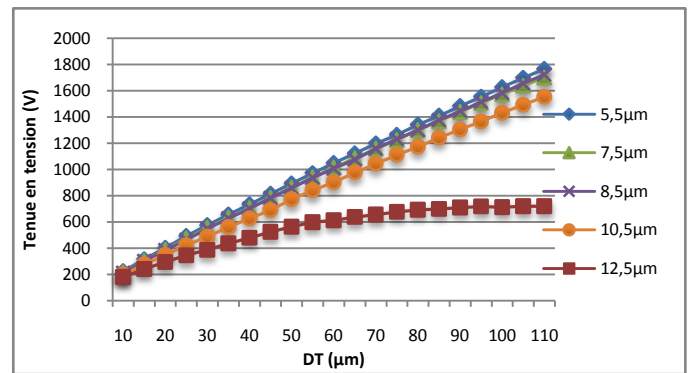


Figure 3 : Variation de la tenue en tension en fonction de la profondeur de jonction D_T pour différentes valeurs de W_N

En corrélant les données de la Figure 2 et de la Figure 3, on peut déterminer les paramètres W_N et D_T qui permettront d'obtenir le meilleur rapport tenue en tension/résistance passant. On peut voir sur la Figure 4 la pour différentes tenues en tension souhaitées, l'évolution de la résistance à l'état passant pour différentes largeurs inter tranchées. On note que pour une valeur de W_N 8,5 µm, la résistance à l'état passant présente la valeur la plus faible pour une tenue en tension de 600 V.

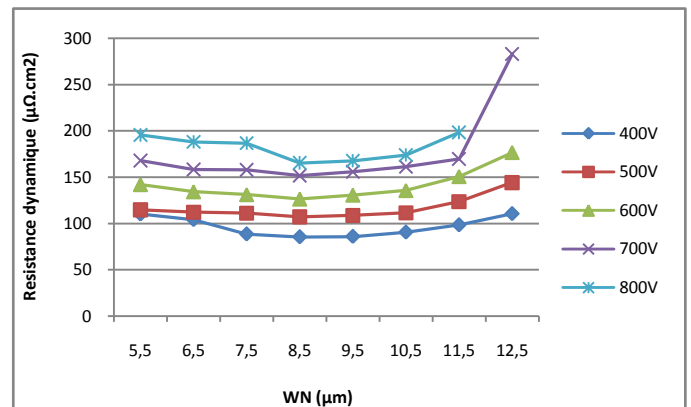


Figure 4 : Résistance dynamique en fonction de W_N pour différentes tenue en tension

L'équilibre latéral des charges entre les régions N et P est important pour le bon fonctionnement de la Superjonction et donc pour l'obtention d'une tenue en tension optimale. L'équation (1) rend compte de cet équilibre dans le cas de profils de dopage constants. Les couples (W_N ; N_D) et (W_P ; N_A) représentent les largeurs et dopages des régions N et P respectivement.

$$W_N \cdot N_D = W_P \cdot N_A \quad (1)$$

La théorie du principe de Superjonction montre qu'une augmentation de la largeur W_N permet naturellement une diminution de la résistance à l'état passant. Cependant, afin de maintenir efficiente la Superjonction, il est nécessaire, comme le montre l'équation (1), de réajuster les autres paramètres.

3. OPTIMISATION DES PARAMETRES

3.1. Etude de la Dose P⁺

Si on augmente W_N , il faut donc augmenter la dose P^+ à implanter autour des tranchées pour conserver l'équilibre des charges. Cependant, la tenue en tension devient alors plus sensible à un déséquilibre par rapport à la dose optimale : l'étape d'implantation devient plus critique puisque quelques pourcents d'écart par rapport à la dose optimale à implanter font chuter drastiquement la tenue en tension, comme cela est indiqué sur la **Figure 5**. Cette dernière présente la tenue en tension obtenue pour des variations de dose P^+ autour de la dose optimale pour différentes valeurs de W_N . Grâce à l'équation (1), nous déterminons que si la largeur W_N augmente, il est nécessaire, pour conserver l'équilibre, d'augmenter la Dose P^+ d'implantation pour augmenter le dopage N_A .

