

Optimisation de la technologie Ga_2O_3 pour la réalisation d'une diode Schottky de puissance

Changzi LU^{1,2}, Pierre BROSELARD¹, Jean-Marie BLUET²

[1] INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale Lyon, CNRS, Ampère, UMR-5005, F-69621, France

[2] INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale Lyon, CNRS, Institut des Nanotechnologies de Lyon, UMR-5270, F-69622, France

RESUME – Dans cet article, nous discutons des différentes optimisations de la technologie du Ga_2O_3 pour la fabrication d'une diode Schottky de puissance. Les résultats obtenus pour différentes étapes technologiques sont détaillés. Les premières simulations TCAD montrent une bonne adéquation avec la théorie.

Mots-clés – Ga_2O_3 , Diode Schottky, Contact ohmique, Gravure plasma, Simulation TCAD.

1. INTRODUCTION

L'Oxyde de Gallium (Ga_2O_3) est un matériau semi-conducteur prometteur pour l'électronique de puissance grâce notamment à son très grand gap (E_g de 4,6-4,8 eV) [1]. Le Ga_2O_3 possède 5 phases communes nommées : α , β , γ , δ et ϵ [2]. La phase monoclinique β est la plus intéressante en raison de sa stabilité à température et pression ambiantes. Grâce à son grand champ électrique critique de 8 MV/cm [3], le Ga_2O_3 possède une « Baliga Figure of Merit » (BFOM) 10 fois plus grande que le SiC et 3,8 fois plus que le GaN [4]. Par ailleurs, la possibilité de la production à faible coût du substrat rend Ga_2O_3 compétitif dans le domaine des moyennes et hautes puissances [4]. Par contre, sa faible conductivité thermique ainsi que la difficulté à obtenir un dopage de type P sont des verrous pour la fabrication de composants de puissance. En l'absence du dopage de type P, il a été décidé de fabriquer une diode Schottky de par sa simplicité de fabrication. Dans le cadre de ce travail, une diode Schottky sera réalisée afin de démontrer expérimentalement les intérêts du Ga_2O_3 . Pour cela, certaines étapes technologiques doivent être optimisées telles que le contact ohmique, le contact Schottky, la gravure plasma et la passivation. Les différents résultats sur la réalisation de contacts ohmiques seront discutés et quelques essais sur la gravure seront présentés. Par ailleurs, la simulation TCAD est importante pour non seulement modéliser le composant fabriqué, mais également pour déterminer les paramètres optimisés du matériau et concevoir l'architecture du dispositif.

2. DÉMARCHES DES OPTIMISATIONS

Afin d'optimiser la diode, les démarches proposées suivantes sont :

- Optimisation du contact ohmique évalué par la mesure I-V des motifs Circular Transmission Line Method (CTLM)
- Optimisation du contact Schottky évalué par : I-V, C-V
- Optimisation de la gravure plasma évaluée par : profilométrie, microscope à force atomique (AFM) et microscopie électronique à balayage (MEB)
- Optimisation de la structure de la diode par : simulation SENTAURUS™ « technology computer-aided design » (TCAD)
- Optimisation de la passivation évaluée par I-V, C-V

3. CONTACT OHMIQUE

Il est difficile de former un contact ohmique pour les semi-conducteurs dans le domaine des grands gaps (WBG) et ultra grands gaps (UWBG) à cause de leur faible électroaffinité ainsi que la difficulté à obtenir un surdopage en surface [4]. Afin d'établir un bon contact ohmique pour le Ga_2O_3 , beaucoup de métaux ont été étudiés ainsi que les étapes de pré/post-traitements. Parmi ceux-ci, Ti/Au est la combinaison de métaux la plus utilisée [4]. En plus du choix de métaux, le post-traitement est assez important pour rendre le contact ohmique et, notamment, le procédé de « Rapid Thermal Annealing » (RTA). Le travail de Yao et al. [5] montre l'évidence de la nécessité du RTA permettant le passage d'un contact redresseur à un contact ohmique. Ici, nous étudions des combinaisons différentes de métaux comme Ti/Al, Ti/Al/Ni/Au, Ti/Al/Pt afin de comparer leurs performances respectives.