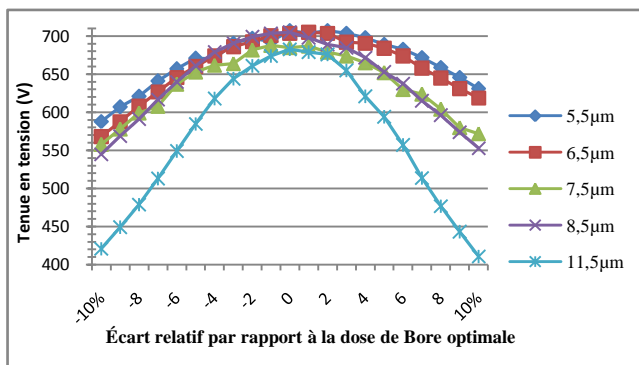


Figure 5 : Variations de la tenue en tension en fonction de l'écart par rapport à la dose de Bore optimale pour différentes valeurs de W_N

Il est à noter qu'avec notre technologie, ce respect des paramètres physiques et géométriques ne pourra être valide que si les flancs des tranchées sont verticaux. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe 4.4. Nous nous sommes donc intéressés au paramètre W_N et à la dose de Bore implanté qui sont fortement liés.

3.2. Optimisation du couple W_N / D_T

La profondeur des tranchées D_T est l'un des paramètres permettant de déterminer la tenue en tension maximale. En effet, plus la profondeur D_T augmentera, plus la zone de charge d'espace augmentera. Cela a, comme conséquences, l'augmentation de la circulation du champ électrique et donc l'augmentation de la tenue en tension.

Cependant la résistance à l'état passant R_{ON} augmentera elle aussi. Pour pouvoir obtenir une résistance R_{ON} la plus faible possible, deux choix s'offre à nous. Il est possible d'augmenter le dopage de la zone épitaxiée ou d'augmenter la largeur W_N . Pour la réalisation de la DT-SJDiode, nous avons fixé N_A à $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. La **Figure 3** montre l'impact de la variation de la profondeur de jonction sur la tenue en tension pour différentes valeurs d'espace inter tranchées. On peut en déduire la valeur de la profondeur de jonction minimale permettant d'obtenir une tenue en tension minimale de 600 V. On voit qu'effectivement, la variation de la tenue en tension est proportionnelle à la profondeur de la jonction D_T . On peut observer aussi que pour différentes valeurs de W_N , la pente de la courbe est différente. En effet, une des conditions pour que le concept de Superjonction fonctionne correctement est qu'il faut avoir D_T largement supérieur à W_N . On peut donc en déduire aussi que

pour obtenir une tenue en tension de 600 V, la valeur optimale de D_T va dépendre également de l'espace inter tranchée W_N .

L'intérêt évident d'augmenter W_N est de diminuer la résistance R_{ON} car l'on augmente la section de passage du courant (le ratio silicium/isolant augmente). Cependant la conséquence majeure de cette augmentation de W_N est l'augmentation de la dose d'implantation P^+ pour assurer le bon fonctionnement de la Superjonction car il faut que $W_N \ll D_T$. Si l'on fait varier W_N , il faut également réajuster les paramètres qui sont concernés par l'équilibre des charges (soit les paramètres présents dans l'équation 1). Etant donné que le dopage de la zone épitaxiée et la profondeur d'implantation sont fixes, le seul degré de liberté reste la dose d'implantation. De plus, au delà de $13 \mu\text{m}$, la zone de drift n'arrive plus à se dépléter entièrement sur l'axe horizontal. Ceci est dû à la largeur W_p qui, même en augmentant la dose P^+ , ne sera pas suffisamment importante. On pourrait augmenter la largeur de W_p , mais cela serait difficile car l'implantation PIII ne permet pas d'implanter profondément dans le silicium.

3.3. Terminaison de jonction

Pour la terminaison de jonction, les deux paramètres intéressants sont la largeur de la tranchée de terminaison W_{TT} et la longueur de plaque de champ W_{FP} , la profondeur D_T étant avant tout déterminée par les contraintes de la cellule élémentaire. Ils influent sur la tenue en tension et sur la valeur du champ électrique au point de claquage. La tenue en tension de la terminaison dépend avant tout du paramètre W_{TT} . Les simulations d'une diode plane avec la terminaison ont été réalisées dans le but de déterminer l'efficacité de cette dernière. Sur la **Figure 6**, on peut voir que l'efficacité atteint les 95 % à partir d'une largeur de tranchée de terminaison de $40 \mu\text{m}$.

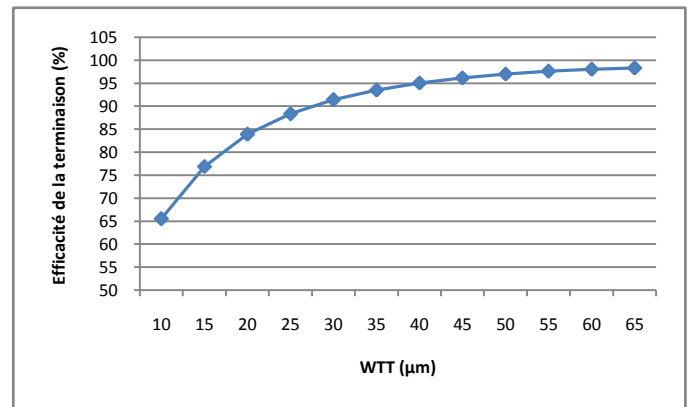


Figure 6 : Efficacité de la terminaison de jonction pour différentes valeurs de largeur de tranchée de terminaison W_{TT} pour une tenue en tension de 600V

Pour ce qui est du paramètre W_{FP} , plus on l'augmente, meilleure est la tenue en tension. Par contre, en augmentant W_{FP} , on resserre les lignes de champ et on augmente ainsi le champ critique au point de claquage. Cela a pour effet de créer un claquage prématuré. Ce n'est pas la longueur W_{FP} qui est importante mais le rapport entre W_{TT} et W_{FP} . On observe sur la **Figure 7** que, pour le rapport $W_{FP}/W_{TT} = 0.65$, on obtient un champ électrique au point de claquage d'environ $2.4 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$ et une tenue en tension proche de 700 V. Cela nous permet d'avoir une marge de manœuvre d'un point de vue tenue en tension mais également sur le champ électrique qui, pour rappel, ne doit pas dépasser 3 MV/cm sous peine d'un claquage prématuré dans l'air.

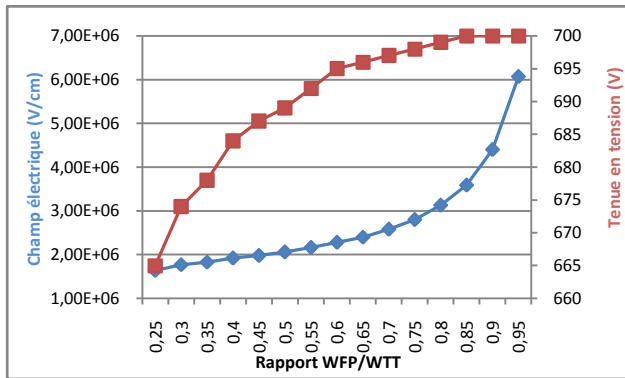


Figure 7 : Tenue en tension et Champ électrique maximum pour une variation du rapport W_{FP}/W_{TT}

3.4. Synthèse des résultats

D'après les diverses simulations précédemment effectuées, nous pouvons déterminer les paramètres de la structure pour une tenue en tension de 600 V. Nous observons qu'à 600 V, la résistance est minimale pour une largeur W_N de 8,5 μm . Si l'on se réfère à la **Figure 2**, le choix se porte sur la plus petite valeur de Dose P possible pour limiter les baisses de tenue en tension lié à une mauvaise précision de la Dose d'implantation. Le tableau 1 synthétise les différentes valeurs des paramètres qui seront retenues pour la structure optimale.