Afin d'évaluer le contact ohmique, les motifs CTLM montrés en figure 1 proposés par Marlow et Das [6] sont préférés pour l'extraction de la résistance de contact spécifique. Un wafer de 2 pouces dopé N en Sn (001) provenant de Novel Crystal Technology, Inc. a été utilisé afin d'optimiser les étapes technologiques. Les contacts sont obtenus par un procédé de lift-off. Les motifs ont été caractérisés en I-V avec la méthode des 4 pointes pour un échantillon métallisé avec Ti/Al/Pt sans RTA et un échantillon Ti/Al/Pt avec un RTA sous N_2 à 450 °C pendant 1 min.

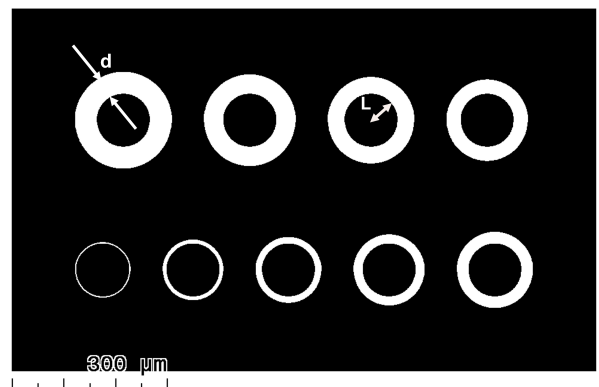


FIG. 1. Motifs CTLM

La figure 2 montre un comportement redresseur pour l'échantillon sans recuit et un comportement ohmique pour l'échantillon recuit. La nécessité d'un post-traitement RTA pour un bon contact ohmique est donc confirmée. Selon Lee et al. [7], une inter-couche TiO_x a été formée lors du RTA qui favoriserait la conduction.

Néanmoins, les résultats obtenus ne sont pas cohérents puisque la résistance ne croît pas avec la distance entre anneaux

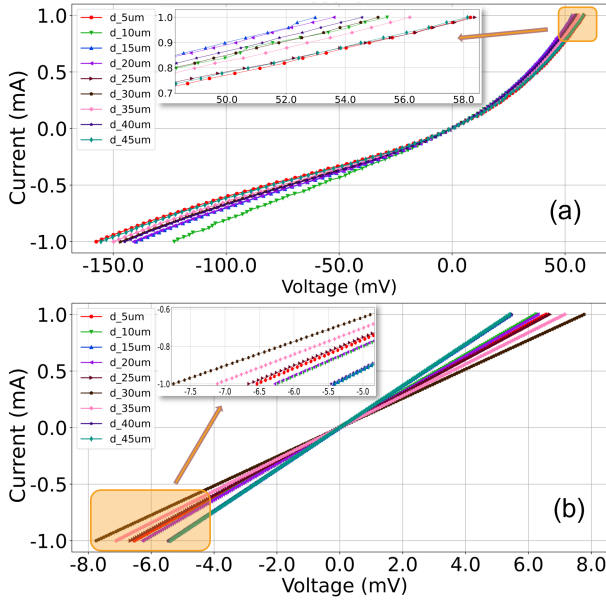


FIG. 2. Mesures I-V des motifs CTLM des échantillons avec Ti/Al/Pt (a) Sans RTA (b) Avec un RTA sous N₂

(voir les courbes zoomées sur la figure 2b). Un changement des motifs CTLM a été effectué pour vérifier la validité des hypothèses simplificatrices de la méthode CTLM. Les nouveaux motifs CTLM sont montrés en figure 3. Le cercle interne a été élargi et le nombre d'anneaux a été réduit à 5.