Tableau 1. Paramètres retenus pour la structure optimisée

Paramètres géométriques et technologiques	Structure optimisée
Dopage zone épitaxiée	$3.10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Dose P	$1,44.10^{12} \text{ cm}^{-2}$
W_N	8,5 μm
W_P	0,5 μm
D_T	33 μm
W_{TT}	40 μm
W_{FP}	6 μm
BV	603 V
Resistance Dynamique	126 $\mu\Omega.\text{cm}^2$

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

L'optimisation de la diode à Superjonction est liés à certains paramètres technologiques pouvant s'avérer critiques pour obtenir les performances électriques désirées: la verticalité des tranchées, l'implantation des zones de type P sur les flancs des tranchées et la maîtrise de leur remplissage par un diélectrique. Nous présentons les différents travaux menés afin de maîtriser ces différents paramètres.

4.1. Verticalité des tranchées

Afin d'assurer un parfait équilibre des charges entre les régions N et P, il est nécessaire d'optimiser la fabrication des tranchées profondes afin d'obtenir des flancs de gravure les plus verticaux possible avec une rugosité de surface la plus faible possible. La technique utilisée est la gravure ionique réactive profonde (DRIE), gravure anisotrope basée sur une succession d'étapes de gravure du Si par SF_6 et de passivation par C_4F_8 . Pour un temps de gravure fixé à 2 s nous avons fait varier le temps de passivation de 1,5 s à 6 s pour un débit fixé à 250 sccm. Le profil le plus vertical est obtenu pour un temps de passivation de 3,5 s, comme le montre la **Figure 8** pour des tranchées larges de 5 μm et profondes de 53 μm (temps de gravure de 25 min) : la différence de largeur entre le haut et le

bas de la tranchée est de 0,1 μm . Entre 1,5 s et 3 s, le profil de gravure est rentrant (haut de tranchée plus large que le bas) tandis qu'au delà de 3 s, le profil de gravure est sortant.

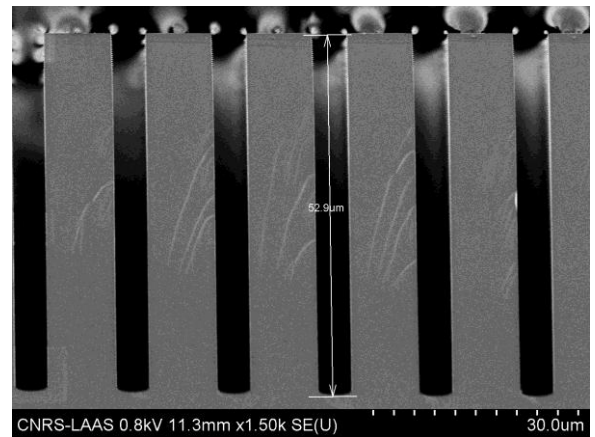


Figure 8 : Images MEB du profil de gravure obtenu avec un temps de passivation C_4F_8 de 3,5s pour des tranchées larges de 5 μm et profondes de 53 μm (temps de gravure: 25min).

Le principe même du procédé de gravure induit une forte rugosité de surface des parois de la tranchée appelée « scalloping » et caractérisée par une succession de pics pouvant atteindre des dimensions de 0,1 μm . Pour le procédé de fabrication que nous étudions, faisant appel à des implantations sur les flancs des tranchées, il est nécessaire de chercher à réduire ce phénomène. Pour ce faire nous effectuons une oxydation thermique du silicium de 260 nm après DRIE : cette étape consomme 100 nm de silicium. Après gravure humide de l'oxyde au buffer HF, le scalloping peut être réduit et devenir inférieur à 50 nm (**Figure 9**).