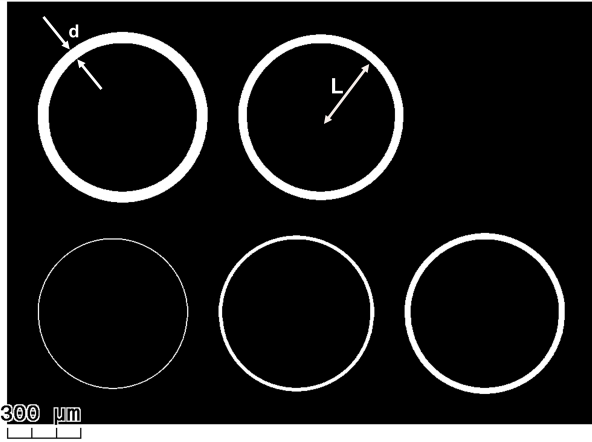


FIG. 3. Nouveaux motifs CTLM

Afin de stabiliser le contact entre les pointes et la couche métallique recuite, une métallisation plus épaisse a été mise en place. La couche métallique a été définie par Ti/Al/Pt/Al (1,5 μm d'épaisseur totale). L'échantillon a subi le même type de recuit que les précédents. La figure 4 présente les mesures I-V pour une zone des motifs CTLM. Une très bonne linéarité est observée, prouvant que le contact est bien ohmique. Toutefois, pour le motif avec une distance entre anneaux de 40 μm, une diminution de la résistance est observée. A partir de ces résultats, les résistances totales sont extraites en fonction de la distance entre anneaux pour 4 zones différentes. La figure 5 montre que la résistance totale mesurée est croissante avec une allure linéaire en fonction de la distance entre anneaux sauf pour la distance de 40 μm. La plus faible dispersion est probablement due à l'épaississement de la couche métallique.

En utilisant le modèle CTLM décrit par Schroder dans [8], la résistance de couche du semi-conducteur R_{sh} , la «transfer length» L_t , et la résistance de contact spécifique ρ_c sont extraites avec les

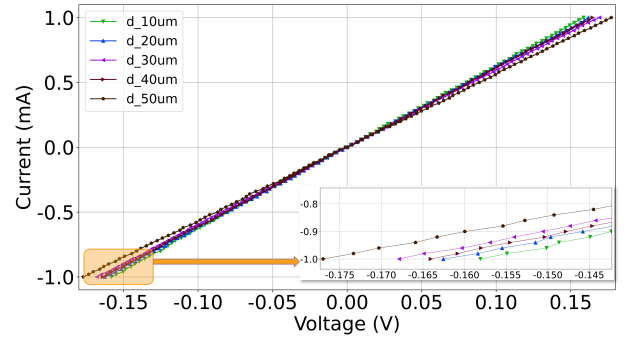


FIG. 4. Mesures I-V des motifs CTLM d'un échantillon Ti/Al/Pt/Al avec RTA sous N₂ en zone 1

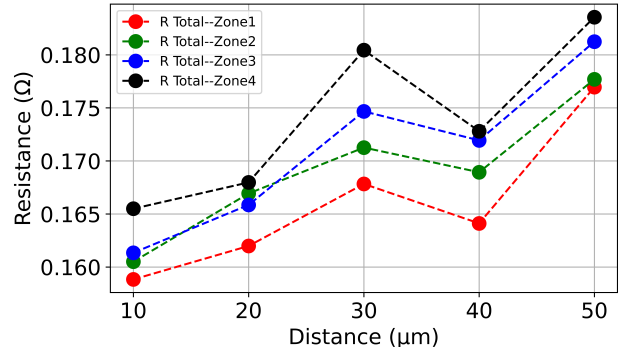


FIG. 5. Résistances totales mesurées en fonction de la distance entre anneaux pour les 4 zones de motifs CTLM

formules 1, 2 et 3. L signifie le rayon du cercle à l'intérieur et d signifie la distance entre anneaux.

$$R_t = \frac{R_{sh}}{2\pi L} (d + 2L_t) \cdot C \quad (1)$$

$$\rho_c = R_{sh} \cdot L_t^2 \quad (2)$$

$$C = \frac{L}{d} \ln \left(1 + \frac{d}{L} \right) \quad (3)$$

La regression linéaire a été utilisée et le facteur de correction C a été pris en compte, les résultats dans 4 zones de motifs CTLM différentes sont montrés dans figure 6.

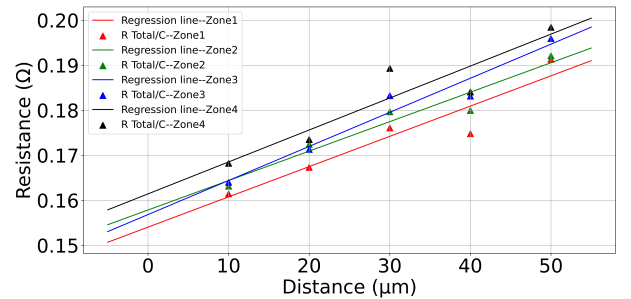


FIG. 6. Résistances totales mesurées divisées par le facteur de correction et la courbe de la regression linéaire pour 4 zones

Le tableau 1 montre les résistances de contact spécifiques ρ_c obtenues en 4 zones avec cette méthode d'extraction, la zone 3 provoque une résistance de contact spécifique la plus petite parmi les résultats des 4 zones.

TABLEAU 1. Résultat extraits des mesures CTLM pour l'échantillon Ti/Al/Pt/Al avec RTA

Ordonnée de la Zone	R_{sh} (Ω/sq)	L_t (μm)	ρ_c ($\Omega \cdot cm^2$)
Zone1	1,27	114,59	$1,67 \times 10^{-4}$
Zone2	1,23	120,65	$1,80 \times 10^{-4}$
Zone3	1,42	103,57	$1,53 \times 10^{-4}$
Zone4	1,34	113,72	$1,73 \times 10^{-4}$
Variance des résistances de contact spécifique %			0,77
Moyenne des résistances de contact spécifique			

Une légère non linéarité est toujours présente malgré le changement des motifs CTLM. Le modèle ne tient pas compte des phénomènes suivants [7] créés par la pointe :

- Une non uniformité de la distribution des lignes de courant autour du plot
- Une non uniformité de la distribution des lignes de courant en profondeur dans le semi-conducteur
- Une résistance non contrôlée et non négligeable entre la pointe et la couche métallique

Les résistances de contact spécifiques rapportées dans [4] se situent généralement entre $10^{-6} \Omega \cdot cm^2$ et $10^{-5} \Omega \cdot cm^2$. Nos résultats sont de l'ordre de $10^{-4} \Omega \cdot cm^2$, ceci montre que des marges d'optimisation existent pour atteindre les performances rapportées dans la littérature mais aussi que les résultats de la littérature doivent être comparés aux nôtres pour une méthode d'extraction identique.

En conclusion, un contact ohmique est obtenu sur Ga_2O_3 et le RTA est l'étape nécessaire pour ce dernier. Les mesures CTLM montrent néanmoins une légère incohérence entre la résistance totale mesurée et la distance entre anneaux des motifs CTLM probablement dues à des effets de la mesure sous pointes. De futures investigations sont prévues pour s'affranchir de cette problématique.

4. GRAVURE PLASMA

La protection périphérique est une méthode commune pour améliorer la performance du composant. La structure MESA est une méthode connue. Il est donc nécessaire de maîtriser la gravure du Ga_2O_3 . Une gravure sèche est favorable pour être plus anisotrope en utilisant la méthode ICP-RIE. Les travaux référencés dans [9] démontrent que l'ICP-RIE donne un meilleur état de surface après la gravure que la RIE classique, en sachant que l'état de surface est un facteur important pour la performance finale du composant. Concernant le gaz pour la gravure, la famille des gaz chlorés est connue pour son efficacité dans les semi-conducteurs III-V et les oxydes. Une vitesse de gravure de 135 nm/min environ avec la combinaison des gaz BCl_3/Ar a été démontrée dans [10] pour du Ga_2O_3 (201). Cette vitesse est 8 fois plus rapide qu'avec la combinaison des gaz Cl_2/Ar dans les mêmes conditions.

Deux échantillons identiques de Ga_2O_3 (001) avec un masque de résine ayant une épaisseur de 7 μm ont été gravés par ICP-RIE sous BCl_3/Ar avec les mêmes paramètres de gravure que celles de la littérature (pour une vitesse de 135 nm/min) pendant 10 min. Le tableau 2 montre le résultat de ces gravures. Dans un premier temps, cette différence suggère que les écarts de vitesse de gravure (36 nm/min contre 135 nm/min rapportés dans la littérature) pourraient provenir de variations dans la configuration des bâtis ou de l'orientation cristalline.