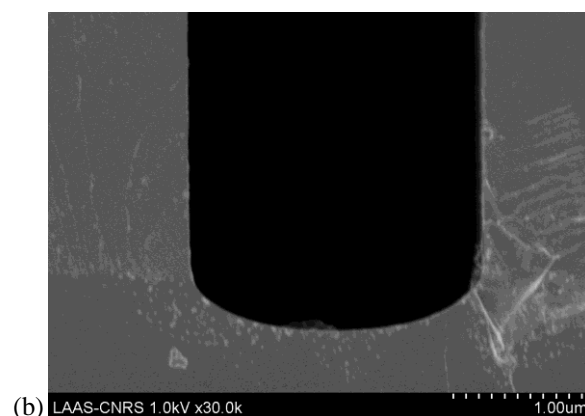
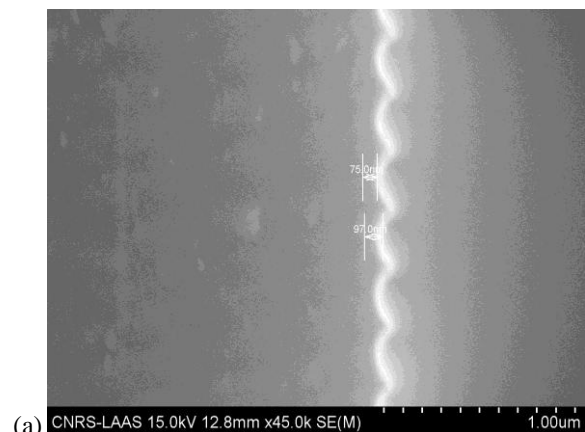


Figure 9 : Images MEB du flanc de tranchée après DRIE (a) et après oxydation de 260nm et attaque humide au buffer HF (b)

4.2. Réduction de l'effet "ARDE"

La technique de DRIE se caractérise par l'apparition de l'effet ARDE (Aspect Ratio Dependent Etching) à savoir une dépendance de la profondeur de gravure à la largeur d'ouverture. Pour notre structure, l'ouverture des terminaisons de jonction ($40\ \mu\text{m}$ pour une diode $600\ \text{V}$) étant plus importante que celle des cellules centrales ($6\ \mu\text{m}$), la vitesse de gravure est plus élevée pour les terminaisons. Par exemple, pour un temps de gravure de $25\ \text{min}$, on obtient des profondeurs de cellule centrale de $53\ \mu\text{m}$ alors que dans les tranchées de terminaison, on avoisine les $95\ \mu\text{m}$. D'un point de vue électrique, cela ne pose aucun problème pour la tenue en tension car la terminaison sort de la zone épitaxiée et ne perturbe pas l'équilibre des charges. Cependant si les tranchées sont trop profondes, le remplissage des tranchées avec le diélectrique devient problématique.

Nous avons mis au point un procédé qui permet d'obtenir une même profondeur de gravure quelle que soit l'ouverture. Nous utilisons un masquage par du SiO_2 uniquement dans les tranchées les plus larges, cet oxyde agissant en tant que retardateur de gravure. Nous avons étudié le cas de tranchées de terminaison larges de $40\ \mu\text{m}$ et $80\ \mu\text{m}$. Les tranchées centrales sont, quant à elle, larges de $6\ \mu\text{m}$ et ne sont pas masquées par un oxyde. La **Figure 10** montre les résultats obtenus pour des épaisseurs d'oxyde de $300\ \text{nm}$ (Figure 10.a) et $1,6\ \mu\text{m}$ (Figure 10.b) et un temps de gravure de $65\ \text{min}$. Les écarts de profondeur de gravure obtenus pour les différentes largeurs de tranchée sont reportés dans le **Tableau 2**. Plus l'oxyde de masquage est épais, moindre est l'écart de gravure entre les tranchées ayant une ouverture différente. Il est à noter que l'oxyde en surface ne nuit pas à la verticalité des tranchées.

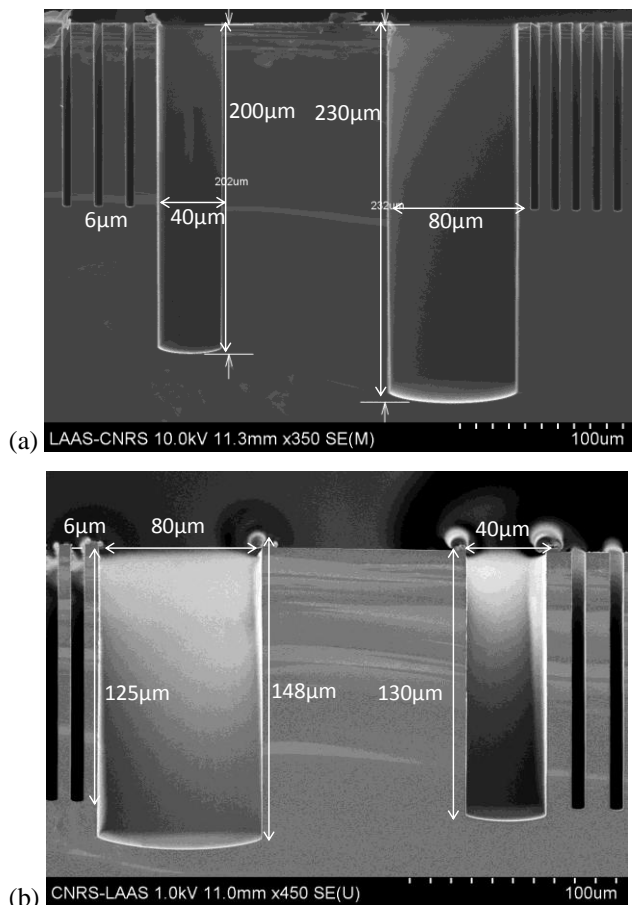


Figure 10 : Images MEB des profils de gravure obtenus pour un temps de gravure de $65\ \text{min}$, et des oxydes de protection de $300\ \text{nm}$ (a) et $1,6\ \mu\text{m}$ (b)

Tableau 2 : Ecart de profondeur de gravure pour des épaisseurs d'oxyde de masquage de $300\ \text{nm}$ et $1,6\ \mu\text{m}$ et un temps de gravure de $65\ \text{min}$.

	Sans Oxyde	Oxyde $300\ \text{nm}$	Oxyde $1,6\ \mu\text{m}$
$\Delta_{40\ \mu\text{m}-6\ \mu\text{m}}$	$90\ \mu\text{m}$	$70\ \mu\text{m}$	$5\ \mu\text{m}$
$\Delta_{80\ \mu\text{m}-6\ \mu\text{m}}$	$115\ \mu\text{m}$	$100\ \mu\text{m}$	$20\ \mu\text{m}$

4.3. Implantation autour des tranchées

Afin de pouvoir prétendre au concept de Superjonction, il faut avoir une alternance de régions P et N et un équilibre des charges entre ces régions. Pour cela, nous avons choisi de réaliser les bandes P grâce à la technique d'implantation PIII. L'avantage de cette technique est qu'elle nous permet d'implanter uniformément tout autour des tranchées. L'inconvénient majeur est que les doses d'implantation théoriquement nécessaires sont faibles : comme cela a été évoqué précédemment, une faible variation de dose par rapport à la dose optimale entrainera des baisses de tenue en tension. Cette étape du procédé de fabrication est à l'étude actuellement.

4.4. Remplissage des tranchées

Une autre étape critique est le remplissage des tranchées profondes par un diélectrique : nous avons choisi le BCB (Cyclotene 4026-46). De précédents travaux pour des structures $1200\ \text{V}$ ont permis de valider cette étape [7] mais avec un remplissage s'effectuant par deux dépôts successifs de BCB, rendant le procédé de fabrication plus lourd à mettre en œuvre. Nous avons choisi d'optimiser cette étape en procédant à un dépôt unique de diélectrique, ce qui est favorisé si les tranchées sont de profondeur égale. La **Figure 11** montre le remplissage obtenu pour des tranchées de $6\ \mu\text{m}$ et $40\ \mu\text{m}$ de large et $120\ \mu\text{m}$ de profondeur, en réduisant la vitesse de dépôt du BCB par centrifugation, et après polymérisation du diélectrique à 250°C pendant $1\ \text{h}$. L'excédent de BCB est ensuite enlevé par polissage mécano-chimique.