Afin de vérifier ces hypothèses, des tests supplémentaires ont été effectués sur le même type de matériau dans les mêmes conditions avec un autre bâti différent que celui des premiers essais. La gravure a duré 12 min et un masque de gravure métallique a été utilisé. Une vitesse de gravure d'environ 85 nm/min a été observée via le profilomètre. Ces résultats sont montrés dans tableau 3. Ces nouveaux tests confirment donc l'effet des

TABLEAU 2. Premiers résultats de la gravure avec la combinaison des gaz BCl_3/Ar avec masque de gravure en résine

	Echantillon1	Echantillon2
Épaisseur du masque (nm)	~6700	~6560
Masque gravé (nm)	~314	~240
Ga_2O_3 gravé (nm)	~180	~190
Sélectivité = $\frac{Ga_2O_3 \text{ gravé}}{Masque \text{ gravé}}$	~0,57	~0,79
Vitesse de gravure (nm/min)	~36	~38

différences entre bâtis. Néanmoins, cette vitesse de gravure n'est toujours pas à la hauteur de celle dans [10]. D'après les résultats montrés ainsi que les explications dans [9], différentes orientations cristallines conduisent à différentes densités de liaison pendante, une densité de liaison pendante plus importante entraîne une vitesse de gravure plus rapide. Ceci prouverait que la densité de liaison pendant est plus faible pour la Ga_2O_3 (001) que pour la Ga_2O_3 (201).

TABLEAU 3. Résultats de la gravure des nouveaux essais sous BCl_3/Ar avec masque de gravure métallique

	Echantillon avec masque métallique
Épaisseur du masque (nm)	~240
Masque gravé (nm)	~12
Ga_2O_3 gravé (nm)	~1012
Sélectivité = $\frac{Ga_2O_3 \text{ gravé}}{Masque \text{ gravé}}$	~84
Vitesse de gravure (nm/min)	~85

Les flans sont observés par MEB afin d'évaluer la qualité de la gravure. Le résultat est montré en figure 7, relevant un angle du flan d'environ 82° et pas d'effet de surgravure n'a été observé.

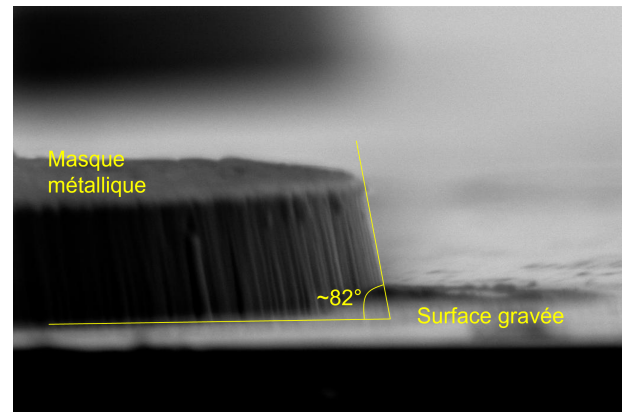


FIG. 7. Image du flan de la gravure des nouveaux essais sous BCl_3/Ar avec masque de gravure métallique

De futur tests avec différents paramètres de gravure en prenant en compte des mesures AFM pour la morphologie de surface pré-post gravure sont prévus afin d'optimiser la gravure et de comparer les résultats avec la littérature.

5. SIMULATION TCAD

En utilisant la méthode de l'ionisation par impact et le fichier des paramètres dans Sentaurus, une première simulation d'une structure « punch-through » 1d, illustrée par la figure 8, a été testée afin de comparer l'ordre de grandeur de la tenue en ten-

sion avec la théorie montrée dans [11]. La formule de la tenue en tension est donnée par équation 4 :

$$V_{BR} = E_C \cdot W - \left[\frac{eN_B W^2}{2\epsilon\epsilon_r} \right] \quad (4)$$

Où E_C est le champ électrique critique, W est la largeur de la zone de déplétion, N_B est la concentration du dopage, ϵ_r et ϵ représentent respectivement la permittivité relative et celle du vide. Une bonne cohérence entre la simulation et la théorie est observée, ce qui valide dans un premier temps les paramètres de modélisation.

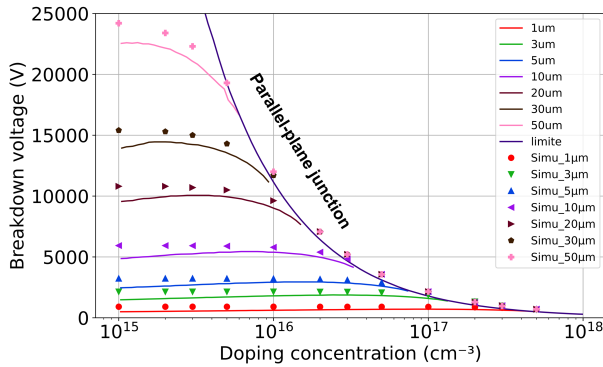


FIG. 8. Comparaison de la tenue en tension du Ga_2O_3 d'après la simulation avec la théorie avec la structure « punch-through »

De plus, différentes structures de diode Schottky ont été simulées afin de déterminer la structure optimale de notre composant final. Dans un premier temps, la structure MESA a été simulée avec différentes profondeurs de gravure ainsi que différents angles de MESA. La structure est montrée en figure 9.

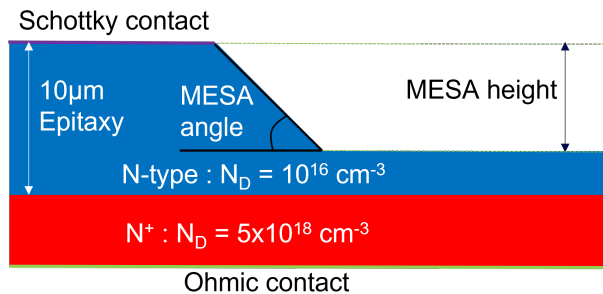


FIG. 9. Structure MESA de la simulation TCAD

La couche épitaxiée utilisée a une épaisseur de 10 μm avec un dopage N de 10^{16} cm^{-3} , la profondeur de MESA varie de 1 à 11 μm et l'angle de MESA de 50 à 90°. Le contact Schottky et le contact ohmique sont tous définis comme idéaux, en déclarant que le contact Schottky possède un travail de sortie de 5,65 eV. Les résultats de la tenue en tension sont montrés en figure 10. La référence de la tenue en tension présentée dans la courbe (5730 V) est obtenue par la simulation 1D sans la structure MESA avec 10 μm d'épitaxie et mêmes contacts ohmique/Schottky. Nous remarquons qu'afin d'atteindre la limite de la tenue en tension, une grande profondeur de gravure ainsi qu'un angle de 90° sont nécessaires.

D'autres structures de diode sont en cours d'investigation afin de pouvoir trouver la meilleure stratégie.

6. CONCLUSIONS

Différents aspects des optimisations de la technologie Ga_2O_3 pour la réalisation d'une diode Schottky de puissance sont dis-

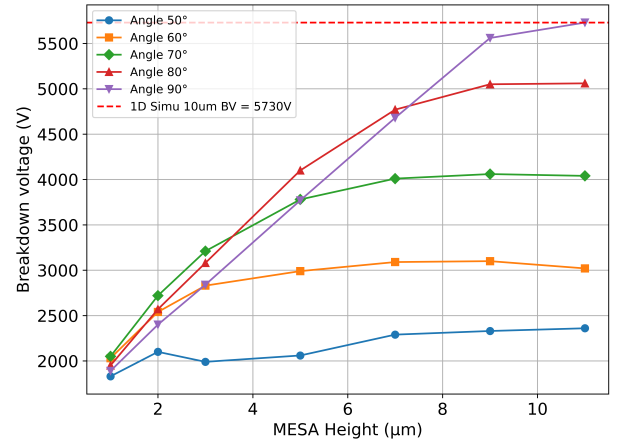


FIG. 10. La tenue en tension en fonction de la profondeur de MESA avec différents angles de MESA