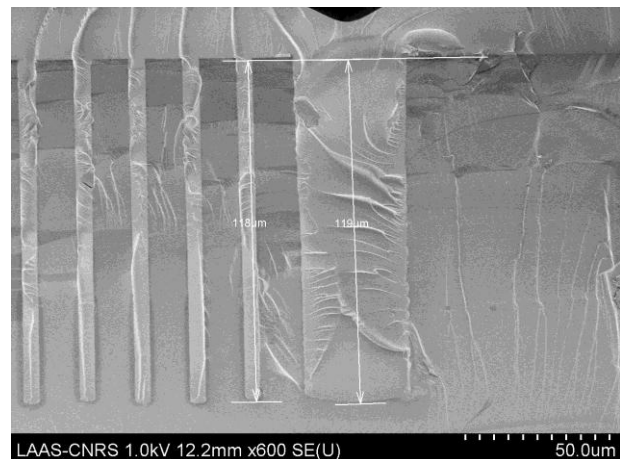


Figure 11 : Image MEB du remplissage des tranchées avec du BCB

5. CONCLUSION

Nous avons défini et optimisé les paramètres structurels des diodes à Superjonction et à tranchées profondes afin d'atteindre une tenue en tension de $600\ \text{V}$. La tenue en tension est avant tout influencée par la profondeur de jonction et l'équilibre des charges. Cependant, concernant la résistance à l'état passant, la largeur W_N a plus d'impact que la profondeur de jonction. En effet, c'est le paramètre qui, en l'augmentant, va nous

permettre d'obtenir de plus petites valeurs de résistance à l'état passant. A l'aide de simulations, nous avons pu donc déterminer les valeurs des paramètres pour obtenir une structure au compromis tenue en tension/résistance à l'état passant optimal. Le procédé de fabrication a été décrit, certaines étapes telles que la gravure verticale et le remplissage des tranchées ont été finalisés. Il reste encore à mettre en place l'étape d'implantation autour des tranchées avant de pouvoir réaliser la DT-SJDiode. Le but est, à terme, la réalisation des transistors MOS à Superjonction (DT-SJMOSFET).

6. REMERCIEMENTS

Ces travaux sont développés dans le cadre de l'ANR SUPERSWITCH (programme Blanc 2011 – SIMI 9) et sont supportés par le réseau RENATEC

7. REFERENCES

- [1] L. Lorenz, G. Deboy, A. Knapp, M. März, « COOLMOS™ – a new milestone in high voltage power MOSFET », ISPSD'99, pp. 3-10.
- [2] M. Sagio, D. Fagone, S. Musumeci, « MDMESH™: innovative technology for high voltage power MOSFETs », ISPSD'2000, pp. 65-68.
- [3] T. Fujihira, « Theory of semiconductor superjunctions devices », Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 36, pp. 6254-6262, 1997.
- [4] L. Théolier, H. Mahfoz-Kotb, K. Isoird, F. Morancho, « A new junction termination technique: the Deep Trench Termination (DT2) », ISPSD 2009, pp. 176-179, Barcelone (Espagne).
- [5] Dow Chemical Company Processing for CYCLOTENE 4000 Series Photo BCB Resins, Février 2005.
- [6] S. Nizou, V. Vervisch, H. Etienne, M. Ziti, F. Torregrosa, L. Roux, M. Roy, D. Alquier, « Deep Trench doping by plasma immersion ion implantation in silicon », 16th International conference on Ion Implantation Technology 2006, Marseille, pp. 229-232, 11-16 Juin 2006.
- [7] L. Théolier, H. Mahfoz-Kotb, K. Isoird, F. Morancho, « A New Junction Termination Using a Deep Trench Filled With BenzoCycloButene », IEEE Electron Device Letters, Vol. 30, no. 6, pp. 687-689, Juin 2009.