cutés. Les premiers résultats du contact ohmique relèvent l'importance du recuit RTA. Les résultats actuels montrent une résistance de contact spécifique de $1,53 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ et une résistance de couche du semi-conducteur de $1,43 \Omega/\text{sq}$. Différents métaux sont en cours d'investigation pour le contact Schottky. Une première gravure dans un bâti ICP-RIE avec gaz BCl_3/Ar montre une vitesse 5 fois moins rapide que la littérature, les nouveaux tests dans un autre bâti montrent une vitesse de gravure de 85 nm/min. La différence de vitesse de gravure entre 35 nm/min pour les premiers essais et 85 nm/min pour les nouveaux tests est probablement due à la différence de bâti. L'écart entre la vitesse de gravure mesurée de 85 nm/min et celle de la littérature de 135 nm/min provient des différentes orientations cristallines utilisées, (001) dans notre cas contre ($\bar{2}01$) dans la littérature. Finalement des simulations TCAD sont effectuées, les simulations de la structure « punch-through » montrent une bonne cohérence avec la théorie pour la tenue en tension. Les résultats d'une structure MESA montrent qu'une grande profondeur de MESA et un angle de 90° sont nécessaires pour atteindre la tenue en tension maximale. Différentes protections périphériques sont en cours d'optimisation.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Akito KURAMATA et al. « High-Quality $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Single Crystals Grown by Edge-Defined Film-Fed Growth ». *Japanese Journal of Applied Physics* 55.12 (1^{er} déc. 2016), 1202A2. DOI : [10.7567/JJAP.55.1202A2](https://doi.org/10.7567/JJAP.55.1202A2).
- [2] S I STEPANOV et al. « GALLIUM OXIDE : PROPERTIES AND APPLICATIONS - A REVIEW » (2016).
- [3] Andrew J. GREEN et al. « β -Gallium Oxide Power Electronics ». *APL Materials* 10.2 (1^{er} fév. 2022), p. 029201. DOI : [10.1063/5.0060327](https://doi.org/10.1063/5.0060327).
- [4] S. J. PEARTON et al. « A Review of Ga_2O_3 Materials, Processing, and Devices ». *Applied Physics Reviews* 5.1 (1^{er} mars 2018), p. 011301. DOI : [10.1063/1.5006941](https://doi.org/10.1063/1.5006941).
- [5] Yao YAO, Robert F. DAVIS et Lisa M. PORTER. « Investigation of Different Metals as Ohmic Contacts to $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$: Comparison and Analysis of Electrical Behavior, Morphology, and Other Physical Properties ». *Journal of Electronic Materials* 46.4 (avr. 2017), p. 2053-2060. DOI : [10.1007/s11664-016-5121-1](https://doi.org/10.1007/s11664-016-5121-1).
- [6] Gregory S. MARLOW et Mukunda B. DAS. « The Effects of Contact Size and Non-Zero Metal Resistance on the Determination of Specific Contact Resistance ». *Solid-State Electronics* 25.2 (1^{er} fév. 1982), p. 91-94. DOI : [10.1016/0038-1101\(82\)90036-3](https://doi.org/10.1016/0038-1101(82)90036-3).
- [7] Ming-Hsun LEE et Rebecca L. PETERSON. « Interfacial Reactions of Titanium/Gold Ohmic Contacts with Sn-doped $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ». *APL Materials* 7.2 (1^{er} fév. 2019), p. 022524. DOI : [10.1063/1.5054624](https://doi.org/10.1063/1.5054624).

- [8] Dieter K. SCHRODER. *Semiconductor Material and Device Characterization*. 1^{re} éd. Wiley, 21 oct. 2005. DOI : [10.1002/0471749095](https://doi.org/10.1002/0471749095).
- [9] Jack E HOGAN et al. « Chlorine-Based Dry Etching of β -Ga₂O₃ ». *Semiconductor Science and Technology* 31.6 (1^{er} juin 2016), p. 065006. DOI : [10.1088/0268-1242/31/6/065006](https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/6/065006).
- [10] Amit P. SHAH et Arnab BHATTACHARYA. « Inductively Coupled Plasma Reactive-Ion Etching of β -Ga₂O₃ : Comprehensive Investigation of Plasma Chemistry and Temperature ». *Journal of Vacuum Science & Technology A : Vacuum, Surfaces, and Films* 35.4 (1^{er} juill. 2017), p. 041301. DOI : [10.1116/1.4983078](https://doi.org/10.1116/1.4983078).
- [11] Jiancheng YANG et al. « Reverse Breakdown in Large Area, Field-Plated, Vertical β -Ga₂O₃ Rectifiers ». *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 8.7 (2019), Q3159-Q3164. DOI : [10.1149/2.0211907jss](https://doi.org/10.1149/2.0211907jss).